

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	
ВВЕДЕНИЕ	
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	
1.1 Выбор основного оборудования турбогенерационной установки на диоксиде углерода с ГТУ.....	
1.2 Схемы тригенерации энергии	
1.3 Термодинамический анализ схем тригенерации.....	
ГЛАВА 2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ГТУ	
2.1 Энергетическая эффективность.....	
2.2 Теоретические основы процесса тригенерации.....	
2.3 Органический цикл Ренкина.....	
2.3.1 Использование низкопотенциального тепла.....	
2.3.2 Схема органического цикла Ренкина.....	
ГЛАВА 3 ВЫБОР, ОБОСНОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТРИГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ГТУ	
3.1 Экологическое обоснование применения озонобезопасных хладагентов.....	
3.2. Техническое обоснование применения диоксида углерода.....	
ГЛАВА 4 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРИГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ГТУ НА ДОКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ	
4.1 Схема тригенерационной турбодетандерной установки с ГТУ и с производством жидкой и газообразной углекислоты.....	
4.2 Термодинамический расчет тригенерационной турбодетандерной установки с ГТУ и с производством жидкой и газообразной углекислоты.....	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ОЦР – органический цикл Ренкина

ПКХМ – парокompрессионная холодильная машина

КУ – котел-утилизатор

НКРТ – низкокипящее рабочее тело

ПТУ – паротурбинная установка

ГТУ – газотурбинная установка

ПГУ – парогазовая установка

АБТТ – абсорбционной термотрансформатор

ПКТТ – парокompрессионный термотрансформатор

ВТТ – воздушный термотрансформатор

ЧВД – часть высокого давления

ЧНД – часть низкого давления

КС – камера сгорания

КПД – коэффициент полезного действия

ВВЕДЕНИЕ

В рамках концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, утвержденной от 23 декабря 2015г. Одним из перспективных направлений в энергетике является создание и дальнейшее усовершенствование тригенерационных установок. Улучшить эффективность тригенерационных можно путем повышения их технико-экономической и термодинамической эффективности.

В энергетике Республики Беларусь наиболее распространенными являются когенерационные установки. Данные установки способны производить и электрическую, и тепловую энергии. Наиболее распространенными на нашей территории являются тепло-электро централи (ТЭЦ). Помимо ТЭЦ в Республике Беларусь есть атомные электростанции (АЭС), конденсационные электростанции (КЭС).

Так же важным является снабжение холодом, как для собственных нужд, так и для внешнего потребителя. Холод необходим в различных технологических процессах, хранении различной продукции и тд. Установка способная производить электрическую энергию, тепловую энергию, а так же холод, является тригенерационной. Для получения тепловой и электрической энергий применяются паротурбинные установки (ПТУ), газотурбинные (ГТУ), парогазовые (ПГУ), газопоршневые (ГПА). Холод же производится с помощью трансформаторов различных типов и конструкций: абсорбционных (АБТТ), парокомпрессионных (ПКТТ), воздушных (ВВТ). Данные трансформаторы способны работать в нескольких режимах, например в режиме теплового насоса с выработкой тепловой энергии.

В тригенерационных установках в качестве рабочих тех применяются низкокипящие рабочие тела (НКРТ). Данные рабочие тела обладают высокими давлениями паров и низкими температурами парообразования. В технике используются такие НКРТ, как фреоны, диоксид углерода, углеводороды и так далее. Так же использование НКРТ упрощает требование к металлам при производстве турбин, снижает расход рабочего тела и следовательно размер лопаток турбины уменьшается.

Выбор конкретного НКРТ в установке определяется следующими критериями:

- безопасность рабочего тела;
- дешевизна;
- низкое влияние на экологию окружающей среды;
- хорошие теплофизические свойства;

В настоящее время особое внимание среди различных схем тригенерационных установок обращено к установкам, работающим на органическом цикле Ренкина (ОЦР). Данные установки широко представлены в альтернативной энергетике.

Главной особенностью органического цикла Ренкина, по сравнению с классическим, является эффективная работа установки при низких температурах рабочего тела (100-300 °С и меньше). Данные схемы способны работать на докритических, так и на сверхкритических параметрах.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2021 – 2025 гг. «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование: энергетическая энергоэффективность, энергосбережение», утвержденному Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 №156.

Цель и задачи исследования

Целью работы является:

Провести термодинамический анализ схемы триггерационной установки на диоксиде углерода с ГТУ на докритических параметрах.

Для достижения цели в работе ставились следующие *задачи*:

1. Провести анализ и выявить перспективные направления повышения технического и термодинамического совершенства систем совместного производства теплоты, холода и электричества.

2. Исследовать метод повышения эффективности тригенерационной установки (использование ГТУ).

Объект исследования: тригенерационные установки на низкотемпературных рабочих телах, работающих на докритических параметрах.

Предмет исследования: определение характеристик тригенерационных установок; разработка методики расчёта тригенерационных турбодетандерных установок, работающих на низкокипящих рабочих телах.

Положения, вносимые на защиту:

1. Принципиальные схемы тригенерационных турбодетандерных установок, работающих на докритических параметрах.

2. Результаты исследования параметров рабочих тел и их теплофизических свойств на эффективность тригенерационной установки, которые показывают целесообразность применения методов повышения энергетической эффективности (использование ГТУ).

Личный вклад соискателя

Данная диссертация в полном объёме разработана и подготовлена к защите соискателем лично и под руководством научного руководителя, д.т.н., профессора Овсянника Анатолия Васильевича.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований докладывались на следующих научных конференциях, симпозиумах, семинарах:

- XXIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления».
- 43 научная конференция студентов I, II ступеней и аспирантов.

Опубликованность результатов диссертации

1. По результатам XXIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления».
2. 43 научная конференция студентов I, II ступеней и аспирантов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырёх глав основной части, заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации – 45 страниц, включая 15 рисунков, 5 таблиц, 22 библиографических ссылок.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.1 Выбор основного оборудования тригенерационной установки на диоксиде углерода с ГТУ

В результате проведенного анализа работ по данной тематике, были определены следующие факторы, определяющие выбор технических решений при создании тригенерационных установок. Наиболее важным является предположительный режим генерации. В первую очередь, выработка холода и тепла в течении года либо сезонная (летом-холод, зимой-тепло), либо совместная (зимой и летом – тепло и холод). Основными потребителями данной установки являются торговые центры, магазины, предприятия, спортивные центры, жилые помещения.

Наиболее характерными установками для Республики Беларусь в области генерации продолжают оставаться когенерационные установки. Такие как теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) – электростанции снабжающие большим количеством тепловой и электрической энергией крупные населенные пункты или предприятия. На теплоэлектроцентралях в зависимости от выбранной схемы применяются различные устройства. Например: газотурбинная установка (ГТУ), паротурбинная установка (ПТУ), парогазовая (ПГУ). В настоящее время в Республике Беларусь была введена в эксплуатацию АЭС. Данная станция позволила существенно нарастить электрическую мощность в энергосистеме Республики Беларусь, что привело к успешному вводу в эксплуатацию электрических котлоагрегатов по всей Республике. Так же стоит отметить наличие конденсационных станций (ГРЭС), ярким представителем которых является Новолукомльская ГРЭС.

При выборе оборудования для тригенерационной учитывается обеспеченность различных видов энергии на рынке, а так же ее цена, климатическая зона для региона в котором планируется строительство данной установки. При проектировании тригенерационной установки существует множество технических решений, оно определяется как различными когенерационными установками, так и различными трансформаторами холода. В таблице 1.1 представлены различные варианты для производства тепла и холода.

Таблица 1.1 – Источники энергии для производства тепла и холода для различных типов энергоустановок

Тип генерирующей установки	Источник энергии, используемой для производства	
	Тепла	Холода
ПТУ	Отбор теплофикационной турбины	Отбор теплофикационной турбины Электроэнергия
ГТУ	Тепло уходящих газов	Тепло уходящих газов Электроэнергия
ПГУ	Отбор теплофикационной турбины Тепло уходящих газов	Отбор пара в ПТУ части Тепло газа на выхлопе ГТУ части Электроэнергия

Паротурбинная установка (ПТУ) состоит из одной или нескольких последовательно расположенных ступеней, в которых происходит преобразование энергии: потенциальная и внутренняя энергия пара преобразуются в соплах и лопатках в кинетическую, а кинетическая энергия, а также работа сил, возникающих в процессе ее преобразования в рабочем колесе – в механическую энергию, передаваемую непрерывно вращающемуся валу.

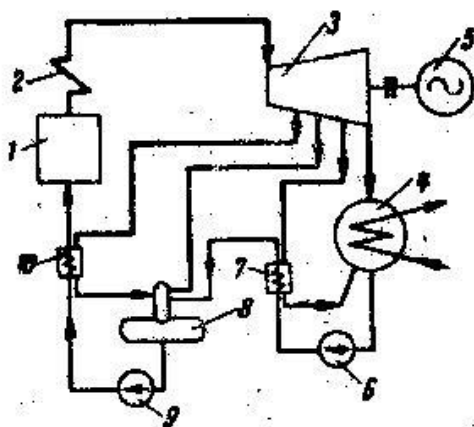


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема паротурбинной установки:

1- котел; 2 – пароперегреватель; 3 – турбина; 4 – конденсатор; 5 – генератор; 6 – конденсаторный насос; 7 – подогреватель низкого давления; 8 – деаэратор; 9 – питательный насос; 10 – подогреватель высокого давления.

Свежий пар из котла 1 и пароперегревателя 2 поступает в паровую турбину 3 и, расширяясь в ней, совершает работу вращая ротор электрического

генератора 5. После выхода из турбины пар поступает в конденсатор 4, где происходит его конденсация. Далее конденсат отработавшего пара конденсаторным насосом 6 прокачивается через подогреватель низкого давления 7 в деаэратор 8. Из деаэратора 8 питательным насосом 9 вода подается через подогреватель высокого давления 10 в котел 1. Паровая турбина и электрогенератор в совокупности представляют собой турбоагрегат. Подогреватели 7, 10 и деаэратор 8 образуют систему регенеративного подогрева питательной вода с использованием пара из нерегулируемых отборов паровой турбины.

Газотурбинная установка представленная на рисунке 1.2

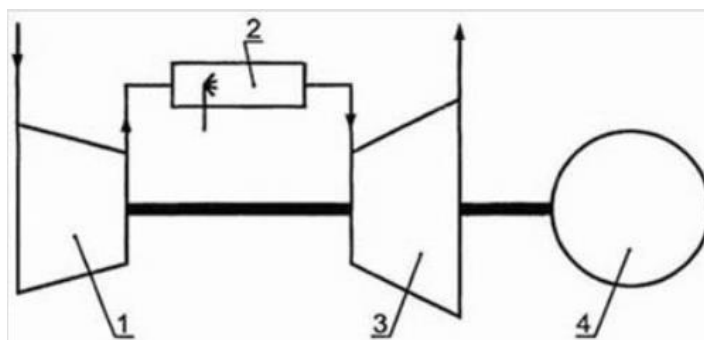


Рисунок 1.2 – принципиальная схема ГТУ:

1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – рабочее колесо турбины; 4 – электрический генератор.

В компрессор 1 газотурбинной установки подается воздух. Под высоким давлением воздух из компрессора направляется в камеру сгорания 2, куда подается и основное топливо – газ. Данная смесь воспламеняется. При сгорании газовоздушной смеси производится энергия в виде потока газов. Этот поток, обладая высокой скоростью устремляется на рабочее колесо турбины 3 и вращает его. Кинетическая, а также работа сил, возникающих в процессе ее преобразования в рабочем колесе – в механическую энергию, передаваемую непрерывно вращающемуся валу, который приводит в действие компрессор и электрический генератор. С клемм электрогенератора произведенное электричество, пройдя преобразования в трансформаторе, направляется в электросеть, потребителям энергии.

Снабжение холодом потребителей осуществляется в специальных аппаратах, которые называются термотрансформаторы, работающие в режиме холода. Они необходимы для различных технологических процессов, для хранения различной продукции. Термотрансформаторы холода бывают трех видов: пароконденсационные (ПКТТ), абсорбционные (АБТТ), воздушные (ВВТ). Термотрансформаторы способны работать в режиме выработки тепловой энергии, в качестве тепловых насосов.

Среди трансформаторов холода наименьшее применение в тригенерационных установках получили воздушные термотрансформаторы (ВТТ). Для производства холода в данном устройстве необходимо затрачивать определенное количество энергии, которое можно использовать для других целей и это не предусматривает использование низкопотенциальной теплоты уходящих газов теплогенерирующей установки для производства холода [2].

Парокомпрессионные установки относительно воздушных обладают большей простотой конструкции, высокой холодопроизводительностью и большую надежность. Рабочим телом являются пары различных веществ – аммиака NH_3 , углекислоты CO_2 , фреонов (фторхлорпроизводных углеводородов). Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной установки приведена на рисунке 1.3.

Данный вид термотрансформатора, для производства холода использует электричество и не требует использования низкопотенциального тепла уходящих газов теплогенерирующей установки. Минусом парокомпрессионной установки, является использование холодильных агентов, которые могут наносить вред здоровью человека, а так же окружающей среде. Тем не менее парокомпрессионные холодильные установки в некоторых случаях оказались оправданными и перспективными, как с экономической составляющей, так и по конструкции, для использования в тригенерационных установках.

В абсорбционных холодильных установках для получения низких температур затрачивается не механическая работа, а теплота какого-либо рабочего тела с высокой температурой. Термодинамически эти установки менее совершенны, чем паровые, однако они значительно проще по конструкции (ввиду отсутствия компрессора), дешевле, более надежны в работе и поэтому получили достаточно широкое распространение.

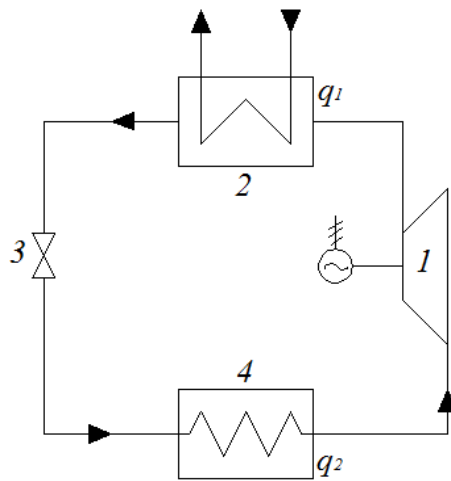


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной установки:

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – дроссельный клапан;

4 - испаритель

Данная установка работает следующим образом. В компрессоре 1 происходит адиабатное сжатие паров хладагента. В конденсаторе 2 холодильный агент вначале охлаждается при постоянном давлении и затем конденсируется с отдачей в окружающую среду теплоты q_1 . В дроссельном клапане 3 происходит процесс дросселирования с превращением жидкости во влажный пар. В испарителе 4 влажный пар отбирает теплоту q_2 от охлаждаемого объёма, и содержащаяся в нем жидкость испаряется, далее процесс повторяется.

В абсорбционных холодильных машинах для получения холода используется не механическая энергия, а теплота какого-либо рабочего тела с высокой температурой. Данные установки не имеют компрессора, что упрощает конструкцию и более надежны в работе.

Для абсорбционной установки подбираются две жидкости, которые полностью растворяются друг в друге и имеют различные температуры кипения - как абсорбент. Принципиальная схема абсорбционной холодильной установки приведена на рисунке 1.4.

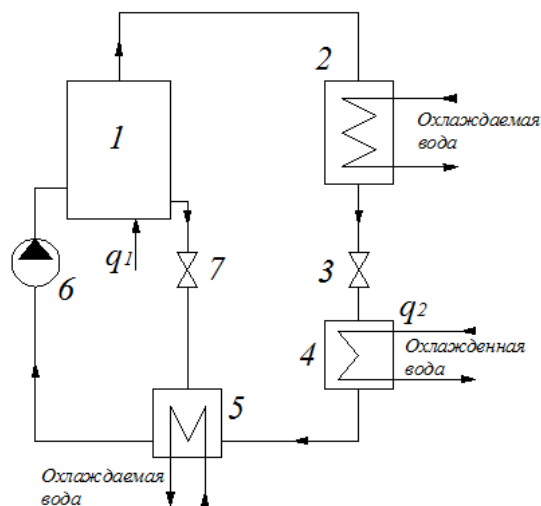


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема абсорбционной холодильной установки:

1-парогенератор; 2 – конденсатор; 3,7 – дроссельный вентиль; 4 – теплообменник; 5 – абсорбер; 6 – насос.

В парогенераторе 1 в результате подвода низкопотенциальной теплоты уходящих газов q_1 холодильный агент выпаривается из абсорбента в виде почти сухого насыщенного пара. В конденсаторе 2 он полностью конденсируется, отдавая теплоту парообразования охлаждающей воде. В дроссельном вентиле 3 холодильный агент дросселируется, что сопровождается уменьшением давления и температуры и увеличением объема. В теплообменнике 4 происходит передача холодильному агенту теплоты q_2 от охлаждаемых тел. В абсорбере 5 происходит соединение холодильного агента с абсорбентом, поступающим через дросселирующий вентиль 7. Полученная смесь насосом 6 направляется в парогенератор 1 и процесс повторяется.

1.2 Схемы тригенерации энергии

Схема тригенерационной установки на диоксиде углерода на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты представлена на рисунке 1.5.

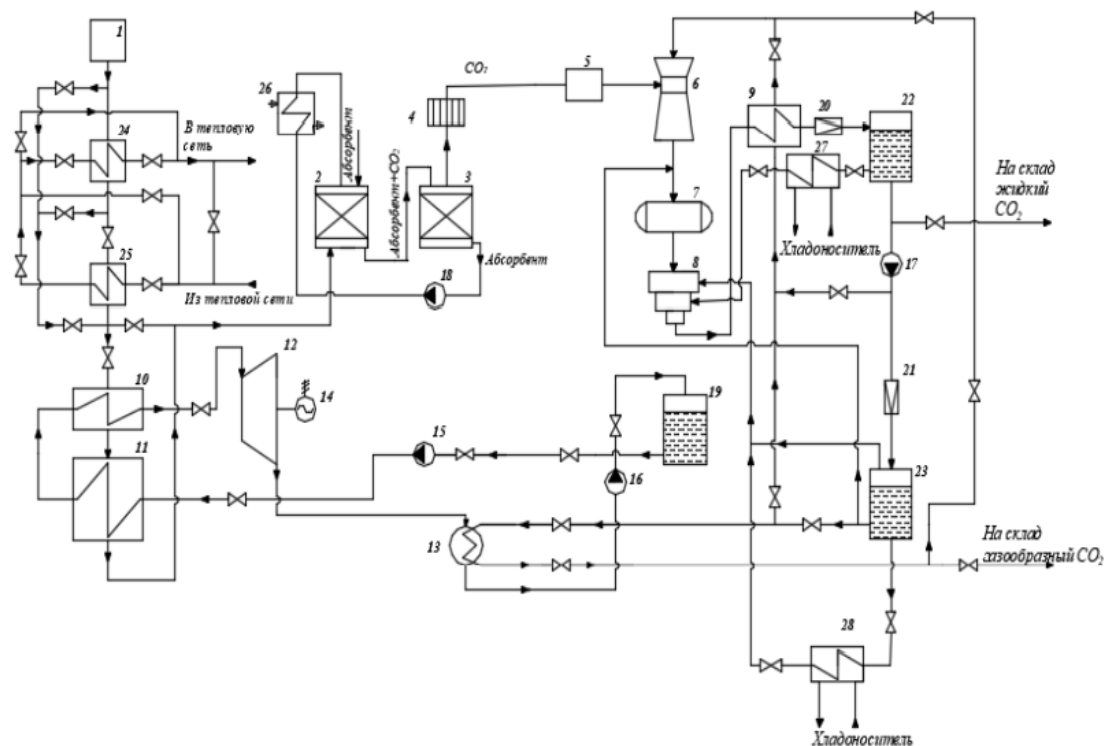


Рисунок 1.5 – Схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты:

1 – источник продуктов сгорания (ВЭР); 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – перегреватель; 11 – испаритель; 12 – паровая турбина; 13 – конденсатор; 14 – электрогенератор; 15–18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24–26 – теплообменник; 27, 28 – испаритель.

Установка подключается через теплофикационный узел, состоящий из двух теплообменников 24 и 25, к источнику продуктов сгорания или дымовых газов. В теплообменниках теплофикационного узла происходит их охлаждение до требуемой температуры, после чего продукты сгорания поступают последовательно в абсорбер 2 с поглощением газообразной углекислоты из продуктов сгорания и десорбер 3, где осуществляется

выделение из абсорбента CO_2 . После десорбера углекислый газ поступает через брызгоотделитель 4 и осушитель 5 в инжектор 6, где инжектируется в линейный ресивер 7, при этом его давление повышается до давления всасывания в компрессоре первой ступени 8. После трехступенчатого компрессора 8 газообразный CO_2 направляется в конденсатор 9, охлаждается и поступает на первое дросселирование в дроссельное устройство 20, после которого температура и давление CO_2 снижаются, и далее – в сепаратор 22. Отделившаяся в сепараторе жидкая фаза CO_2 поступает на второе дросселирование в дроссельное устройство 21, где опять происходит снижение температуры и давления. Жидкий диоксид углерода из сепаратора 23 подается в конденсатор 13 турбогенераторной установки, кипит, поглощая теплоту конденсации газообразного CO_2 после его расширения в турбодетандере 12. Образовавшийся в результате кипения CO_2 газ направляется в инжектор 6, инжектирует газообразный CO_2 после десорбера 3 и накапливается в линейном ресивере 7. Часть жидкой углекислоты после сепаратора 22 подается на конденсатор 9 для конденсации сжатой газообразной CO_2 после компрессора 8. Теплообменники 24 и 25 теплофикационного узла предназначены для подогрева сетевой воды для целей отопления и горячего водоснабжения. Из ресивера-накопителя 19 жидкий CO_2 подается насосом 15 последовательно в испаритель 11 и перегреватель 10, где испаряется и перегревается до необходимой температуры, после чего поступает на турбодетандер 12, расширяется, конденсируется в конденсаторе 13 и насосом 16 опять подается в ресивер-накопитель 19. Турбодетандерный контур (турбодетандер 12 – испаритель 11 – перегреватель 10 – конденсатор 13 – насос 16 – ресивер-накопитель 19) может работать как на цикле с докритическими параметрами, так и на цикле с закритическими (транскритическими) параметрами. На схеме не показано охлаждение газообразного CO_2 после сжатия в первой и второй ступенях компрессора [6].

Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом-утилизатором изображена на рисунке 1.6.

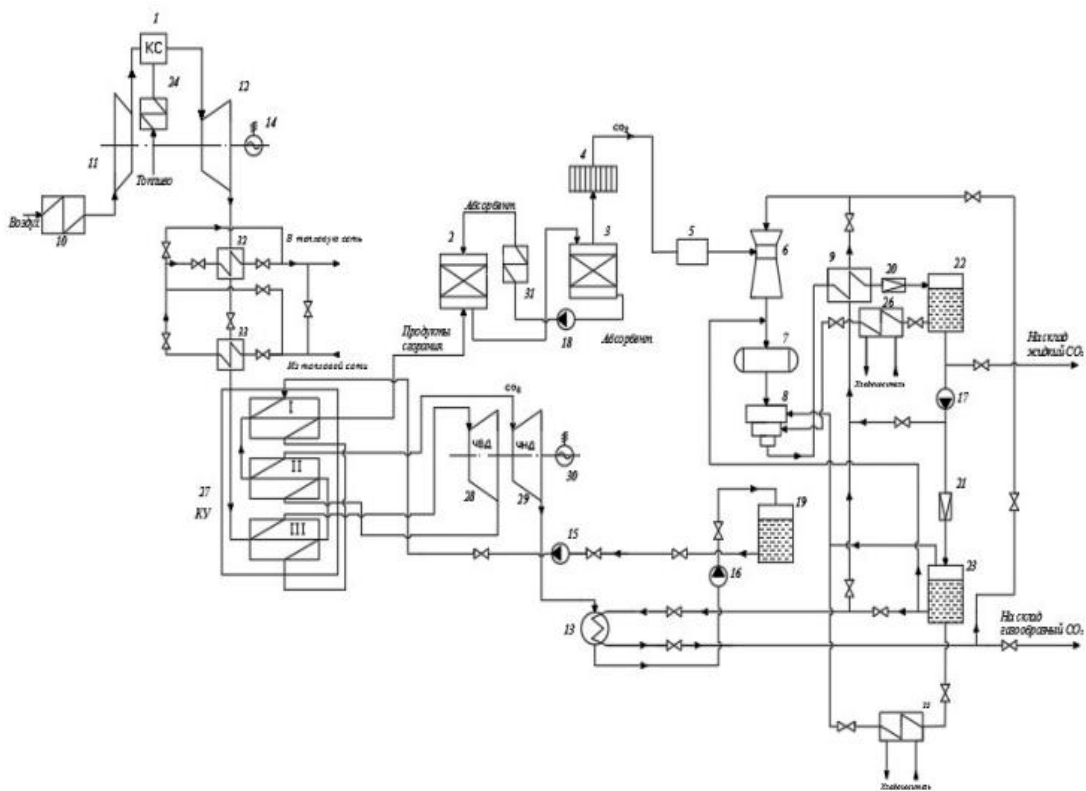


Рисунок 1.6 Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом утилизатором:

1 – камера сгорания; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – воздухоподогреватель; 11 – турбокомпрессор; 12 – газовая турбина; 13 – конденсатор-испаритель; 14, 30 – электрогенератор; 15–18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 31–33 – теплообменник; 25, 26 – испаритель; 27 – котел утилизатор; 28, 29 – ЧВД и ЧНД турбины соответственно

Из ресивера-накопителя 19 жидкий CO_2 подается насосом 15 последовательно в испаритель I котла утилизатора 27, где испаряется, после чего поступает в ступень III котла утилизатора 27, где парообразный CO_2 перегревается и отправляется на ЧВД турбины 28. После ЧВД CO_2 поступает в ступень II котла утилизатора 27, где осуществляется второй перегрев, после чего CO_2 поступает на ЧНД турбины 29. Затем CO_2 конденсируется в конденсаторе 13 и насосом 16 опять подается в ресивер-накопитель 19. Турбодетандерный контур (ЧВД 28 и ЧНД 29 – котел утилизатор 27 – конденсатор-испаритель 13 – насос 16 – ресивер-накопитель 19) может работать как на цикле с докритическими параметрами, так и на цикле с закритическими (транскритическими) параметрами. На схеме не показано охлаждение газообразного CO_2 после сжатия в первой и второй ступенях компрессора.

Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом утилизатором изображена на рисунке 1.7.

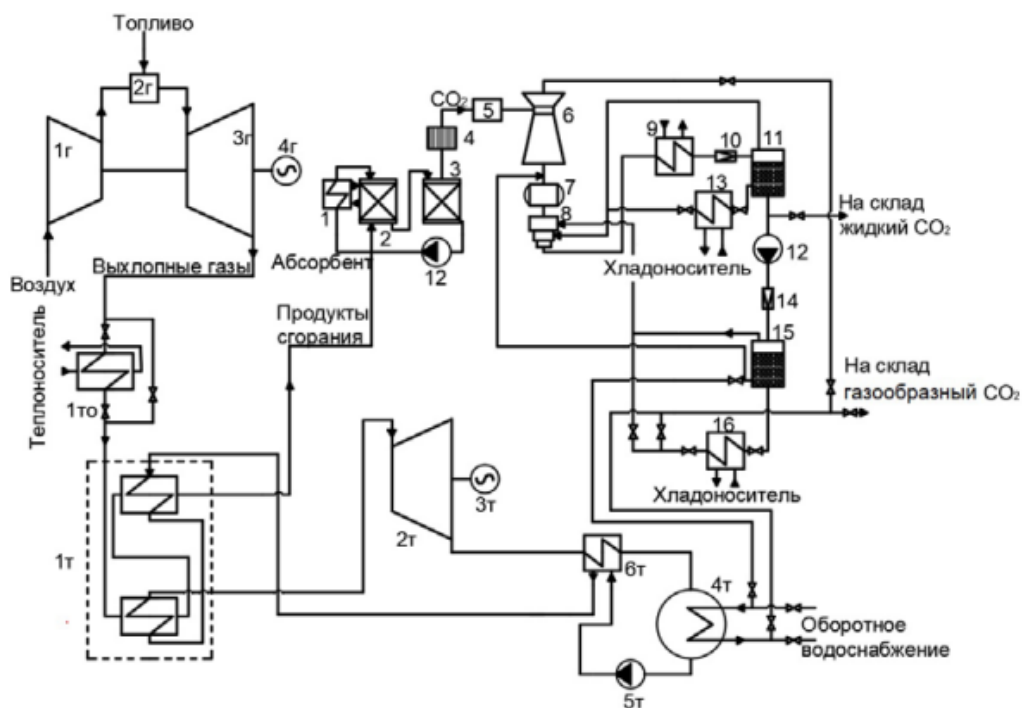


Рис. 1.7 Схема тригенерационной установки с производством жидкой и газообразной углекислоты:

1, 13, 16 – теплообменный аппарат; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10, 14 – регулирующий вентиль; 11, 15 – сепаратор; 12, 22 – насос; 17 – подогреватель сетевой воды; 18 – котелутилизатор; 19 – турбина на НКРТ; 20 – генератор; 21 – конденсатор.

Продукты сгорания поступают в установку абсорбер–десорбер, где получается чистый CO_2 . Полученная углекислота при помощи инжектора 6 подается в ресивер 7. Из ресивера сжатый в компрессоре 8 диоксид углерода подается в теплообменник 9, охлаждается, дросселируется в регулирующем вентиле 10 и сепарируется в сепараторе 11. Часть полученной жидкой углекислоты подается на склад. Вторая часть поступает на вторую ступень дросселирования 14 и сепарируется в сепараторе 15. Часть полученной жидкой углекислоты используется для получения холода и конденсации рабочего тела в конденсаторе 21 турбоустановки на органическом цикле Ренкина. Получение холода в установке (тригенерация энергии) осуществляется в испарителях 13 и 16. Это приводит к повышению энергетической эффективности установки.

На рисунке 1.8 представлена схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с котлом утилизатором.

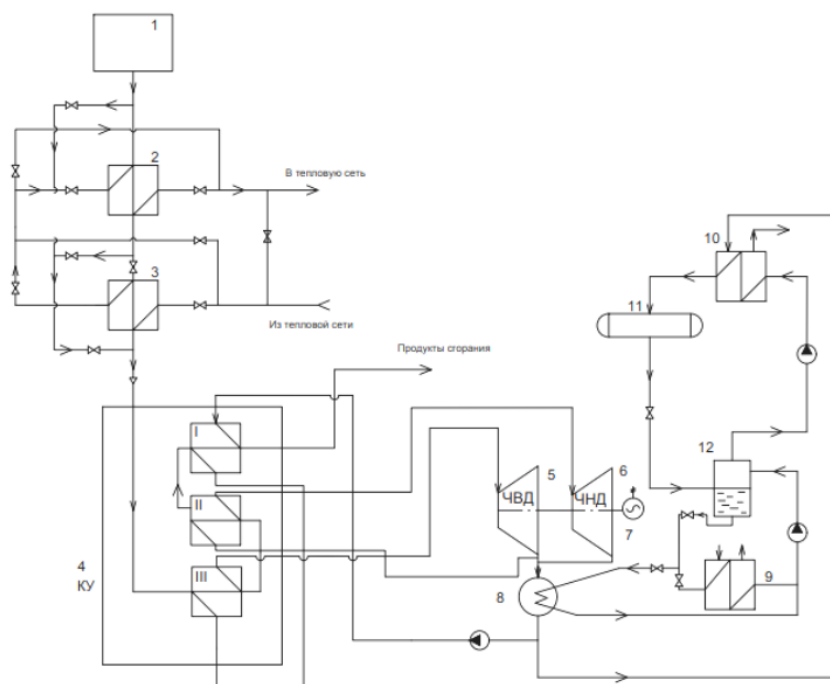


Рисунок 1.8 – Схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с котлом утилизатором:

1 – источник продуктов сгорания; 2, 3 – теплообменник; 4 – котел-утилизатор; 5, 6 – ЧВД и ЧНД турбины; 7 – электрогенератор; 8 – конденсатор-испаритель; 9 – испаритель; 10 – конденсатор; 11 – ресивер; 12 – сепаратор.

Принцип работы установки: установка подключается через теплофикационный узел, состоящий из двух теплообменников 2 и 3, к источнику продуктов сгорания. В теплообменниках теплофикационного узла происходит их охлаждение до требуемой температуры, после чего продукты сгорания поступают последовательно в котел-утилизатор 4 на ступень III, где подогревают фреон, направляющийся на ЧВД турбины 5. После ЧВД турбины дымовые газы направляются на II ступень КУ, где подогревают фреон, направляющийся на ЧНД турбины 6. Электрогенератор 7 преобразует механическую энергию вращения вала турбин в электрическую. Следующим шагом жидкий фреон из сепаратора 12 подается в конденсатор-испаритель 8 турбодетандерной установки, кипит, поглощая теплоту конденсации газообразного фреона после его расширения в ЧВД и ЧНД. Далее одна часть фреона перекачивается в КУ, а другая идет на I ступень холодильной

установки и, проходя через конденсатор и линейный ресивер, с помощью регулирующего вентиля поступает в сепаратор 12 [4].

1.3 Термодинамический анализ схем тригенерации

Из широкого спектра различных методов анализа термодинамических циклов, наиболее известными являются метод тепловых балансов, эксергетический метод и энтропийный метод. В таблице 1.2 представлена сравнительная характеристика данных методов. Из данной характеристики можно сделать вывод, что наиболее подходящим методом является эксергетический метод анализа, позволяющий определять эффективность отдельных элементов установки и учитывать ценность различных видов энергии.

Таблица 1.2. Характеристика методов термодинамического анализа

Метод тепловых балансов	Эксергетический метод	Энтропийный метод
Определяется термический КПД	Определяется эксергетический КПД	Определяется эксергетический КПД
В основе лежит первый закон термодинамики	Учитывает второй закон термодинамики	Основывается на рассмотрении только эксергии теплового потока
Не учитывает различное качество энергии	Ценность энергии зависит от окружающей среды	Невозможно определение КПД отдельных элементов. Отсутствует качественная оценка потерь

Структура математической модели для проведения эксергетического анализа схем на ОЦР представлена на рис. 9.



Рисунок 1.9 Структура математической модели для проведения эксергетического анализа схем на органическом цикле Ренкина

ГЛАВА 2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ И СУЩНОСТЬ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ГТУ

2.1. Энергетическая эффективность

В настоящее время в промышленности есть множество источников низкопотенциального тепла, данная тепло часто не используется полезно. Для решения этой проблемы используются установки на альтернативных источниках тепловой энергии – геотермальная энергия, энергия солнца, биотопливо, энергия ветра и приливов. Уже сегодня исследователи прилагают серьезные усилия для поиска различных методов рекуперации и использования низкопотенциальной энергии, которая в больших количествах вырабатывается на различных теплоэлектростанциях и выбрасывается в окружающую среду.

Сама же эффективность тригенерационных установок сильно зависит от возможности использования энергии как в летний, так и в зимний период. В летний период наибольшая потребность в кондиционировании, а зимой в отоплении. Исходя из этого установка может использоваться круглогодично.

На данный момент в Республике Беларусь действует концепция энергетической безопасности, которая предполагает развитие альтернативных источников энергии, а так же снижение потребления природного газа. Что дает возможность интегрировать в энергосистему тригенерационные установки. Экономия энергоресурсов при внедрении тригенерационных установок достигает 60%.

2.2 Теоретические основы процесса тригенерации

Философия процесса тригенерации заключается в производстве трех видов энергии, таких как энергия тепла, холода и электрическая энергия.

Тригенерационные установки состоят из когенерационной установки и термотрансформатора, работающего в режиме холодильной машины. Холодильные машины при выработке холода используют тепловую энергию (АБХМ) и электрическую (ПКХМ). Обе холодильные машины способны работать вместе с когенерационной установкой.

При использовании холодильной машины в рамках тригенерационной установки, привод которой работает от источника электрической энергии (ПКХМ), часть электрической энергии будет затрачиваться на собственные нужды, а другая часть будет передана потребителю. В холодильных установках же, работающих от источника тепловой энергии (АБХМ), часть тепловой энергии идет на собственные нужды, а часть внешнему потребителю.

Схема энергетического баланса простейшей тригенерационной установки с использованием абсорбционной холодильной машины (АБХМ) представлена на рисунке 2.1.

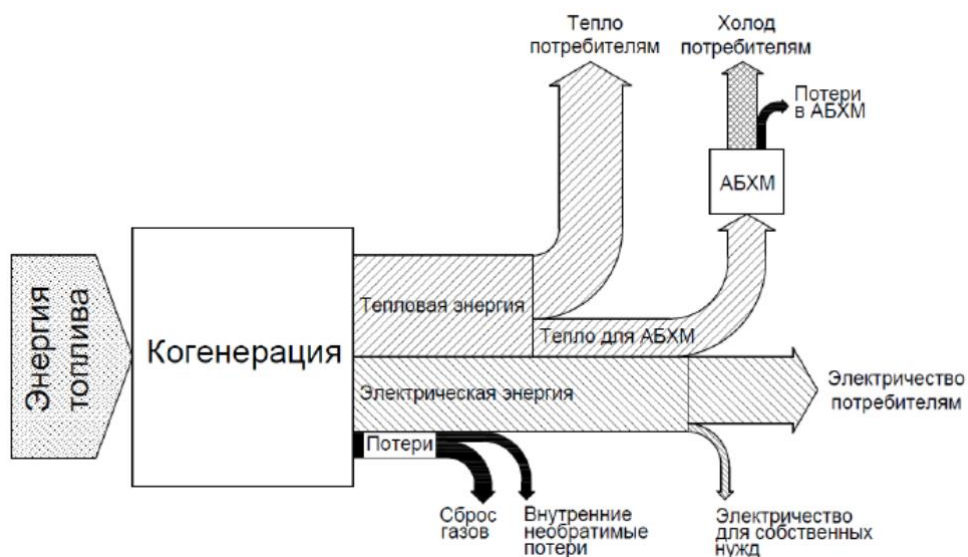


Рисунок 2.1 – Схема энергетического баланса системы тригенерации с использованием АБХМ

Принцип работы схемы тригенерации с использованием АБХМ во многом схож со схемой с применением ПКХМ.

Особенностью использования АБХМ в сочетании с когенерационной установкой является тот факт, что для работы АБХМ не используют компрессоры механического принципа действия, в отличие от ПКХМ. Это позволяет потребителю получать большее количество электроэнергии, чем при использовании ПКХМ.

Работа АБХМ так же сопровождается некоторыми потерями. Потери, сопровождающиеся основными потерями энергии:

- процесс абсорбции хладагента;
- процесс десорбции хладагента;
- процесс теплопередачи при охлаждении хладоносителя;

Преимуществом использования АБХМ в сочетании с когенерационной установкой является минимальное потребление электроэнергии (требуется только для работы насосов и регулирующих устройств).

Недостатком АБХМ является относительно низкая энергетическая эффективность – отношение подведенной тепловой энергии к полученному холоду колеблется в пределах 0.65-0.8 для одноступенчатых и 1-1.42 для двухступенчатых машин [7].

Сравнивая принципы действия двух систем тригенерации, можно сделать следующие выводы:

1. Применение ПКХМ позволяет получить широкий диапазон температур холода.
2. Системы с ПКХМ относительно безопасны для человека.
3. Системы с ПКХМ потребляют больше электричества, но производят больше тепла для потребителя.
4. Системы с ПКХМ более энергоэффективны, чем АБХМ.
5. Применение АБХМ может обеспечить потребность только в средне- и высокотемпературном холоде.
6. Системы с АБХМ используют опасные для человека хладагенты.
7. Системы с АБХМ потребляют больше тепла, но производят больше электричества для потребителя.
8. Системы с АБХМ менее энергоэффективны, чем ПКХМ.

В данной работе исследования проводились на когенерационной установке + ПКХМ.

На рисунке представлена схема энергетического баланса простейшей тригенерационной установки с использованием парокомпрессионной холодильной машины (ПКХМ) представлена на рисунке 2.2.

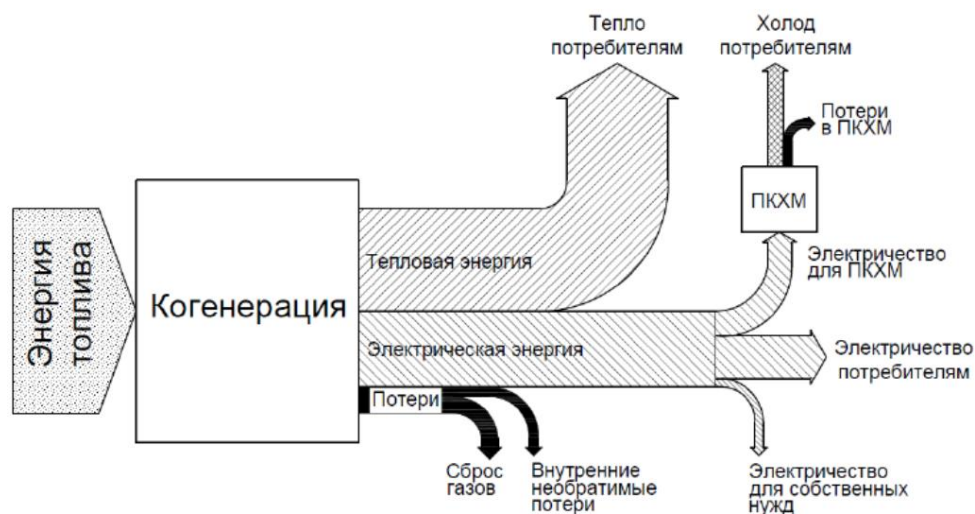


Рисунок 2.2 – Схема энергетического баланса системы тригенерации с использованием ПКХМ.

Приводом для электрогенератора когенерационной установки может быть газопоршневой ДВС, газотурбинная установка.

В случае если электрогенератором когенерационной установки служит газопоршневой ДВС, то находясь в рабочей зоне топки, газовое топливо, сгорая, выделяет тепловую энергию, которая преобразуется в механическую работу поршней. Поршни приводят в движение коленчатый вал, сопрягаемый с валом привода электрогенератора, вырабатывающего электроэнергию. Этот

процесс сопровождается внутренними необратимыми потерями, обусловленными работой сил трения в различных узлах газопоршневого ДВС и электрогенератора.

Если приводом электрогенератора когенерационной установки служит газотурбинная установка, то атмосферный воздух, пройдя через компрессор, смешивается с топливом. Сгорая, топливовоздушная смесь выделяет энергию, которая преобразуется в механическую энергию вращения лопаток турбины, установленные на валу ротора. Вращаясь, ротор турбины передает энергию на сопряженный с ним вал привода электрогенератора, вырабатывающего электроэнергию. Этот процесс сопровождается внутренними необратимыми потерями, обусловленными работой сил трения в различных узлах газотурбинной установки и электрогенератора.

Образовавшиеся в процессе горения топлива газы имеют высокую температуру, что позволяет эффективно их утилизировать. Эти газы подаются в теплообменные аппараты, где осуществляется передача энергии теплоносителю. Нагретый теплоноситель подается потребителю, а охлажденные газы выбрасываются в окружающую среду. Бросовые газы уносят с собой некоторое количество неутраченной энергии, что представляет собой определенные потери. Величина этих потерь определяется качеством и глубиной утилизации. Так же, процесс теплопередачи сопровождается некоторыми необратимыми внутренними потерями, которые определяются совершенством конструктивного исполнения и термодинамической эффективностью работы теплообменных аппаратов.

Часть полученного от электрогенератора электричества расходуется на работу парокомпрессионной холодильной машины (электродвигатель компрессора, электродвигатели вентиляторов конденсатора воздушного охлаждения (если применяется), насосы для прокачки хладоносителя и т.д.), другая часть электричества расходуется для работы различных узлов тригенерационной установки, требующих электроэнергии. Оставшаяся часть электроэнергии подается потребителям.

Главными достоинствами использования ПКХМ в сочетании с когенерационной установкой являются использование фреонов, которые дают возможность получения “среднетемпературного” холода. В то время как “АБХМ+когенерационная” установка способна обеспечить потребности в среднетемпературном холоде лишь при использовании водо-аммиачных установок, ограничивающих и сферу применения.

Главной особенностью парокомпрессионной установки по отношению к абсорбционной, является использование компрессора механического принципа действия. Данные компрессоры приходят в действие за счет

использования электродвигателя, который в свою очередь потребляет электрическую энергию, в отличие от абсорбционной машины.

2.3 Органический цикл Ренкина

2.3.1 Использование низкопотенциального тепла

Тригенерационные установки, работающие на органическом цикле Ренкина нашли большое применение в альтернативной энергетике. Применение схем тригенерационных установок на ОЦР позволяет повышать эффективность альтернативной энергетике в целом, что ведет к положительной динамике в области экологической безопасности возобновляемых способов получения энергии.

Характерной особенностью цикла ОЦР в отличие от классического цикла Ренкина, является способность рабочего тела эффективно работать при низких температурах (150-300 °С и менее). В настоящее время преобладают установки работающие на докритических параметрах рабочего тела.

Источник низкопотенциального тепла должен обладать следующими свойствами: быть возобновляемым, иметь стабильную положительную температуру, а так же не быть коррозионно активным.

Так же низкопотенциальные источники тепла могут быть получены в широком спектре различных технологических процессов, данное тепло чаще всего не используется с пользой, а просто выбрасывается в атмосферу. Сбросное тепло обладает температурой выше на 10-30 °С окружающей среды, по этой причине затруднительность его использовать обычным путем. Данные источники низкопотенциального тепла могут быть полечены следующих установках

- промышленные предприятия (теплота сжатия газов в компрессорах, теплота продуктов сгорания различного рода топлива и т.д.);
- системы водяного охлаждения, стоки промышленных предприятий и очистных сооружений (теплота жидкости);
- биогазовые установки, газогенераторные установки, пиролизеры и т.д. (теплота сгорания топлива, сгенерированного в этих установках);
- тепловые движители транспортных средств (теплота выхлопных газов), а также источники естественного происхождения:
- геотермальные источники (энергия Земли);

2.3.2 Схема органического цикла Ренкина

Тригенерационные установки, работающие на органическом цикле Ренкина имеют ряд преимуществ по сравнению с классическим паротурбинным циклом. В экономическом плане установки, работающие на ОЦР обойдутся в среднем 750-900 дол./кВт, в то время как стоимость паротурбинной установки с соизмеримой мощностью будет стоить от 1100 дол./кВт. Помимо этого установки работающие на ОЦР более экологичны и имеют более низкие температуры, при которых установка способна успешно работать.

На рисунке 2.3. представлена схема органического цикла Ренкина на перегретом паре.

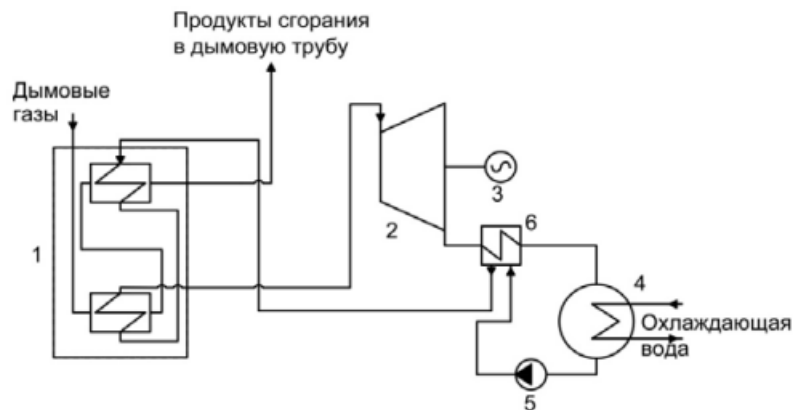


Рисунок 2.3 Схема органического цикла Ренкина на перегретом паре:

- 1 – котел-утилизатор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос;
6 – теплообменный аппарат.

Принцип работы исследуемой схемы: из конденсатора жидкое низкокипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее поступает в турбину, где совершает механическую работу вращения вала, связанного муфтой с генератором электрического тока. После совершения работы в турбине НКРТ, будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

На рисунке 2.4. представлена схема органического цикла Ренкина на перегретом паре с промежуточным перегревом рабочего тела.

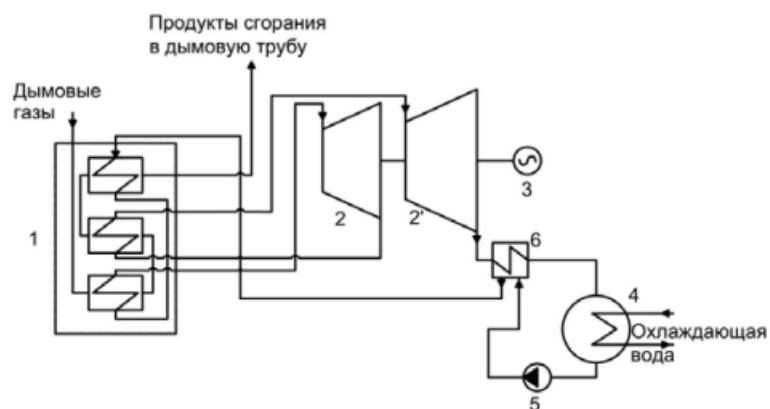


Рисунок 2.4 Схема органического цикла Ренкина с промежуточным перегревом рабочего тела:

1 – котел-утилизатор; 2 – часть высокого давления турбины; 2' – часть низкого давления турбины; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Принцип работы исследуемой схемы: из конденсатора жидкое низкокипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее поступает в турбину, пройдя часть высокого давления (ЧВД) турбины, снова попадает в котел-утилизатор, где повторно перегревается и поступает в часть низкого давления (ЧНД) турбины, где совершает механическую работу вращения вала, связанного муфтой с генератором электрического тока. После совершения работы в турбине НКРТ, будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

ГЛАВА 3 ВЫБОР, ОБОСНОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТРИГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ГТУ

3.1 Экологическое обоснование применения озонобезопасных хладагентов

На данный момент все больше растет интерес к тригенерационным установкам и соответственно поиску наиболее безопасных и эффективных рабочих тел для них. Они из них – природные хладагенты, одним из них является диоксид углерода.

В настоящее время остро стоит проблема по замене озоноразрушающих хладагентов на озонобезопасные, в связи с выбросами CFC (хлорфторуглеродов), в том числе CFC-хладагентов и разрушением ими озонового слоя. Это дало толчок к созданию третьего поколения хладагентов, нацеленных на защиту озона стратосферы. В связи с этим были приняты следующие документы Венская конвенция (1985г.) и Монреальский протокол (1987 г.), которые призывают к отказу от озоноразрушающих веществ (ODS).

По результатам принятия данных документов объектом ограничения стали в первую очередь хлорфторуглероды (ХФУ) (хладагенты с высокой озоноразрушающей способностью), к которым относятся такие хладагенты как R11, R12, R13, R113, R114, R115, R502, R503, R12B1, R13B1 (или по международному обозначению CFC11, CFC12, CFC13 и т. д.) и др. В переходный же период заменить гидрохлорфторуглероды (ГХФУ) R21, R22, R141b, R142b, R123, R124 (или по международному обозначению HCFC21, HCFC22, HCFC141b и т. д.) и др., в молекулах которых содержится водород. Для этих веществ характерно меньшее время существования в атмосфере по сравнению с ХФУ, и, как следствие, они оказывают меньшее влияние на разрушение озонового слоя. Ряд многокомпонентных рабочих тел, предлагаемых в качестве альтернативы ХФУ, содержат в своем составе ГХФУ, например, R22;

Наиболее безопасными являются хладагенты не содержащие в своей структуре атомов хлора (фторуглероды ФУ FC), гидрофторуглероды ГФУ (HFC), углеводороды (HC) и др.), считаются полностью озонобезопасными. Таковыми являются хладагенты R134, R134a, R152a, R143a, R125, R32, R23, R218, R116, RC318, R410a, R407c, R290, R600, R600a, R717 и др.

Для анализа экологической целесообразности применения хладагентов используют следующие параметры: потенциал разрушения озона ООР (Ozon Depletion Potential); потенциал глобального потепления (парникового

эффекта)GWP (Global Warming Potential) или HGWP (Halocarbon Global Warming Potential) [10].

Потенциал разрушения озона ODP определяется наличием атомов хлора в молекуле хладагента и принят за единицу для R11 и R12. Хлорсодержащие хладагенты, достигая стратосферы, разлагаются там ультрафиолетовыми лучами и высвобождают хлор, быстро реагирующий с озоном, разрушая таким образом озоновый слой. Для хладагентов группы ХФУ потенциал разрушения озона ODP > или = 1, для ГХФУ ODP < 0,1, а для ГФУ ODP = 0.

В таблице 3.1 представлено сравнение хладагентов по параметрам ODP и GWP (HGWP) [11].

Таблица 3.1 – Сравнение хладагентов по параметрам ODP и GWP (HGWP)

Хладагент	R22	R407c	R410a	R12	R134a	R502	R404a
Потенциал разрушения озона ODP	0,05	0	0	1	0	0,18/ 0,23	0
Потенциал глобального потепления за 100 лет GWP	1700	1525	1725	8500	1300	4510/ 5590	3260
Потенциал глобального потепления HGWP	0,34	0,38	0,45	-	-	-	-

Потенциал глобального потепления GWP принят за единицу для диоксида углерода (CO₂) с временным горизонтом 100 лет, а потенциал HGWP подсчитывают относительно значения этого параметра для R11, также принятого за единицу.

3.2. Техническое обоснование применения диоксида углерода

Основными преимуществами применения CO₂ в холодильной технике по сравнению с ГФУ-хладагентами являются их экологичность, низкая стоимость, безопасность и его легальность согласно основным документам.

Так же следует отметить некоторые особенности данного хладагента. В отличие от традиционных хладагентов CO₂ обладает высокой областью рабочих давлений, имеет низкую критическую точку и высокую тройную точку. Критическая точка CO₂ находится при (t=31,1 °C; p=73,6 бар), что

следует учитывать как при проектирование тригенерационных установок, так и при их эксплуатации. Тройная точка CO_2 ($t = -56,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 5,2 \text{ бар}$) на практике связана с выпадением “сухого льда”, что так же следует учитывать при эксплуатации и установке.

В промышленности установки работающие на CO_2 используются на докритических параметрах, а в коммерческих популярность имеют установки как докритическими, так и сверхкритические параметры рабочего тела. Рабочее давление в установках обычно принимается от 40 до 140 бар.

При применении CO_2 как хладагента для небольших систем непосредственного охлаждения годовое энергопотребление в умеренном климате обычно меньше, чем при использовании фреонов (ГФУ) [3]. Энергоэффективность стандартной системы на CO_2 выше, чем системы на ГФУ при наружной температуре ниже $22 \text{ }^\circ\text{C}$, почти эквивалентна ей при температуре от 22 до $26 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже при более высокой температуре. Техническая осуществимость таких систем проверена более чем на 4000 работающих системах в Европе, еще на 1000 – в Азии и Австралии и более чем на 100 – в Северной Америке (на 2014 г.). Эффективность систем на CO_2 может быть повышена внедрением таких новых разработок, как эжекторные системы и расширительные машины (детандерные), причем настолько, что данные системы будут более эффективными даже в жарком климате [3].

Так же диоксид углерода способен использоваться как самостоятельный хладагент. Компрессорно-конденсаторные агрегаты в этом случае работают с большей эффективностью, чем агрегаты на фреонах в холодном и умеренном климате. Все три варианта, т. е. системы непосредственного охлаждения на углеводородах, системы с промежуточным холодоносителем и пароконденсационные системы на CO_2 , технически осуществимы, что подтверждается успешной их реализацией в промышленности [2, 3].

Таким образом на основании технических, экологических и энергетических факторов использование CO_2 в качестве рабочего тела установок вырабатывающих тепловую, электрическую энергии и холод.

ГЛАВА 4 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРИГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ГТУ НА ДОКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

4.1 Схема тригенерационной турбодетандерной установки с ГТУ и с производством жидкой и газообразной углекислоты

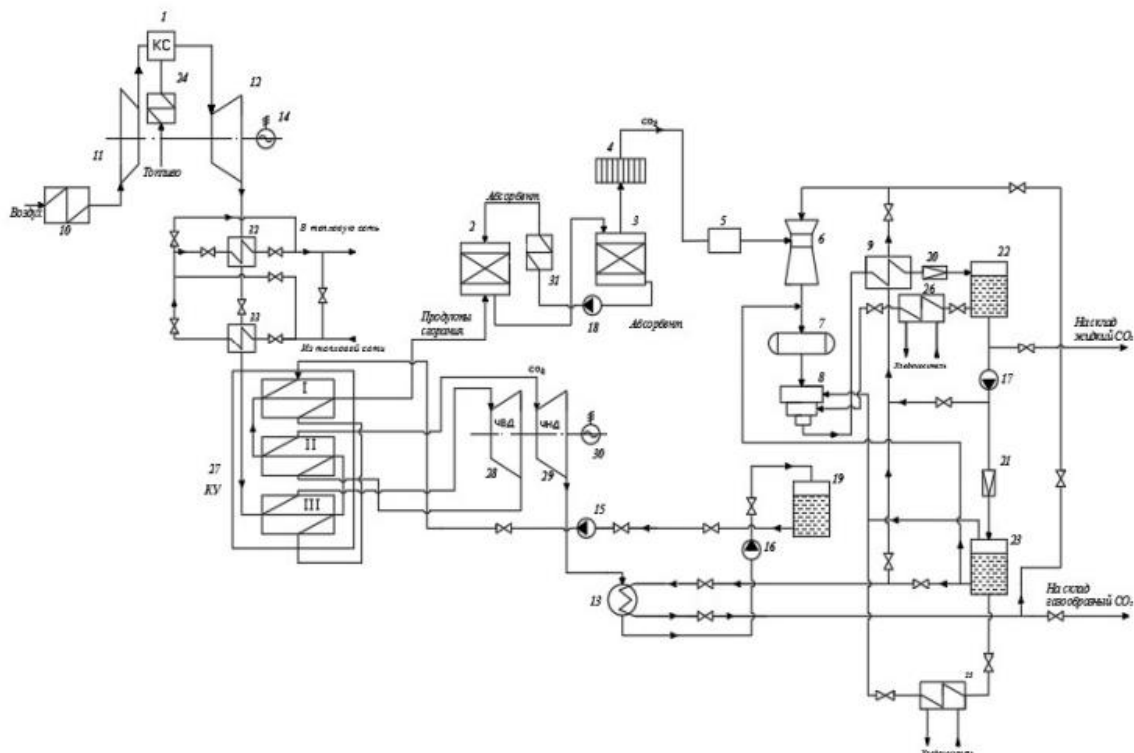


Рисунок 4.1 Схема тригенерационной турбодетандерной установки с ГТУ и с производством жидкой и газообразной углекислоты:

1 – камера сгорания; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – воздухоподогреватель; 11 – турбокомпрессор; 12 – газовая турбина; 13 – конденсатор-испаритель; 14, 30 – электрогенератор; 15–18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 31–33 – теплообменник; 25, 26 – испаритель; 27 – котел утилизатор; 28, 29 – ЧВД и ЧНД турбины соответственно

В теплообменник 24 (рис. 3) подается топливо, где оно впоследствии нагревается и подается в камеру сгорания (КС) 1, туда же через теплообменник 10 и турбокомпрессор 11 подается воздух. В КС 1 топливовоздушная смесь сгорает и образует дымовые газы. Дымовые газы поступают в газовую турбину 12. Электрогенератор 14 преобразует механическую энергию вращения турбины в электроэнергию. Отработанные дымовые газы из ГТУ поступают в сетевые подогреватели 32, 33, затем в котел утилизатор 27 на ступень III, где они подогревают газообразный CO₂, направляющийся на

части высокого давления (ЧВД) турбины 28. После ступени III дымовые газы направляются в ступень II, где подогревают газообразный CO₂, направляющийся на части низкого давления (ЧНД) турбины 29. Электрогенератор 30 преобразует механическую энергию вращения вала турбины в электроэнергию.

После котла утилизатора продукты сгорания поступают последовательно в абсорбер 2 с поглощением газообразной углекислоты из продуктов сгорания и десорбер 3, где осуществляется выделение из абсорбента CO₂. После десорбера углекислый газ поступает через брызгоотделитель 4 и осушитель 5 в инжектор 6, где инжектируется в линейный ресивер 7, при этом его давление повышается до давления всасывания в компрессоре первой ступени 8. После трехступенчатого компрессора 8 газообразный CO₂ направляется в конденсатор 9, охлаждается и поступает на первое дросселирование в дроссельное устройство 20, после которого температура и давление CO₂ снижаются, и далее – в сепаратор 22. Отделившаяся в сепараторе жидкая фаза CO₂ поступает на второе дросселирование в дроссельное устройство 21, где опять происходит снижение температуры и давления. Жидкий диоксид углерода из сепаратора 23 подается в конденсатор-испаритель 13 турбогенераторной установки, кипит, поглощая теплоту конденсации газообразного CO₂ после его расширения в ЧВД 28 и ЧНД 29. Образовавшийся в результате кипения CO₂ газ направляется в инжектор 6, инжектирует газообразный CO₂ после десорбера 3 и накапливается в линейном ресивере 7. Часть жидкой углекислоты после сепаратора 22 подается на конденсатор 9 для конденсации сжатой газообразной CO₂ после компрессора 8.

Из ресивера-накопителя 19 жидкий CO₂ подается насосом 15 последовательно в испаритель I котла утилизатора 27, где испаряется, после чего поступает в ступень III котла утилизатора 27, где парообразный CO₂ перегревается и отправляется на ЧВД турбины 28. После ЧВД CO₂ поступает в ступень II котла утилизатора 27, где осуществляется второй перегрев, после чего CO₂ поступает на ЧНД турбины 29. Затем CO₂ конденсируется в конденсаторе 13 и насосом 16 опять подается в ресивер-накопитель 19. Турбодетандерный контур (ЧВД 28 и ЧНД 29 – котел утилизатор 27 – конденсатор-испаритель 13 – насос 16 – ресивер-накопитель 19) может работать как на цикле с докритическими параметрами, так и на цикле с закритическими (транскритическими) параметрами. На схеме не показано охлаждение газообразного CO₂ после сжатия в первой и второй ступенях компрессора.

4.2 Термодинамический расчет тригенерационной турбодетандерной установки с ГТУ и с производством жидкой и газообразной углекислоты

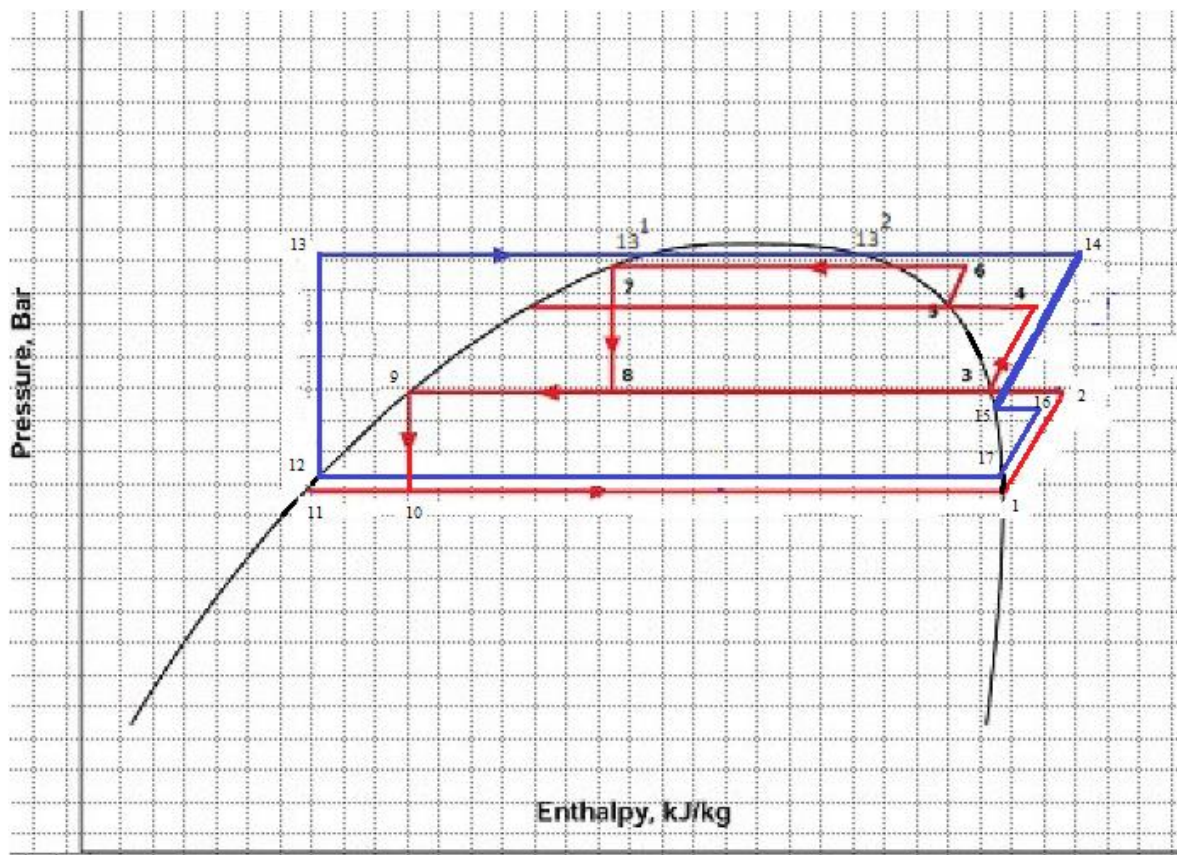


Рисунок 4.2 Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода с двукратным перегревом

Циклы состоят из следующих процессов: 12–13 – повышение давления жидкого CO_2 в насосе 16; 13–13¹ – нагрев жидкого CO_2 до температуры кипения в испарителе I; 13¹–13² – изобарно-изотермический процесс кипения CO_2 в испарителе I; 13–14 – перегрев газообразного CO_2 в пароперегревателе III котла утилизатора 27; 14–15 – адиабатное расширение газообразного CO_2 в ЧВД 28; 15–16 – второй перегрев газообразного CO_2 в ступени II котла утилизатора 27; 16–17 – адиабатное расширение газообразного CO_2 в ЧНД 29; 17–12 – изобарно-изотермический процесс конденсации диоксида углерода в конденсаторе-испарителе 13. Для холодильного цикла: процесс 1–2 – адиабатное сжатие газообразного CO_2 в компрессоре первой ступени; 2–3 – охлаждение CO_2 перед компрессором второй ступени; 3–4 – адиабатное сжатие CO_2 в компрессоре второй ступени; 4–5 – промежуточное охлаждение CO_2 перед компрессором третьей ступени; 5–6 – адиабатное сжатие CO_2 в компрессоре третьей ступени; 6–7 – охлаждение и конденсация газообразного CO_2 в конденсаторе 9; 7–8 – первое адиабатное дросселирование жидкого диоксида углерода в дросселе 20 в

сепаратор 22; 9–10 – второе адиабатное дросселирование CO₂ в дросселе 21 в сепаратор 23; 11–1 – кипение жидкого CO₂ в конденсаторе-испарителе 13.

Исходные данные и термодинамические параметры исследуемых циклов

Газотурбинная установка	
Степень повышения давления, ед	4
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	32500
Допустимая температура на входе в газовую турбину, °С	1025
Температура выхлопов газа, °С	283
Органический цикл Ренкина	
Температура дымовых газов на входе в котел-утилизатор, °С	258
Максимально допустимая температура низкокипящего рабочего тела перед турбиной, °С	115
Максимально допустимая температура низкокипящего рабочего тела промежуточного перегрева, °С	115
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	2

Термодинамический расчет

Количество тепла, полезно используемое в КУ:

$$Q_{\text{переданное хладагенту}} = Q_{\text{ку}} \cdot \eta_{\text{ку}}, \text{ кВт}, \quad (4.1)$$

где $\eta_{\text{ку}}$ – КПД КУ, 84%.

Расход хладагента через турбордетандер:

$$G_2 = \frac{Q_{\text{переданное хладагенту}}}{(h_{14} - h_{13}) + (h_{16} - h_{15})}, \text{ кг/с}, \quad (4.2)$$

где h_{14} – энтальпия рабочего тела в начале процесса адиабатного расширения в ЧВД турбине, кДж/кг;

h_{15} – энтальпия рабочего тела в конце процесса адиабатного расширения в ЧВД турбине, кДж/кг;

h_{16} – энтальпия рабочего тела в начале процесса адиабатного расширения в ЧНД турбине, кДж/кг;

h_{17} – энтальпия рабочего тела на выходе рабочего тела из питательного насоса, кДж/кг.

Удельная работа сжатия газообразного CO_2 в трехступенчатом компрессоре:

$$l_s^k = (h_2 - h_1) + (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6). \quad (4.3)$$

Удельная работа расширения газообразного CO_2 в турбодетандере:

$$l_{s,2}^d = (h_{14} - h_{15}) + (h_{16} - h_{17}). \quad (4.4)$$

Теоретическая (адиабатная) мощность сжатия CO_2 в компрессоре:

$$N_t^k = G_1 \cdot l_s^k. \quad (4.5)$$

Индикаторная мощность, потребляемая компрессором:

$$N_i^k = N_t^k / \eta_i = G_1 \cdot l_s^k / \eta_i \quad (4.6)$$

где η_i - индикаторный КПД компрессора, 80%

Эффективная мощность (на валу) компрессора:

$$N_B^k = N_i^k / \eta_M = G_1 \cdot l_s^k / \eta_i \eta_M. \quad (4.7)$$

где η_M - механический КПД компрессора, учитывающий трение, 87%

Электрическая мощность, потребляемая из сети компрессором:

$$N_{\text{э},2}^k = N_{\text{в}}^k / \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}} = G_1 \cdot l_{\text{с},2}^k / \eta_i \eta_{\text{м}} \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}}. \quad (4.8)$$

где $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи, 92%; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД электродвигателя компрессора 83%.

Электрическая мощность, полученная в генераторе турбодетандера:

$$N_{\text{э},2}^k = N_{\text{в}}^k / \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}} = G_2 \cdot l_{\text{с},2}^k / \eta_i \eta_{\text{м}} \eta_{\text{п}} \eta_{\text{дв}}. \quad (4.9)$$

где G_2 - действительный расход через турбодетандер CO_2 ; $\eta_{\text{г}}$ - КПД генератора, 82%; $\eta_{\text{м}}^d$ - то же механический турбодетандера, 80%.

Электроэнергия, потребляемая насосом:

$$N_{\text{э.н.1}} = \frac{(h_{13} - h_{12}) \cdot G_1}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{эд}}}, \text{ кВт}, \quad (4.10)$$

где $\eta_{\text{м}}$ – механический КПД, 80%;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи, 90% ;

$\eta_{\text{эд}}$ – КПД генератора, 83% .

Удельная массовая холодопроизводительность испарителя (25)

$$q_{01} = h_9 - h_3. \quad (4.11)$$

Удельная массовая холодопроизводительность испарителя (26)

$$q_{02} = h_{11} - h_1. \quad (4.13)$$

Эксергетический КПД установки:

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ввых}}}{\sum E_{\text{ввх}}} = \frac{E_{\text{тепл}} + E_{\text{эл}}^{\text{ТД}} + E_{\text{эл}}^{\text{ГТУ}} + E_{\text{хол}}}{E_{\text{вт.тг}} + E_{\text{т.э}}^{\text{ТД}} + E_{\text{т.э}}^{\text{ГТУ}} + E_{\text{хл}}}. \quad (4.14)$$

Входящими потоками эксергии для установки (рис. 3) будут: поток эксергии в ГТУ $E_{Т,Э}^{ГТУ}$; поток эксергии в теплообменник теплоснабжения $E_{Т,Т}$; поток эксергии в турбодетандерный блок $E_{Т,Э}^{ТД}$; потоки эксергии в испарители $E_{хл}$.

Выходящими потоками эксергии для тригенерационной установки (рис. 3) будут: эксергия, полученная в теплообменниках 32, 33 $E_{теп}$; эксергия, полученная в турбодетандере и в ГТУ $E_{эл}^{ТД}$, $E_{эл}^{ГТУ}$; эксергии, выходящие из испарителей 25 и 26 $E_{хол}$.

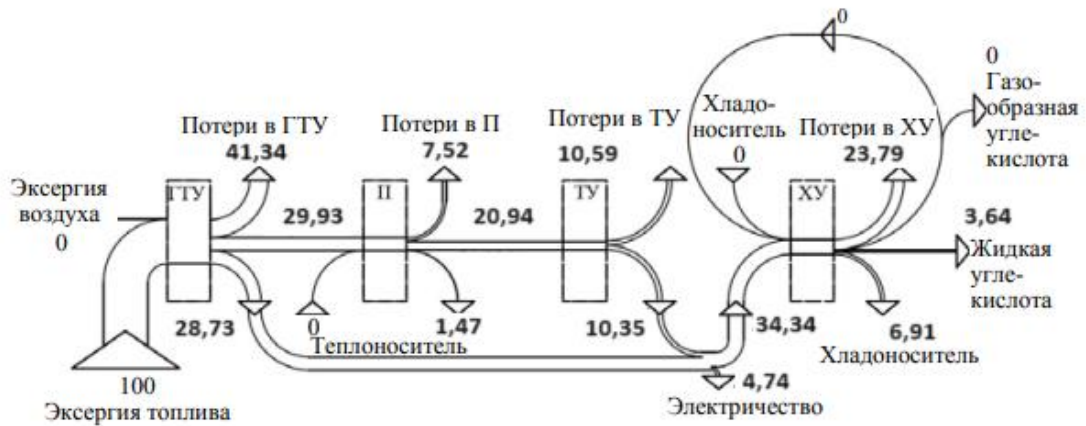


Рисунок 4.3 Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с установкой по производству углекислота

Результаты технико-экономического расчета представлены в таблице 4.2

Таблица 4.1 Результаты термодинамического расчета

Параметр	Тригенерационная установка
Количество теплоты Q, поступающей в котел-утилизатор, МВт.	40
Рабочее тело	CO ₂
Количество тепла, полезно используемое в КУ, кВт.	33600
Расход хладагента через турбодетандер, кг/с	81,51
Удельная работа сжатия газообразного CO ₂ в трехступенчатом компрессоре, кДж/кг.	52
Удельная работа расширения газообразного CO ₂ в турбодетандере, кДж/кг.	52,8
Теоретическая (адиабатная) мощность сжатия CO ₂ в компрессоре, кВт.	2080
Индикаторная мощность, потребляемая компрессором, кВт.	2600

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	Тригенерационная установка
Эффективная мощность (на валу) компрессора, кВт.	2988,5
Электрическая мощность, потребляемая из сети компрессором, кВт.	3913,7
Электрическая мощность, полученная в генераторе турбодетандера	8534,22
Электрическая мощность, потребляемая насосом из сети, кВт	1363,9
Эксергетический КПД установки	37,75
Удельная массовая холодопроизводительность испарителя (25), кДж/кг.	207
Удельная массовая холодопроизводительность испарителя (26), кДж/кг.	126

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской работе рассмотрены схемы тригенерационных турбодетандерных установок.

1) Приведены характеристики хладагента, применяемого в данной работе.

2) Рассмотрен хладагент CO_2 . Основными преимуществами применения CO_2 в холодильной технике по сравнению с ГФУ-хладагентами являются их экологичность, низкая стоимость, безопасность и его легальность согласно основным документам.

3) Рассматриваемая в данной работе тригенерационная установка представляет собой органический цикл Ренкина, ГТУ, котел утилизатор и холодильную машину для производства жидкой углекислоты.

Тригенерация позволяет значительно экономить топливо, представляет собой одну из лучших технологий, доступных для сокращения выбросов парниковых газов и других загрязнений окружающей среды. Несмотря на большую стоимость оборудования, экономический и экологический эффект от внедрения тригенерационного комплекса очень велик, но это достигается при грамотном комбинировании оборудования этого комплекса.

По полученным результатам можно сделать вывод:

1. Разработана схема тригенерационной установки на диоксиде углерода с использованием вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания или дымовых газов. Представлен цикл работы тригенерационной установки на докритических параметрах с производством жидкой и газообразной углекислоты. Холод, произведенный на тригенерационной установке, может быть использован в летний период при холодоснабжении систем вентиляции и кондиционирования воздуха промышленных и общественных зданий и сооружений.

2. Приведены методика термодинамического расчета цикла и его эксергетический анализ. Эксергетический КПД тригенерационной установки для производства тепловой, электрической энергии и холода превосходит аналогичный показатель традиционной когенерационной установки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экономическая эффективность утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов посредством установки турбины на низкокипящем рабочем теле / А. Л. Шубенко [и др.] // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 6. – С. 12–22.

2. В.С. Агабабов, Производство электроэнергии в детандер-генераторных агрегатах с одновременным отпуском теплоты различных температурных уровней (теплоты и холода) / В.С. Агабабов, А.В. Корягин, Е.В. Джураева // Рациональное использование природного газа в металлургии: Сб. тез. межд. науч.-практич. конф. (Москва, 13-14 ноября 2003г.). – М.:МИСИС, 2003.

3. Аршуков, А. И. Тригенерация энергии в турбодетандерных фреоновых установках с использованием вторичных энергетических ресурсов / А. И. Аршуков, П. А. Ковальчук; науч. рук. А. В. Овсянник // Беларусь в современном мире : материалы XI Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 17–18 мая 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. общества «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 258-261.

4. Кныш, О. А. Тригенерация энергии в турбодетандерных фреоновых установках с использованием высокотемпературных вторичных энергетических ресурсов / О. А. Кныш, В. А. Костюченко; науч. рук. А. В. Овсянник // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 197-200.

5. Ключинский, В. П. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого : научно-практический журнал. — 2022. — № 1. — С. 80—89.

6. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого: научно - практический журнал. - 2019. - № 2. - С. 41-51.

7. Чухлебов Л.Е., инженер ООО «Остров-Комплект» // Оценка целесообразности использования систем автономного энергообеспечения для предприятий молочной промышленности.

8. Повышение эффективности энергоснабжения ОАО "Интеграл" при использовании тригенерационных установок: дис. на соиск. академ. степ. маг.

техн. наук / Ю. С. Герасимчук; Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. - Гомель, 2017. - 54 с.

9. Калнинь И.М. Энергосберегающие технологии в энергетике / Калнинь И.М. // Экологические системы. – 2003. –№6 – С.14-17.

10. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. – М.: Колос, 2000. – 160 с.

11. Цветков О.Б. Озонобезопасные холодильные агенты. М.:ЦИНТИ. 1991. 25с.

12. Ротгольц Е.А. и др. Выбор хладагента и системы холодильной установки // Холодильная техника.- 2004.- №7. – с.2-7.

13. Цветков О.Б. Хладагенты. Тенденция развития // Холодильная техника.- 1997.- №8.- с.6-7.

14. Гафуров А.М., Гафуров Н.М. Методика выбора оптимального низкокипящего рабочего тела для использования в низкотемпературных средах // Международный научный журнал «Инновационная наука».- 2015.- №11.- с.31.

15. Особенности хладагента R 410A // Технический бюллетень №10.- 2005.- с.25.

16. Обзор хладагентов (Bitzer, издание 13). А-501-13.

17. Овсянник А.В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019;62(1):77-87.

18. Овсянник А.В., Ключинский В.П. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020;63(6):554-562.

19. Овсянник А.В., Ключинский В.П. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021;64(1):65-77.

20. Овсянник А.В., Ключинский В.П. Термодинамический анализ и оптимизация параметров вторичного перегрева в турбодетандерных установках на низкокипящих рабочих телах. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021;64(2):164-177.

21. Овсянник А.В., Ключинский В.П. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022;65(1):76-88.

22. Овсянник А.В., Ключинский В.П. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022;65(3):263-275.