

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра энергофизики**

НИЛОВ
Илья Витальевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА ДЛЯ
РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ**

Курсовая работа

Научный руководитель:
старший преподаватель
кафедры энергофизики БГУ
Ларькин А.В.

Минск, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ОРГАНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА	7
1.1 Органический цикл Ренкина	7
1.2 Применение органического цикла Ренкина	10
1.3 Сравнение с паровым циклом Ренкина	17
ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ РЕНКИНА	22
2.1 Выбор жидкости и оптимизация цикла	22
2.2 Термодинамическая оптимизация	25
2.3 Условия эксплуатации.....	26
2.4 Чувствительный тепловой источник	27
2.5 Источник тепла постоянной температуры	27
2.6 Моделирование характеристик органического цикла Ренкина	28
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	41

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

T	– температура
s	– удельная энтропия
p	– давление
h	– удельная энтальпия
x	– степень сухости пара
КПД	– коэффициент полезного действия
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ЦВД	– цилиндры высокого давления турбины
ЦНД	– цилиндры низкого давления турбины
ТЭЦ	– теплоэлектроцентраль
ОЦР	– органический цикл Ренкина
МГЭИК	– межправительственная группа экспертов по изменению климата
ПГП	– потенциал глобального потепления
ОРП	– озоноразрушающий потенциал

ВВЕДЕНИЕ

Доступ к дешевой энергии в больших количествах является одним из основополагающих условий развития человеческого потенциала. Такие учреждения, как Всемирный банк, Организация Объединенных Наций или Европейский союз рассматривают энергетику в качестве ключевого элемента, от которого зависит общий уровень внедрения и развития базовых элементов современной жизни, таких как освещение, доступ к питьевой воде, медицинские услуги, образование и связь.

Экономическое развитие ряда стран и конкретных их областей за последнее столетие обусловило большой рост потребления энергетических ресурсов. К сожалению, руководствуясь экономическими соображениями, этот рост был покрыт в основном за счет использования ископаемых видов топлива. Прочие факторы, такие как загрязнение атмосферы, ограниченность нефтяных ресурсов и их невосполнимость должным образом не учитывались.

В своем первом докладе в 2007 году МГЭИК сформулировала следующее заявление: *"большая часть наблюдаемого прироста среднемирового показателя температуры с середины 20-го столетия объясняется увеличением антропогенных концентраций парниковых газов."* В соответствии с различными сценариями, средняя температура земли должна повыситься от 2 до 4°C до конца века, с соответствующими драматическими последствиями, такими как повышение уровня моря, более высокий уровень засухи и опустынивания, повышение частоты возникновения стихийных бедствий, негативное воздействие на биоразнообразие и др.

84% выбросов парниковых газов приходится на энергетический сектор, главным образом в виде выбросов углекислого газа. Эти выбросы в основном приходятся на промышленные страны: десять первых лидеров промышленного производства генерируют две трети мировых выбросов. Не менее пугающими могут стать последствия промышленных скачков в менее развитых странах, вдобавок к уже произошедшим.

В наши дни все чаще совершаются попытки поиска точной корреляции между экономическим ростом и потреблением ресурсов. Чтобы предотвратить пагубное воздействие увеличивающегося потребления энергетических запасов развивающимися странами, предлагается введение политики контроля и помощи развития соответствующих технологий, а также повышения эффективности их использования.

Согласно исследованиям Европейского климатического фонда, выбросы парниковых газов могут быть сокращены на 80% к 2050 году. Для этого необходимо провести следующие изменения существующей энергетической системы:

1. Снижение энергоемкости зданий и промышленных объектов.
2. Переход от ископаемых видов топлива к электроэнергии, например, для транспорта или отопления помещений.
3. Увеличение чистой выработки электроэнергии за счет массового перехода на возобновляемые источники энергии, среди которых: 25% за счет энергии ветра, 19% - фотоэлектрические источники, 5% - солнечной энергии, 12% - биомассы, 2% - геотермальных источников, 12% - крупных гидростанций.
4. Усиление пропускной способности и модернизация энергосистемы и линий межрегиональной системы передачи электроэнергии.

Среди предлагаемых решений для достижения этих целей значительную роль может сыграть органический цикл Ренкина (ОЦР), в частности для снижения энергоемкости зданий и увеличения выработки энергии за счет возобновляемых источников по ряду причин:

1. Это благотворно скажется на энергоемкости производства и различных промышленных процессов, главным образом, путем утилизации отработанного и низкопотенциального тепла.
2. Это может снизить потребление строительных материалов, например, при использовании системы ТЭЦ.
3. ОЦР можно использовать для преобразования возобновляемых источников тепла в электричество. Главным образом, это геотермальные, биомассные и солнечные источники.
4. До абсолютного перехода на электрические транспортные средства его можно использовать для повышения эффективности ДВС и снижения потерь тепла при их работе, путем использования тепла выхлопных газов и охлаждающей жидкости.

Органический цикл Ренкина включает такие же компоненты, как и обычная паросиловая установка (котел, турбина, конденсатор и насос). Однако, рабочее тело представляет собой органический компонент, характеризующийся более низкой температурой кипения, чем вода и позволяющий получать полезную работу и, в частности электричество, от низкотемпературных источников тепла.

Успех и растущую популярность технологии ОЦР можно частично объяснить ее гибкостью: почти одинаковые системы, с некоторыми незначительными модификациями, могут использоваться в сочетании с разными источниками тепла. Более того, в отличие от обычных силовых циклов, данная технология позволяет обеспечить производство электроэнергии малого масштаба.

Таким образом, целью данной работы является моделирование органического цикла Ренкина для различных рабочих тел с анализом возможности применения установок ОЦР в области использования низкопотенциального тепла.

ГЛАВА 1

ОРГАНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА

1.1 Органический цикл Ренкина

Органический цикл Ренкина (ОЦР) ещё с 70-х годов является хорошо известной технологией. Большинство ОЦР были построены для утилизации отработавшего тепла и комбинированных производств тепла и электроэнергии, а также для получения энергии с альтернативных и низкотемпературных источников. Эта технология показывает ряд преимуществ по сравнению с традиционным паровым циклом Ренкина, делая производство более выгодным для электростанций с ограниченной мощностью (как правило, ниже 1 МВт), несмотря на более низкую эффективность. При этом, оптимизация ОЦР довольно сильно отличается от оптимизации парового цикла, главным образом из-за ограничения температуры теплового источника, а также еще и потому, что чаще не накладываются никакие ограничения на качество пара в конце процесса расширения.

Главное отличие органического цикла Ренкина (ОЦР) от традиционного цикла Ренкина заключается в рабочей жидкости: вместо воды используются органические компоненты. Типичные органические соединения это: хладагенты, углеродные соединения (бутан, пентан, гексан, и т.д.), кремниевое масло и др. Более низкая температура кипения этих веществ позволяет использовать их для работы с источниками намного меньшей температуры, чем в традиционных паровых циклах. А теплофизические свойства этих соединений, отличающиеся от свойств воды по ряду пунктов, имеют прямое практическое применение при проектировке устройств, работающих на ОЦР.

Органические циклы Ренкина были изучены теоретически и экспериментально еще в 70-е годы, и эффективность их применения в мелкомасштабных системах составляла около 10%. Экспериментальные исследования проводились с использованием лопастных турбин и хладагентов с высокой озоноразрушающей способностью, такими как R11 или R13.

В настоящее время известно более 200 электростанций на ОЦР, и это число растет огромными темпами.

Большинство установок применяются для обеспечения работы ТЭЦ на биомассе, геотермальных источниках или для использования остаточного

тепла. Однако впервые эта технология была применена в области геотермальной энергетики.

Схема органического цикла Ренкина несколько проще, чем традиционного цикла: одиночный теплообменный аппарат можно использовать чтобы выполнить три фазы: предварительный нагрев, испарение и перегрев. На рис. 1, 2 приведены две схемы, иллюстрирующие идею ОЦР. На рис. 1 изображена схема ОЦР без регенератора, на рис. 2 – схема ОЦР с регенератором.

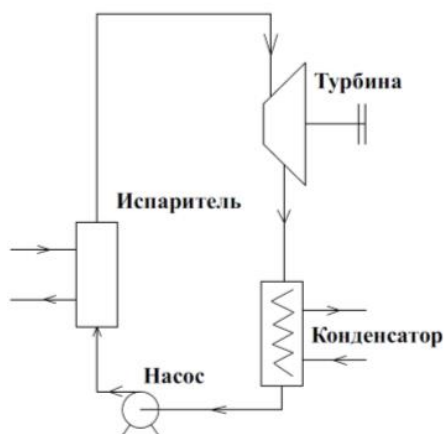


Рис. 1

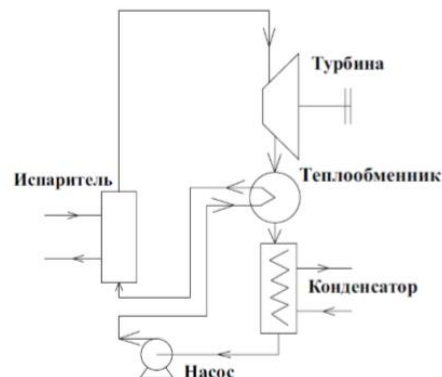


Рис.2

На рис. 1 насос закачивает рабочее тело в жидком состоянии в нагреватель, где при высоком давлении оно испаряется, далее пар попадает в турбину, в которой, расширяясь, совершает работу. Вал турбины вращается и приводит в действие электрогенератор. Отработанный пар охлаждается, и рабочее тело конденсируется. Далее вещество в жидком состоянии попадает в насос и цикл замыкается. В схеме на рис. 2 рабочее тело на выходе из турбины попадает в регенератор, где отдает часть тепловой энергии сжатой жидкости, которая направляется в нагреватель. Тепловая энергия может переноситься от источника теплоты к рабочему телу с использованием промежуточного теплоносителя, в качестве которого обычно применяется термальное масло. Использование промежуточного теплоносителя позволяет избежать локального перегрева рабочего тела. При наличии больших потоков энергии в ОЦР эффективнее использование турбины, если же потоки энергии невелики, предпочтительнее использовать поршневой детандер. Кроме того, поршневые детандеры более приспособлены для работы в условиях флуктуаций тепловых потоков от внешнего источника теплоты.

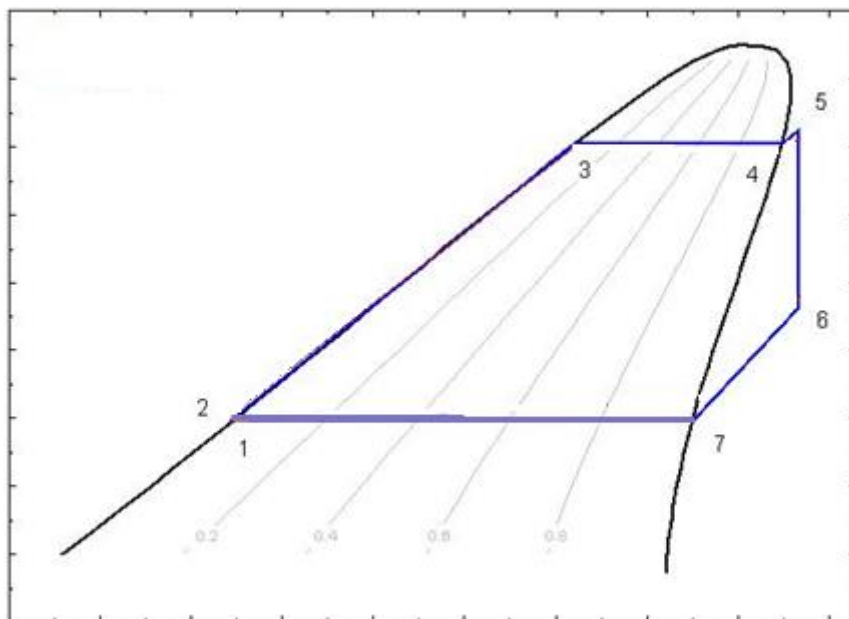


Рис. 3 – Температурно-энтальпийная диаграмма цикла ОЦР

ОЦР состоит из следующих процессов:

1-2 - насос передает рабочему телу энергию сжатия при неизменной энтропии (адиабатическое сжатие);

2-3 - жидкое рабочее тело после сжатия сначала подогревается в регенераторе, затем в парогенераторе, пока не достигнет состояния насыщенной жидкости.

3-4 - рабочее тело находится в состоянии насыщенной жидкости. В испаритель добавляется тепло – тело начинает испаряться в виде влажного пара, постепенно достигая состояния насыщенного пара. Этот процесс происходит при постоянной температуре и давлении;

4-5 - при добавлении дополнительного тепла в подогреватель при постоянном давлении достигается состояние перегретого пара;

5-6 - рабочее тело поступает в экспандер (турбину), где путем адиабатического расширения приводит в действие генератор, который преобразует механическую работу в электрическую энергию;

6-7 - после экспандера рабочее тело проходит через регенератор – теплообменник, где тепловая энергия используется в виде пара для подогрева охлажденного рабочего тела в жидком состоянии. Этот процесс происходит при постоянном давлении;

7-1 - рабочее тело поступает в конденсатор, где проходит изобарический и изотермический отвод тепла. Влажность повышается, тело переходит из состояния влажного пара в насыщенную жидкость.

1.2 Применение органического цикла ренкина

Биомасса и комбинированная теплоэнергетика

Биомасса широко доступна в ряде предприятий, таких как деревообрабатывающая или сельскохозяйственная промышленность. Такие виды топлива лучше всего использовать прямо на месте получения по двум причинам:

1. Плотность биомасс значительно ниже, по сравнению с ископаемыми топливами, что увеличивает расходы на транспортировку.
2. Спрос на тепло и электроэнергию обычно имеется на конкретном производстве, что делает установку на биомассе особенно подходящей в случае отключения или ненадежного подключения к сети на данном производстве.

Локальная генерация электроэнергии обуславливает использование мелкомасштабных электростанций (<1-2 МВт), что вынуждает отказаться от традиционных паровых циклов, которые не являются экономически эффективными в этом диапазоне мощности.

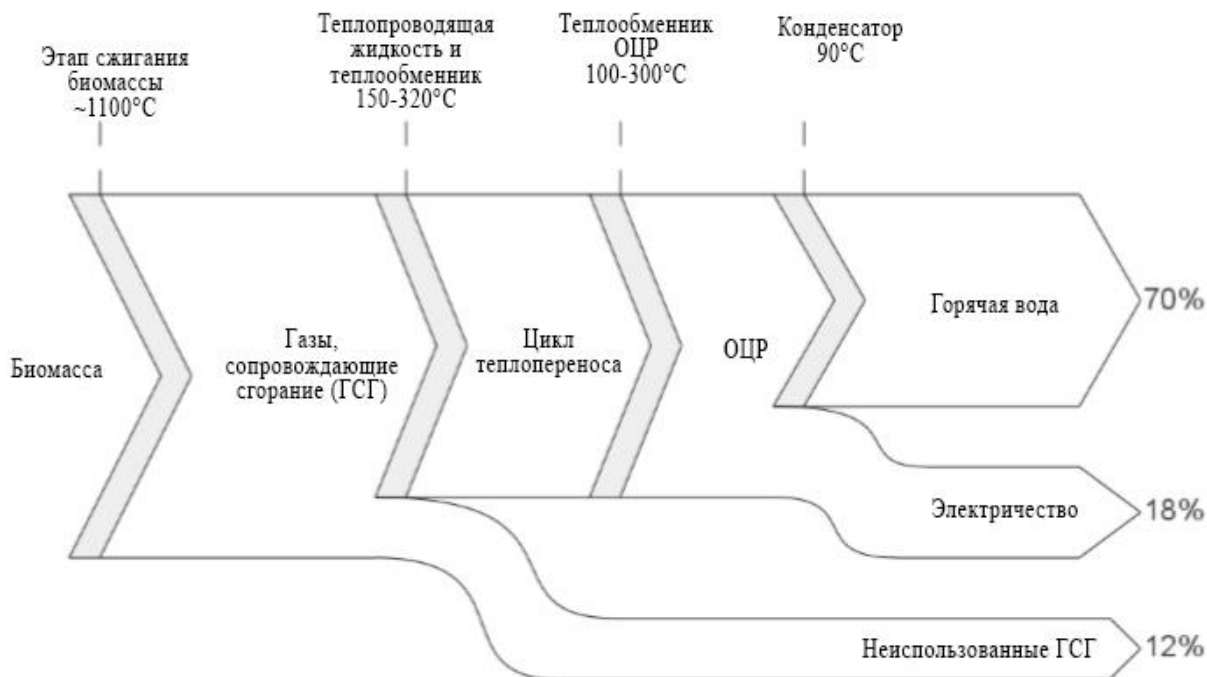


Рис. 4 Принцип работы ОЦР на биомассе.

Принцип работы такой системы описан на рис. 4 и рис. 5: тепло от сгорания передается к теплообменнику при температуре, изменяющейся от 150 до 320°C. теплоноситель (термальное масло) затем направляется в контур ОЦР для испарения рабочей жидкости при температуре чуть ниже 300°C. Затем испаренная жидкость расширяется, проходит через рекуператор для предварительного нагрева жидкости и затем конденсируется при температуре около 90°C. Конденсатор используется для производства горячей воды.

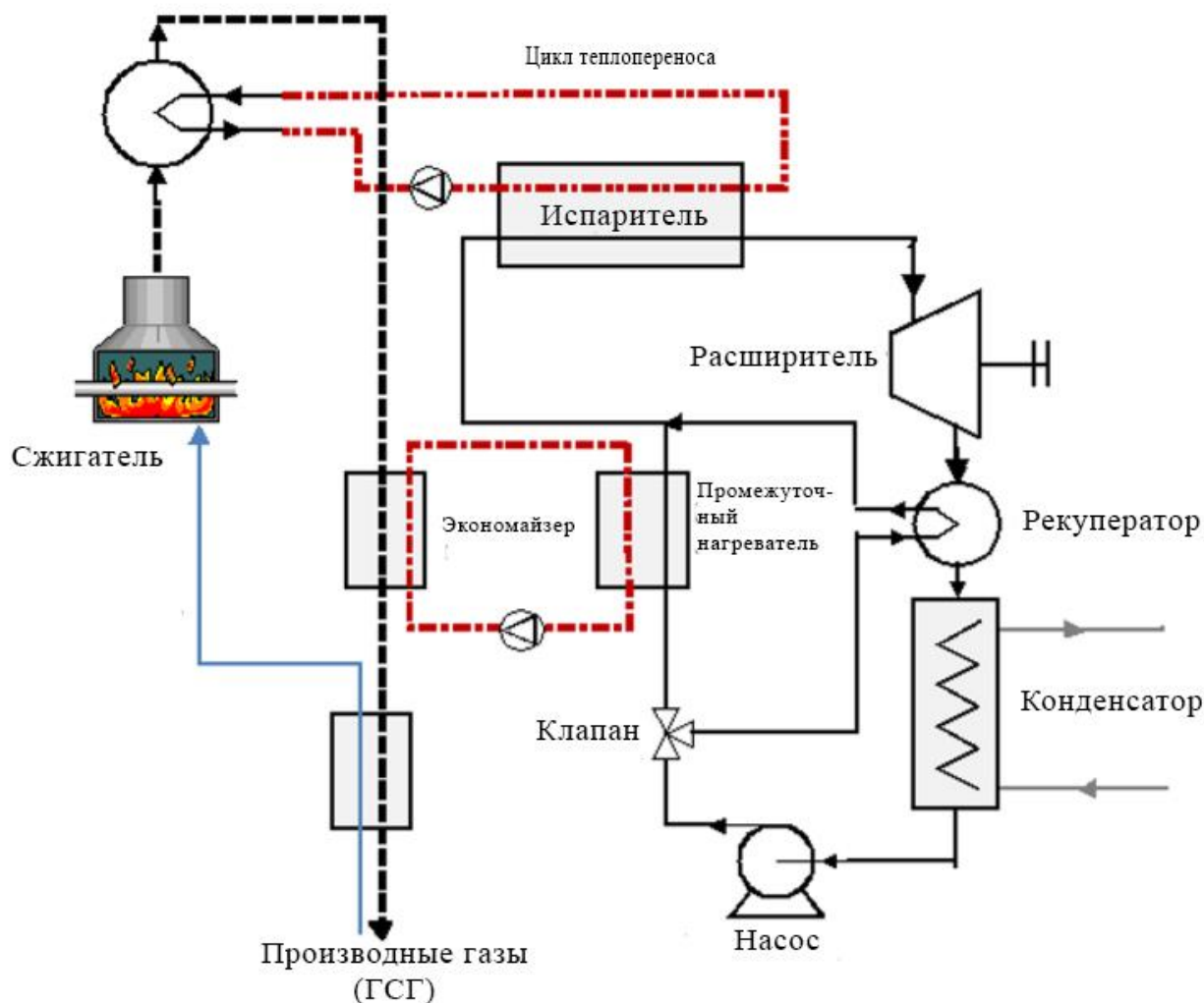


Рис. 5 Схема ОЦР для источника на биомассе

Эффективность выработки электроэнергии с помощью ОЦР ниже, чем у традиционных паровых циклов, и обычно снижается соразмерно самой установке. Это отчасти объясняется их более простой конструкцией и более низкой стоимостью. Для них потребность в тепле является фактор общей эффективности преобразования энергии на производстве. Эта потребность в тепле может быть удовлетворена промышленными процессами (такими как сушка древесины) или

хозяйственными (обогрев помещений). Нагрузку на установку можно регулировать либо за счет внутреннего спроса на тепло, либо за счет максимизации выработки электроэнергии. Последнее решение включает в себя растрату дополнительного тепла, но имеет преимущество в увеличении ежегодных часов работы при полной нагрузке.

Для примера на рис. 5, электрическая эффективность данной системы ТЭЦ довольно низка (18%), хотя общая эффективность системы составляет 88%, что значительно выше, чем у централизованных электростанций, в которых теряется большая часть остаточного тепла.

Для того чтобы уменьшить тепловые потери в образующихся при сгорании газах, эти газы необходимо охладить до минимально возможного значения, пока не будет достигнута точка росы. Для достижения этой цели используются два контура теплопередачи: высокотемпературный и низкотемпературный. Низкотемпературный контур устанавливается после высокотемпературного контура для снижения температуры выхода газов (Рис. 5).

Основной конкурирующей технологией получения электроэнергии из твердого биотоплива является газификация биомассы: в этой технологии биомасса превращается в синтетический газ, состоящий в основном из H_2 , CO , CO_2 , CH_4 . Этот синтетический газ обрабатывается и фильтруется для удаления твердых частиц, а затем сжигается в двигателе внутреннего сгорания или в газовой турбине.

При сравнении технологий и затрат ТЭЦ на биомассе с использованием ОРЦ, и с газификацией можно показать, что газификация дает более высокие инвестиционные затраты (около 75%) и более высокие эксплуатационные расходы (около 200%). С другой стороны, газификация показывает более высокое соотношение мощности к выработанному теплу, что делает ее более выгодной. Следует также отметить, что ОЦР - это хорошо зарекомендовавшая себя технология, в то время как фактически действующие газификационные установки являются в основном прототипами для демонстрационных целей.

Геотермальная энергия

Геотермальные источники тепла доступны в широком диапазоне температур, от нескольких десятков градусов до $300^\circ C$. фактическая технологическая нижняя граница выработки электроэнергии составляет около $80^\circ C$: ниже этой температуры эффективность преобразования становится слишком малой, а геотермальные установки неэкономичны. Таблица 1 отображает потенциал использования геотермальной энергии.

Температура	МВт тепловой энергии	МВт
65-90°C	147736	10462
90-120°C	75421	7503
120-150°C	22819	1268
150-225°C	42703	4745
225-350°C	66897	11150

Таблица 1. Потенциал геотермальной энергии

Однако, в данных системах для рекуперации тепла при приемлемой температуре скважины должны быть пробурены в грунте, как для добывающей, так и для возвратной скважины (Рис. 6). Горячий раствор откачивается из первой и впрыскивается во вторую при более низкой температуре. В зависимости от геологической конфигурации, скважины могут иметь глубину до нескольких тысяч метров, что требует нескольких месяцев непрерывной работы.

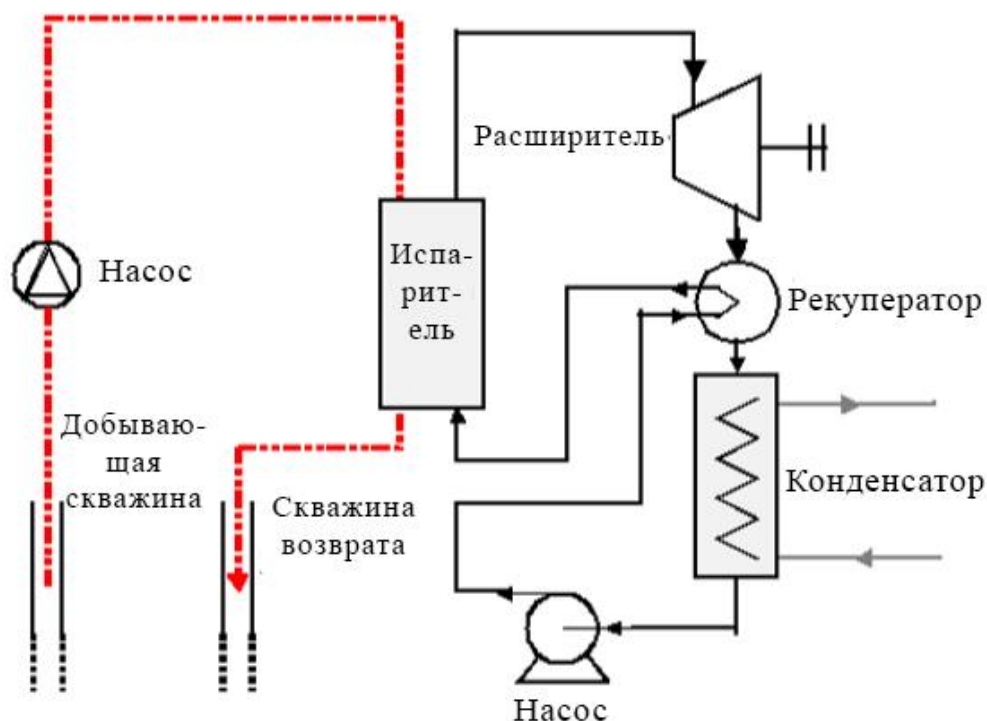


Рис.6 Схема ОЦР для геотермальной установки

Это приводит к увеличению инвестиционных затрат (до 70%) для использования геотермальной установки. Низкотемпературные геотермальные установки ОЦР также характеризуются относительно высоким вспомогательным потреблением: насосы потребляют от 30 до более чем 50% выходной мощности. Основным потребителем является насос, который должен обеспечивать циркуляцию раствора на больших расстояниях. Расход рабочей жидкости насосом также выше, чем в более высоких температурных циклах, поскольку соотношение между расходом насоса и выходной мощностью турбины (“коэффициент обратной работы”) увеличивается с уменьшением температуры испарения.

Более высокая температура ($>150^{\circ}\text{C}$) геотермальных источников тепла обеспечивают комбинированное производство тепла и электроэнергии: температура конденсации устанавливается на более высокую (например, 60°C), что позволяет использовать охлаждающую воду для теплоснабжения. В этом случае общая эффективность рекуперации энергии повышается, но за счет более низкого электрического КПД.

Солнечная энергетическая установка

Концентрирование солнечной энергии - это хорошо зарекомендовавшая себя технология: положение солнца отслеживается и лучи отражаются на коллектор, передавая тепло жидкости. Затем она передается в энергетический цикл, производящий электроэнергию. Три основные технологии концентрирования солнечного света - это параболическая тарелка, солнечная башня и параболический желоб.

Параболические тарелки и солнечные башни - это технологии, обеспечивающие более высокий коэффициент концентрации и более высокие температуры. Наиболее подходящими энергетическими циклами для этих технологий являются двигатель Стирлинга (малые установки) и паровой цикл, или даже комбинированный цикл для солнечных башен.

Параболические желоба работают при более низкой температуре (от 300°C до 400°C). Они в основном используются в традиционных паровых циклах Ренкина для производства электроэнергии. Однако, остается то же ограничение, что и в геотермальных электростанциях или электростанциях на биомассе: паровые циклы требуют высоких температур, высоких давлений и, следовательно, высокой установленной мощности, чтобы быть прибыльными.

Органические циклы Ренкина, по-видимому, являются перспективной технологией для снижения инвестиционных затрат в небольших масштабах: они могут работать при более низких температурах, а общая мощность может быть уменьшена до масштаба кВт.

Утилизация тепла на механическом оборудовании и промышленных процессах

Многие производства в промышленности сбрасывают тепло относительно низкой температуры. На крупномасштабных установках это тепло обычно не может быть повторно использовано на месте, или, например, для теплоснабжения. Поэтому оно выбрасывается в атмосферу. Это приводит к двум типам загрязнения:

1. Загрязняющие вещества (CO_2 , NO_x , SO_x , HC), содержащиеся в газах, могут создавать проблемы для здоровья или окружающей среды.
2. Сброс тепла может привести к изменению теплового фона, нарушить тепловое равновесие и оказать негативное влияние на биоразнообразие.

Рекуперация отработанного тепла может смягчить последствия этих двух типов загрязнения. Кроме того, она может генерировать электроэнергию, которая будет потребляться на месте или отправляться обратно в сеть. В такой системе отработанное тепло обычно рекуперировается промежуточным контуром теплопередачи и используется для испарения рабочей жидкости цикла ОЦР.

Некоторые отрасли промышленности обладают особенно высоким потенциалом рекуперации отработанного тепла. Среди них: цементная промышленность, в которой 40% тепла теряется в дымовых газах. Эти дымовые газы выделяются после предварительного нагревателя известняка или в охладителе клинкера, причем температура колеблется от 215 до 315 °C. Выбросы CO_2 в цементной промышленности составляют 5% от общего объема мировых выбросов CO_2 , причем половина из них приходится на сжигание ископаемого топлива в печах. К другим возможным отраслям относятся черная металлургия (например, 10% выбросов CO_2 в Китае), нефтеперерабатывающие заводы или химическая промышленность.

Несмотря на их высокий потенциал и низкую стоимость, органические циклы рекуперации отработанного тепла составляют лишь от 9 до 10% установленных установок ОЦР в мире, значительно уступая ТЭЦ на биомассе и геотермальным установкам.

Утилизация тепла в двигателях внутреннего сгорания

Двигатель внутреннего сгорания преобразует только около одной трети энергии топлива в механическую энергию. Например, для типичного 1,4-литрового двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием, тепловая эффективность которого колеблется от 15 до 32%, через радиатор выделяется 1,7-45 кВт (при температуре, близкой к 80-100°C) и 4,6 - 120 кВт через выхлопные газы (400-900°C). Система рекуперации тепла ОЦР является эффективным средством (по сравнению с другими технологиями, такими как термоэлектрическое и абсорбционное циклическое кондиционирование воздуха). Идея связывания цикла Ренкина с ДВС не является новой - первые технические разработки последовали за энергетическим кризисом 70-х годов. Например, компания Mack Trucks разработала и построила прототип такой системы, работающей на выхлопных газах 288-сильного автомобильного двигателя. Испытание на дороге протяженностью 450 км продемонстрировало техническую осуществимость системы и ее экономический интерес: было сообщено об уменьшении расхода топлива на 12,5%. Системы, разработанные сегодня, отличаются от систем 70-х годов из-за достижений в разработке расширительных устройств и более широкого выбора рабочих жидкостей. Несмотря на то, что в настоящее время системы цикла Ренкина находятся в стадии разработки, коммерческого решения, по-видимому, пока нет. Большинство разрабатываемых систем рекуперировать тепло из выхлопных газов и из контура охлаждения (радиатора). Для рекуперации отработанного тепла двигателя могут быть предложены различные архитектуры: система рекуперации тепла может быть системой прямого испарения или системой контура теплопередачи. В первом случае испаритель ОЦР непосредственно соединяется с выхлопными газами. Преимуществом такой конфигурации является высокая температура рекуперации тепла, что позволяет повысить эффективность цикла. Во втором случае термальное масло используется для рекуперации тепла выхлопных газов и затем направляется в испаритель. Эта система действует как буфер и уменьшает переходный характер источника тепла ОЦР, что упрощает управление им. Выход детандера может быть механическим или электрическим. При механической системе вал детандера непосредственно соединен с приводным ремнем двигателя с помощью муфты, чтобы избежать потерь мощности при слишком низкой выходной мощности цикла ОЦР. Основным недостатком такой конфигурации является навязанная скорость детандера: эта скорость является фиксированным соотношением оборотов двигателя и не обязательно является оптимальной скоростью для максимизации эффективности цикла. В случае производства электроэнергии расширитель соединяется с генератором переменного тока, используемым для заправки батарей или подачи вспомогательного оборудования, такого как кондиционер. Следует отметить, что нынешние автомобильные генераторы переменного тока демонстрируют довольно низкий

КПД (примерно от 50 до 60%), что снижает выходную мощность ОЦР. Что касается расширителя, то насос может быть непосредственно подключен к приводному ремню, к валу расширителя или к электрическому двигателю. В последнем случае расход рабочей жидкости можно регулировать независимо, что значительно облегчает регулирование такой системы. Управление системой является особенно сложным из-за переменного режима источника тепла. Однако оптимизация управления имеет решающее значение для повышения производительности системы. Как правило, необходимо контролировать как скорость насоса, так и скорость детандера, чтобы поддерживать необходимые условия (температуру, давление) на входе в детандер. Существует несколько перспективных разработок. Например, система, разработанная компанией Honda показала максимальную тепловую эффективность цикла в 13%. При скорости 100 км / ч это дает циклическую мощность 2,5 кВт (для двигателя мощностью 19,2 кВт) и представляет собой увеличение теплового КПД двигателя с 28,9% до 32,7%. Конкурирующей технологией, находящейся в стадии исследований и разработок, является термоэлектрический генератор (тэг), в основе которого лежит эффект Зеебека: его основными преимуществами являются существенно меньший вес, чем у системы ОЦР, и отсутствие движущихся частей. Основными недостатками являются стоимость материалов (они содержат редкоземельные элементы) и низкая достигнутая эффективность.

1.3 Сравнение с паровым циклом Ренкина

На диаграмме T-s на рис. 7 показаны кривые насыщения воды и нескольких типичных органических жидкостей в системах ОЦР. Можно выделить два основных отличия:

1. Наклон кривой насыщенного пара отрицателен для воды, в то время как гораздо более вертикален для органических жидкостей. Как следствие, ограничение качества пара в конце процесса расширения исчезает в цикле ОЦР, и нет необходимости перегревать пар перед входом в турбину.
2. Разница в энтропии между насыщенной жидкостью и насыщенным паром гораздо меньше для органических жидкостей. Это также подразумевает, что энтальпия испарения меньше. Поэтому при одинаковой тепловой мощности массовый расход органической рабочей жидкости должен быть значительно выше, чем у воды, что приводит к более высокому расходу ресурса насоса.

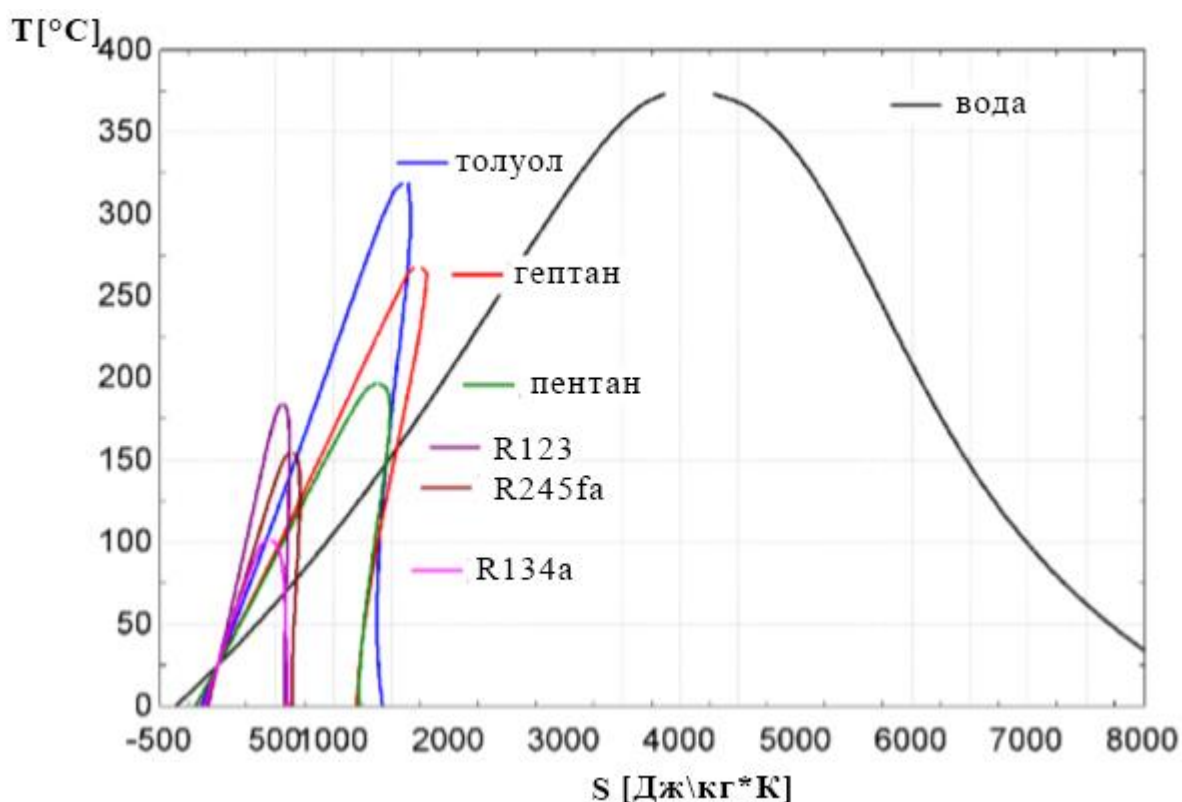


Рис.7 Некоторые кривые насыщения

Рассмотрим некоторые различия и сходства самих циклов и соответствующих установок чуть подробнее.

Перегрев. Как уже говорилось ранее, органические жидкости обычно остаются перегретыми в конце расширения. Поэтому в циклах ОЦР нет необходимости в перегреве, в отличие от паровых циклов. Отсутствие конденсата также снижает риск коррозии лопаток турбины и увеличивает срок ее службы до 30 лет вместо 15-20 для паровых турбин.

Размер компонентов. Размер компонентов очень сильно зависит от объемного расхода рабочей жидкости, поскольку перепады давления увеличиваются с квадратом скорости жидкости. Это приводит к необходимости увеличения диаметра теплообменников и диаметра трубы для уменьшения этой скорости. Размер турбины примерно пропорционален объемному расходу.

Температура на входе в турбину. В паровых циклах Ренкина из-за ограничения перегрева требуется температура выше 450 °C на входе в турбину, чтобы избежать образования капель во время расширения. Это приводит к более высоким тепловым напряжениям в котле и на лопатках турбины, а также к более высокой стоимости.

Расход насоса. Расход насоса пропорционален объемному расходу жидкости и разнице давлений между выходом и входом. Его можно оценить по коэффициенту обратной работы (BWR), который определяется как расход насоса, деленный на выходную мощность турбины. В паровом цикле Ренкина расход воды относительно низок, и BWR обычно составляет 0,4%. Для высокотемпературного ОЦР, использующего толуол, типичное значение составляет от 2 до 3%. Для низкотемпературного ОЦР, использующего HFC-134A, могут быть установлены значения выше 10%. Вообще говоря, чем ниже критическая температура, тем выше BWR.

Высокое давление. В паровом цикле давление около 60-70 бар и термические напряжения увеличивают сложность и стоимость парового котла. В ОЦР давление обычно не превышает 30 бар. Кроме того, рабочая жидкость испаряется не непосредственно в источнике тепла (например, в горелке на биомассе), а посредством контура теплопередачи. Это облегчает рекуперацию тепла, так как тепловое масло находится под давлением окружающей среды.

Давление конденсации. Чтобы избежать проникновения воздуха в цикл, рекомендуется использовать высокое давление конденсации. Это не относится к воде, чье давление конденсации обычно ниже абсолютного значения 100 мбар. Низкотемпературные органические жидкости, такие как HFC-245fa, HCFC-123 или HFC-134a, удовлетворяют этому требованию, поскольку они конденсируются при давлении выше атмосферного. Однако жидкости с более высокой критической температурой, такие как гексан или толуол, являются субатмосферными при температуре окружающей среды.

Характеристики жидкости. Вода, как рабочая жидкость, очень удобна по сравнению с органическими жидкостями. Ее основными преимуществами являются:

1. Экономическая эффективность и доступность
2. Нетоксичность
3. Невоспламеняемость
4. Невредна окружающей среде: низкий потенциал глобального потепления (GWP), нулевой озоноразрушающий потенциал (ODP).
5. Химическая стойкость: отсутствие ухудшения качества рабочей жидкости
6. Низкая вязкость: более низкие потери на трение, более высокие коэффициенты теплообмена

Однако паровые циклы, как правило, не являются полностью герметичными: вода теряется в результате утечек, дренажа или продувки котла. Поэтому система

водоподготовки должна быть интегрирована в силовую установку для подачи в цикл высокочистой деионизированной воды.

Конструкция турбины. В паровых циклах коэффициент давления и падение энтальпии в турбине очень высоки. Это предполагает использование турбин с несколькими ступенями расширения. В циклах ОЦР падение энтальпии значительно ниже, и обычно используются одноступенчатые или двухступенчатые турбины, что снижает их стоимость. Дополнительные эффекты низкого падения энтальпии включают более низкие скорости вращения и более низкую скорость наконечника. Более низкая скорость вращения позволяет осуществлять прямой привод электрогенератора без редуктора (это особенно выгодно для установок малой мощности), в то время как низкая скорость снижает нагрузку на лопатку турбины и облегчает их конструкцию.

Эффективность. Эффективность современных высокотемпературных органических циклов Ренкина не превышает 24%. Традиционные паровые циклы Ренкина показывают тепловую эффективность выше 30%, но с более сложной конструкцией цикла (с точки зрения количества компонентов или размера). Та же тенденция наблюдается и для низкотемпературных источников тепла: паровые циклы Ренкина остаются более эффективными, чем циклы ОЦР. Как следствие, цикл ОЦР более выгоден в диапазоне от низкой до средней мощности (как правило, менее нескольких МВт), поскольку мелкомасштабные электростанции не могут позволить себе иметь оператора на месте и требуют простых и легких в изготовлении компонентов и конструкции.

Преимущества ОЦР	Преимущества парового цикла
Нет перегрева	Характеристики рабочих тел
Более низкая входная температура турбины	Высокая эффективность
Компактность (более высокая плотность жидкости)	Сохранение ресурса насоса
Более низкое давление испарения	
Более высокое давление конденсации	
Отсутствие системы очистки воды	
Низкотемпературная рекуперация тепла	

Таблица 2. Сравнение парового и органического циклов Ренкина

Таким образом, для высоких диапазонов мощности обычно предпочтителен паровой цикл, за исключением низкотемпературных источников тепла.

ГЛАВА 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ РЕНКИНА

2.1 Выбор жидкости и оптимизация цикла

При выборе наиболее подходящей рабочей жидкости следует учитывать следующие рекомендации и показатели:

1. **Термодинамические характеристики:** КПД и выходная мощность должны быть как можно выше для заданных температур источника тепла и теплоотвода. Эта производительность зависит от ряда взаимосвязанных термодинамических свойств рабочего тела: критической точки, удельной теплоемкости, плотности и др. Довольно трудно определить оптимальные параметры для каждого конкретного термодинамического свойства независимо друг от друга. Решение заключается в моделировании цикла с помощью термодинамической модели и сравнении жидкостей с точки зрения эффективности цикла и выходной мощности.
2. **Положительная или изэнтропийная кривая насыщения паром.** Как уже было описано, в случае воды отрицательная кривая насыщения паром ("влажная" жидкость) приводит к появлению капель в конце расширения. Поэтому пар должен быть перегрет на входе в турбину, чтобы избежать повреждения турбины. В случае положительной кривой насыщения паром ("сухая" жидкость) для повышения эффективности цикла можно использовать рекуператор.
3. **Высокая плотность пара:** этот параметр имеет ключевое значение, особенно для жидкостей с очень низким давлением конденсации (например, кремниевые масла). Низкая плотность приводит к более высокому объемному расходу: перепады давления в теплообменниках увеличиваются, и размер детандера должен быть увеличен. Это оказывает незначительное влияние на стоимость системы.
4. **Низкая вязкость:** низкая вязкость как в жидкой, так и в паровой фазах необходима для поддержания высоких коэффициентов теплопередачи и низких потерь на трение в теплообменниках.
5. **Высокая проводимость** необходима для получения высокого коэффициента теплопередачи в теплообменниках.

Физические свойства						Характеристики опасности для окружающей среды				
Параметр	тело	Молярн. Масса (кг/кмоль)	Ткр (°C)	Ркр (МПа)	Тип	ПГП	ОРП	Токсичность	Воспламеняемость	Вызывает коррозию
1	Бутан	58,122	151,9	3,79	С	3	0	Нет	Да	Нет
2	Изо- бутан	58,122	134,6	3,62	С	3	0	Нет	Да	Нет
3	Аммоний	17,03	132,2	11,33	В	0	0	Да	Нет	Да
4	R11	137,37	197,9	4,40	И	4000	1	Нет	Нет	Нет
5	R141b	116,95	204,3	4,21	И	600	0,11	Да	Нет	Нет
6	R152a	66,051	113,2	4,51	В	140	0	Нет	Да	Нет
7	R142b	100,5	137,1	4,05	И	1800	0,065	Да	Да	Нет
8	R134a	102,03	101,0	4,05	В	1300	0	Нет	Нет	Нет
9	Этанол	46,068	240,7	6,14	В	-	-	Нет	Да	Нет
10	R113	187,38	214,0	3,39	С	1	1	Нет	Нет	Нет
11	Изо- пентан	72,149	187,2	3,37	С	0	0	Да	Да	Нет
12	R114	170,92	145,6	3,25	С	1	1	Нет	Нет	Нет

Таблица 3. Свойства органических рабочих тел

6. **Приемлемое давление испарения:** как уже говорилось в случае с водой, высокие давления обычно приводят к более высоким инвестиционным затратам и повышению сложности установки.
7. **Положительное давление конденсации:** данное давление должно быть выше атмосферного, чтобы избежать проникновения воздуха в цикл.
8. **Высокая температура стабильности:** в отличие от воды, органические жидкости обычно подвергаются химическому разрушению и разложению при высоких температурах. Таким образом, максимальная температура источника тепла ограничена химической стабильностью рабочей жидкости.
9. **Температура плавления** должна быть ниже самой низкой температуры окружающей среды в течение года, чтобы избежать замерзания рабочей жидкости.
10. **Высокий уровень безопасности:** безопасность включает в себя два основных параметра: токсичность и воспламеняемость.

11. **Низкий озоноразрушающий потенциал (ОРП):** озоноразрушающий потенциал измеряется в сравнении с ОРП R11, установленным на единицу. ОРП нынешних хладагентов либо равен нулю, либо очень близок к нулю, поскольку ненулевые жидкости ОРП постепенно выводятся из использования Монреальским протоколом.
12. **Низкий потенциал парникового потепления (ПГП):** ПГП измеряется в сравнении с ПГП CO₂, установленным в единице. Хотя некоторые хладагенты могут достигать значения ПГП до 1000, нет никакого законодательного пункта, ограничивающего использование жидкостей с высоким ПГП.
13. **Хорошая доступность и низкая стоимость:** жидкости, уже используемые в холодильной или химической промышленности, легче получить и более экономичны.

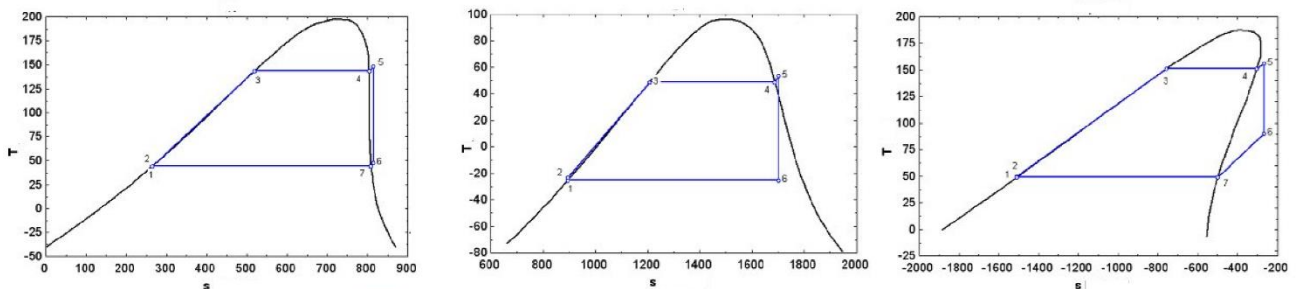


Рис. 8: примеры изохронных, влажных и сухих жидкостей

В то время как исследования по отбору жидкостей в научной литературе охватывают широкий спектр рабочих жидкостей, только несколько жидкостей фактически используются в коммерческих электростанциях ОЦР. Эти жидкости классифицированы следующим образом:

HFC-134a:	Используется на геотермальных электростанциях или при рекуперации отработанного тепла при очень низких температурах.
HFC-245fa:	Низкотемпературная рабочая жидкость, в основном используемая в рекуперации отработанного тепла

Н-пентан:	Используется на единственной коммерческой солнечной электростанции ОЦР в Неваде. Другие области применения включают рекуперацию отработанного тепла.
Solkatherm:	Утилизация отработанного тепла.
OMTS:	ТЭЦ.
Толуол:	Утилизация отработанного тепла.

Таблица 4. Применение органических жидкостей

В общем случае выбранная жидкость показывает критическую температуру, немного превышающую целевую температуру испарения: если испарение происходит слишком далеко от критической температуры – например, если толуол ($T_c = 319^\circ\text{C}$) испаряется при 100°C , – плотность пара очень низка как на стороне высокого, так и на стороне низкого давления, что вызывает высокие перепады давления и необходимость в более крупных компонентах.

2.2 Термодинамическая оптимизация

При оптимизации конструкции цикла необходимо перечислить имеющиеся в системе степени свободы и связать их (хотя бы качественно) с условиями эксплуатации цикла. Ниже суммируются компоненты термодинамических взаимодействий, выделенные в случае прототипа ОЦР с использованием объемного насоса и детандера:

Массовый расход. Поскольку насос представляет собой объемное устройство, он накладывает объемный расход. Поскольку жидкость несжимаема, массовый расход также определяется насосом. Его можно регулировать, изменяя объем насоса или изменяя скорость его вращения.

Давление кипения. В случае объемной установки поглощенный объем жидкости при каждом обороте фиксируется. Поскольку объемный расход определяется скоростью вращения детандера, а массовый расход – насосом, плотность пара модулируется для поддержания непрерывности в установившемся состоянии. Модуляция плотности может быть достигнута путем изменения температуры или давления. Однако в обычных рабочих условиях относительное изменение температуры невелико по сравнению с относительным изменением давления. Таким образом, давление подачи детандера определяется скоростью вращения

детандера при заданном расходе насоса: уменьшение скорости вращения детандера приводит к более высокому давлению испарения.

Перегрев выхлопных газов испарителя. Поскольку расход и давление испарения устанавливаются насосом и детандером, общая теплопередача через испаритель определяется конфигурацией испарителя, а также температурой и расходом горячего потока. Этот тепловой поток так же вызывает перегрев на выходе испарителя.

Температура подачи конденсатора. При отсутствии рекуператора, температура подачи конденсатора равна температуре жидкости, выходящей из расширителя. Эта температура обусловлена эффективностью детандера и потерями тепла детандера.

Переохлаждение выхлопных газов конденсатора. В цикле ОЦР масса вещества в парообразном состоянии ничтожно мала по сравнению с массой жидкости. Добавление большего количества жидкости в контур увеличивает количество жидкости и увеличивает уровень жидкости в теплообменниках. Если условия испарения (давление, перегрев) фиксированы, то уровень жидкости в испарителе остается более или менее одинаковым, поскольку для испарения и перегрева жидкости требуется фиксированная площадь теплообменника. В этом случае увеличение расхода хладагента приведет только к увеличению уровня жидкости в конденсаторе и увеличению зоны переохлаждения в теплообменнике. Таким образом, жидкость будет иметь большую площадь обмена, чтобы стать переохлажденной. Тогда можно сделать вывод, что переохлаждение выхлопных газов конденсатора происходит за счет загрузки хладагента.

Падение давления. Перепады давления в основном зависят от геометрических характеристик теплообменника и скорости потока.

2.3 Условия эксплуатации

Условия эксплуатации и термодинамическое состояние органического цикла Ренкина могут быть определены четырьмя переменными: температурой испарения, перегревом на выходе испарителя, температурой конденсации и переохлаждением на выходе конденсатора. В дополнение к этим переменным могут быть добавлены дополнительные параметры, учитывающие необратимость в цикле: эффективность расширителя и насоса, перепады давления. Как правило, должны выполняться следующие критерии:

- Давление конденсации должно поддерживаться как можно ниже.
- Перегрев на выходе испарителя должен быть как можно ниже.

- Переохлаждение на выходе конденсатора должно быть нулевым или как можно более низким.
- Оптимальная температура испарения приводит к оптимизации общего КПД.

Следовательно, основной управляющей переменной в цикле является температура испарения, поскольку давление конденсации, перегрев и переохлаждение должны поддерживаться как можно ниже. При оптимизации температуры испарения можно выделить два случая: чувствительный источник тепла или источник тепла с постоянной температурой.

2.4 Чувствительный тепловой источник

Термин "чувствительный источник тепла" относится к тепловому источнику тепла, который становится полностью отработанным, если его температура снижается до температуры окружающей среды (или эталонной). Это обычно относится к отработанным источникам тепла или отработавшим газам ДВС: полный потенциал источника тепла восстанавливается, если температура горячего потока минимальна после процесса рекуперации тепла. Например, если источник тепла горячего воздуха при температуре 200°C рекуперирован с помощью ОЦР, и если его температура после рекуперации тепла составляет 50°C, а температура окружающей среды - 20°C, то последние 30°C не эксплуатируются, что составляет более 16% потенциала источника тепла.

2.5 Источник тепла постоянной температуры

Термин "источник тепла с постоянной температурой" относится к постоянному источнику тепловой энергии, такому как солнечная радиационная энергия или химическая энергия биомассы (сжигание). В этом случае нет никаких ограничений на снижение температуры источника тепла: нет необходимости снижать температуру теплового потока в испарителе, так как вся энергоёмкость источника тепла "протекает через" цикл ОЦР. Таким образом, оптимизация выходной мощности эквивалентна оптимизации эффективности цикла, которая может быть достигнута путем выбора высокой температуры испарения и установки рекуператора.

Однако на эффективность преобразования самого источника тепла может влиять температура в испарителе. В зависимости от природы этого источника тепла можно найти оптимальную температуру. Типичным примером такого оптимума является солнечная система ОЦР: повышение температуры приводит к более высоким потерям тепла в окружающую среду коллектора, но также и к более высокой эффективности преобразования. Таким образом, выбор оптимальной

температуры в коллекторах/испарителях приводит к компромиссу между эффективностью коллектора и цикла.

2.6 Моделирование характеристик органического цикла Ренкина

В данной работе платформой для создания модели был выбран язык программирования Python - высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода.

Python - это открытая и растущая альтернатива Matlab. Это объектно-ориентированный язык программирования с открытым исходным кодом, и он предлагает аналогичные функциональные возможности и характеристики, как и Matlab. Модели на основе Python, включенные в python-пакет ORCmKit, являются производными от инструментов моделирования ORCSim. Архитектура моделей и схема решения были первоначально вдохновлены другим программным обеспечением с открытым исходным кодом, АСНР, посвященным моделированию кондиционеров и тепловых насосов. Модели на основе Python используют преимущества объектно-ориентированной среды для достижения высокой модульности. Поэтому довольно легко интегрировать дополнительные компоненты или модели в общий цикл, не влияя на структуру ядра кода. Библиотека на основе Python также предоставляет удобный графический интерфейс (графический интерфейс пользователя) для удобства использования.

```

Выбранные параметры
-----
Рабочее тело: n-Butane
Low Pressure: 0.3000 MPa
High Pressure: 3.5000 MPa
Isentropic Turbine Efficiency: 80.0%
Isentropic Pump Efficiency: 75.0%
Plant Cooling Efficiency: 25.0%

Состояния и процессы цикла Ренкина (Рабочая жидкость: n-Butane)

Состояния:
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Состояние | P(кПа) | T(град. Ц.) | h(кДж/кг) | s(кДж/кг.К) | ef(кДж/кг) | x |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 | 3500 | 147.18 | 739.48 | 2.47501 | 137.02 | 1.00 |
| Dead S | 101 | 15.00 | 610.15 | 2.50170 | 0.00 | -1.00 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

Энергия процесса:
+-----+-----+-----+-----+
| Процесс | Состояние | Q(кДж/кг) | W(кДж/кг) |
+-----+-----+-----+-----+
| Turbine | 1 -> outfl | 0.0 | 74.6 |
| Condens | outfl -> outfl | -388.4 | 0.0 |
| Pump | outfl -> outfl | 0.0 | -7.6 |
| Boiler | outfl -> 1 | 455.4 | 0.0 |
| Net | | 67.0 | 67.0 |
+-----+-----+-----+-----+

```

Эксергия процесса:							
Proc	State	Ex.In(kJ/kg)	Ex.Out(kJ/kg)	delt.ef(kJ/kg)	Ex.D(kJ/kg)	Ex.Eff.	Ex.Bal
Turb	1->outfl	0.0	74.6	-91.4	16.9	81.6%	0.0
Cond	outfl->outfl	0.0	22.7	-22.7	0.0	100.0%	0.0
Pump	outfl->outfl	7.6	0.0	5.8	1.8	76.3%	0.0
Boil	outfl->1	108.3	0.0	108.3	0.0	100.0%	0.0
Net		115.9	97.2	0.0	18.7	61.9%	n/a
Состояния и процессы геотермального цикла (Раствор: Salt Water, 20% salinity)							
Состояние	P(кПа)	T(град. Ц.)	h(кДж/кг)	s(кДж/кг.К)	ef(кДж/кг)	x	
Br.In	500	120.15	491.60	1.49200	64.36	None	
Br.Dea	101	15	61.05	0.22050	0.00	None	
Результаты расчета							

Rankine Cycle mass flow rate = 3.14 kg/s							
Geo. Brine mass flow rate = 13.29 kg/s							
Plant thermal (energetic) eff = 3.7%							
Plant exergetic efficiency = 24.6%							
Plant cooling eff. (user specified) = 25.0%							
Rankine cycle thermal eff = 14.7%							
Rankine cycle exergetic eff = 61.9%							
Rankine cycle back work ratio = 10.13%							

Рис. 9 Пример работы программы

Для моделирования были использованы специально разработанные узкоспециализированные пакеты находящиеся в открытом доступе. В общем, говоря о целях выбора данной платформы, стоит отметить ряд преимуществ Python перед аналогичными инструментами, в частности MatLab. В том числе:

1. **Доступность** – бесплатное распространение и поддержка на всех популярных ОС.
2. **Открытый исходный код** – абсолютно все элементы программного обеспечения доступны для ихменения и модификаций.
3. **Развитая пользовательская поддержка** – большое количество ресурсов для обсуждения и решения проблем, возникающих в процессе работы.
4. **Заметно меньшая ресурсоемкость** – размер всего инструментария на Python для данной работы занял не более 1Гб на жестком диске.
5. **Свобода выбора среды работы** – язык поддерживается всеми существующими редакторами кода.

6. Удобный интерфейс – не требуют повышенного уровня знания программирования для работы.

```
Select a working fluid from the following options:
1. Water
2. Ethane
3. n-Propane
4. R22
5. R134a
6. R236EA
7. CarbonDioxide
8. n-Pentane
9. IsoButane
10. n-Butane
11. Ammonia
: 1
Enter the desired high pressure (boiler pressure). (MPa)...
Enter the desired low pressure (condenser pressure). (MPa)...
Enter the desired high temperature (boiler temp). (deg C)...
Enter the desired low temperature (condenser temp). (deg C)...
Enter the turbine efficiency in percent, default is 100. (%)...
Enter the pump efficiency in percent, default is 100. (%)...
Enter the plant cooling efficiency in percent, default is 100. (%)...
Allow the turbine to accept superheated vapor? (y/n)...
Print results tables in kW instead of kJ/kg? (y/n)...
Enter the mass flow rate of the working fluid in the Rankine cycle. (kg/s)...
Fluid=Water
```

Рис. 10 Интерфейс ввода начальных параметров

Использованные пакеты:

1. CoolProp(6.2.1)

CoolProp - это база данных теплофизических свойств и оболочек для различных сред программирования. Он предлагает ту же функциональность, что и REFPROP, но CoolProp поставляется с открытым исходным кодом и является бесплатным.

2. Cycler(0.10.0)

3. Kiwisolver(1.0.1)

4. Matplotlib(3.0.2)

5. Numpy(1.16.0)

6. Prettytable(0.7.2)

7. Pyparsing(2.3.1)

8. python-dateutil(2.7.5)

9. six(1.12.0)

Данные пакеты используют следующие формулы и принципы. В общем случае расчеты основаны на безразмерных величинах δ и τ , где эти величины определяются как,

$$\delta = \rho / \rho_c$$

$$\tau = T_c / T$$

где ρ_c и T_c - критическая плотность жидкости, если она является чистой жидкостью. Для псевдоочищенных смесей критическая точка обычно не используется в качестве точки восстановления состояния, и часто вместо нее используется максимальная температура конденсации на кривой насыщения. Безразмерная энергия Гельмгольца жидкости задается следующим образом:

$$\alpha = \alpha^0 + \alpha^r$$

где α^0 -вклад идеального газа в энергию Гельмгольца, а α^r -остаточный вклад в энергию Гельмгольца, который объясняется неидеальным поведением. Для заданного множества δ и τ известны все члены α^0 и α^r . Точная форма энергетических величин Гельмгольца зависит от жидкости.

$$\alpha^0 = \ln \delta + a_1 \ln \tau + a_2 + a_3 \tau + a_4 \tau^{-1} + a_5 \tau^{-2} + a_6 \tau^{-3} + a_7 \ln[1 - \exp(-a_8 \tau)]$$

и безразмерная остаточная энергия Гельмгольца:

$$\alpha^r = \sum_{k=1}^6 N_k \delta^{i_k} \tau^{j_k} + \sum_{k=7}^{32} N_k \delta^{i_k} \tau^{j_k} \exp(-\delta^{l_k}) + \sum_{k=33}^{36} N_k \delta^{i_k} \tau^{j_k} \exp(-\phi_k (\delta - 1)^2 - \beta_k (\tau - \gamma_k)^2)$$

Все члены, кроме δ и τ , являются зависимыми от жидкости параметрами. Другие термодинамические параметры могут быть получены с помощью аналитических производных от энергетических величин Гельмгольца. Например, давление находится путем:

$$p = \rho RT \left[1 + \delta \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau} \right]$$

Удельная внутренняя энергия:

$$\frac{u}{RT} = \tau \left[\left(\frac{\partial \alpha^0}{\partial \tau} \right)_{\delta} + \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_{\delta} \right]$$

Удельная энтальпия:

$$\frac{h}{RT} = \tau \left[\left(\frac{\partial \alpha^0}{\partial \tau} \right)_{\delta} + \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_{\delta} \right] + \delta \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau} + 1$$

Которая также может быть записана как:

$$\frac{h}{RT} = \frac{u}{RT} + \frac{p}{\rho RT}$$

Удельная энтропия задается по формуле:

$$\frac{s}{R} = \tau \left[\left(\frac{\partial \alpha^0}{\partial \tau} \right)_{\delta} + \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_{\delta} \right] - \alpha^0 - \alpha^r$$

а удельные тепловыделения при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно задаются по формуле:

$$\frac{c_v}{R} = -\tau^2 \left[\left(\frac{\partial^2 \alpha^0}{\partial \tau^2} \right)_{\delta} + \left(\frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \tau^2} \right)_{\delta} \right]$$

$$\frac{c_p}{R} = \frac{c_v}{R} + \frac{\left[1 + \delta \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau} - \delta \tau \left(\frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta \partial \tau} \right) \right]^2}{\left[1 + 2\delta \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau} + \delta^2 \left(\frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta^2} \right)_{\tau} \right]}$$

Но часто известны и другие входные данные, чаще всего температура и давление, потому что они могут быть непосредственно измерены. В результате, если плотность предсказуема для известной температуры и давления, то ее можно

получить итеративно. Для получения обоснованного предположения о начальном значении итерационного значения используется следующий алгоритм:

1. Если жидкость перегрета, используется предположение об идеальном газе ($\rho = p/(RT)$)
2. Если жидкость переохлаждена, используется предположение о плотности насыщенной жидкости
3. Если жидкость сверхкритична, используйте предположение об идеальном газе ($\rho = p/(RT)$)

```
Python 3.8.1 (tags/v3.8.1:1b293b6, Dec 18 2019, 23:11:46) [MSC v.1916 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import CoolProp
>>> from CoolProp.Plots import PropertyPlot
>>> ts_plot = PropertyPlot('n-Pentane', 'Ts', tp_limits='ORC')
>>> ts_plot.calc_isolines(CoolProp.iQ, num=10)
C:\Program Files\Python38\lib\site-packages\CoolProp\Plots\Common.py:608: UserWarning: Please use "calc_sat_range"
  warnings.warn(
C:\Program Files\Python38\lib\site-packages\CoolProp\Plots\Common.py:608: UserWarning: Please use "calc_sat_range"
  warnings.warn(
>>> ts_plot.title(r'$T, s$ n-Pentane')
>>> ts_plot.grid()
>>> ts_plot.show()
C:\Program Files\Python38\lib\site-packages\CoolProp\Plots\Plots.py:217: UserWarning: Detected an incomplete phase
  warnings.warn("Detected an incomplete phase envelope, fixing it numerically.")
```

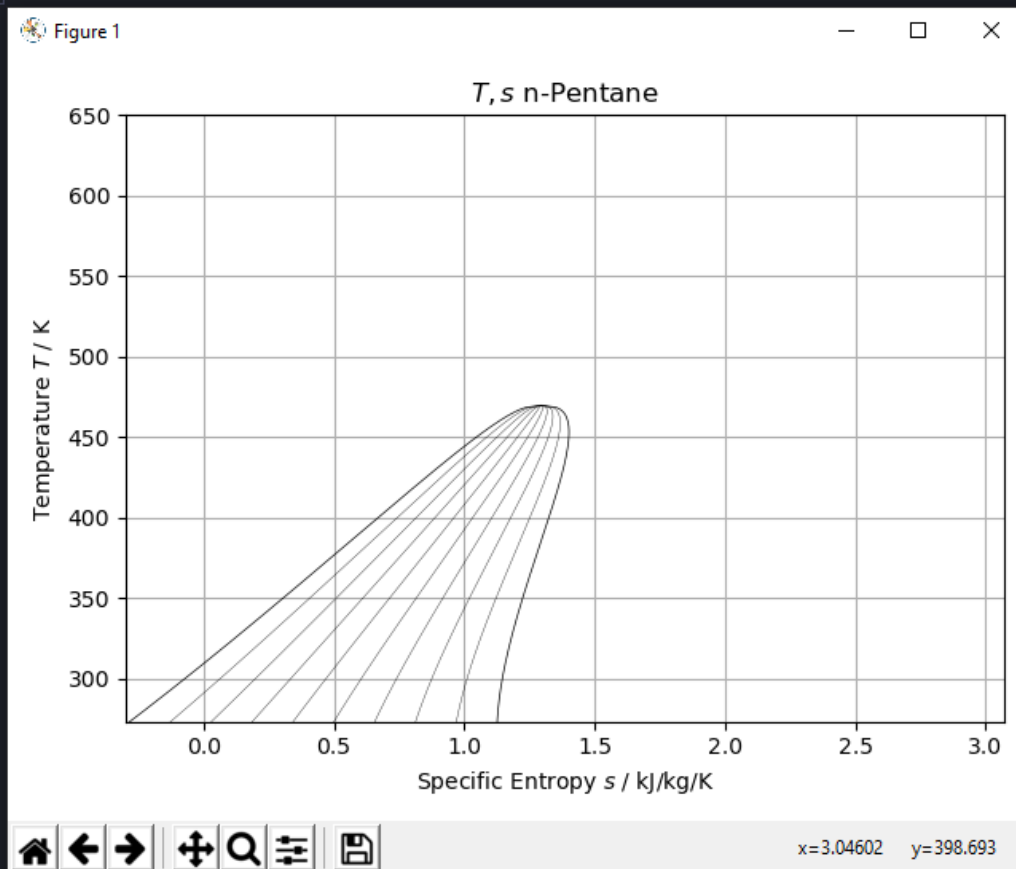


Рис. 10 Интерфейс построения графиков

ГЛАВА 3

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Далее представлены результаты работы программы для разных рабочих тел (ИзоБутан, н-Бутан, н-Пентан, н-Пропан, Этан), рассчитанные для одинаковых начальных параметров и соответствующие графики.

Выбранные параметры	Результаты расчета
-----	-----
Рабочее тело: IsoButane	Rankine Cycle mass flow rate = 3.14 kg/s
Low Pressure: 0.3000 MPa	Geo. Brine mass flow rate = 12.15 kg/s
High Pressure: 3.5000 MPa	Plant thermal (energetic) eff = 3.7%
Isentropic Turbine Efficiency: 80.0%	Plant exergetic efficiency = 24.5%
Isentropic Pump Efficiency: 75.0%	Plant cooling eff. (user specified) = 25.0%
Plant Cooling Efficiency: 25.0%	Rankine cycle thermal eff = 14.7%
	Rankine cycle exergetic eff = 71.2%
	Rankine cycle back work ratio = 11.14%

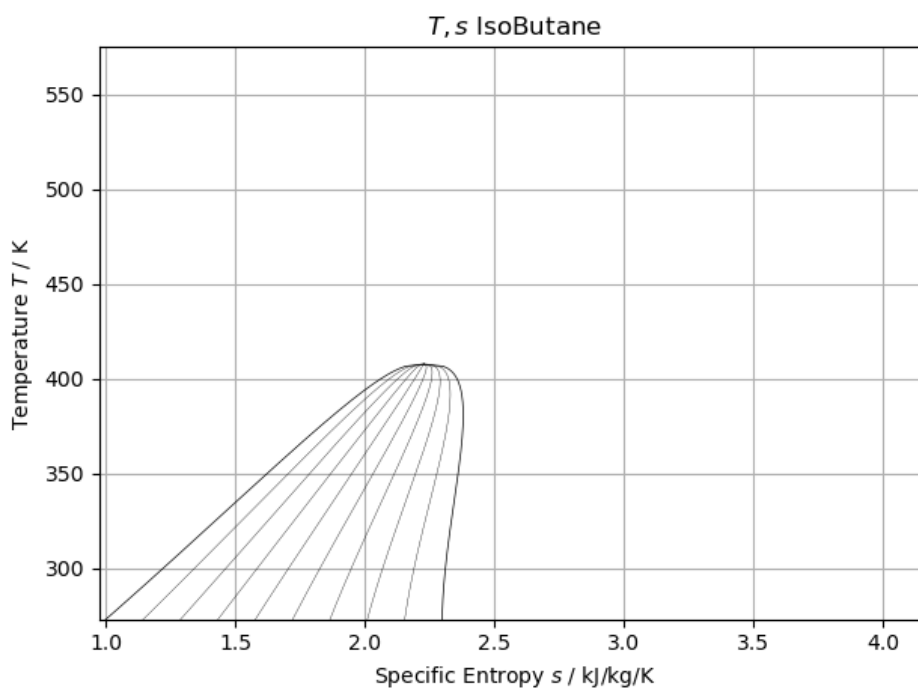


Рис. 11 Результаты моделирования для изобутана

Выбранные параметры	Результаты расчета
-----	-----
Рабочее тело: n-Butane	Rankine Cycle mass flow rate = 3.14 kg/s
Low Pressure: 0.3000 MPa	Geo. Brine mass flow rate = 13.29 kg/s
High Pressure: 3.5000 MPa	Plant thermal (energetic) eff = 3.7%
Isentropic Turbine Efficiency: 80.0%	Plant exergetic efficiency = 24.6%
Isentropic Pump Efficiency: 75.0%	Plant cooling eff. (user specified) = 25.0%
Plant Cooling Efficiency: 25.0%	Rankine cycle thermal eff = 14.7%
	Rankine cycle exergetic eff = 61.9%
	Rankine cycle back work ratio = 10.13%

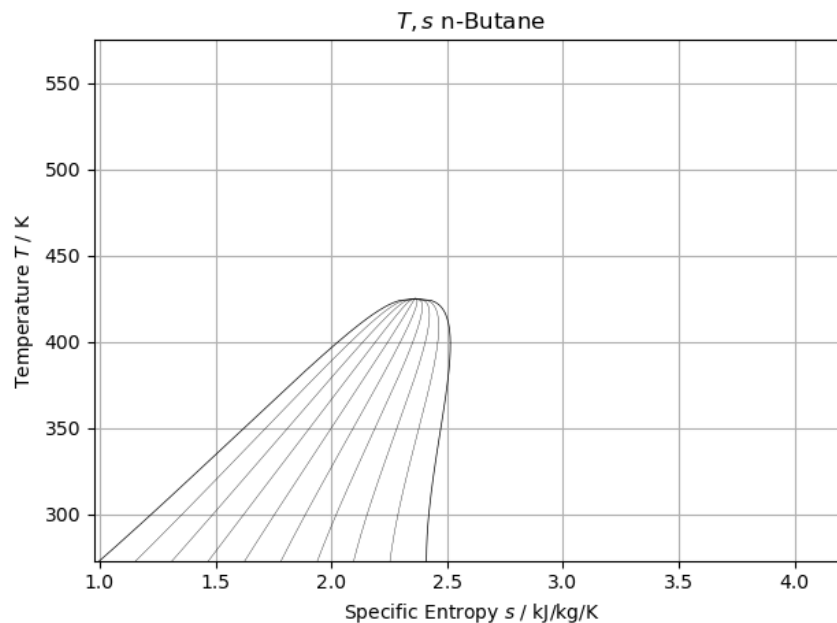


Рис. 12 Результаты моделирования для н-бутана

Был выбран следующий набор начальных параметров:

1. Высокое давление (давление котла) (МПа) – 3.5
2. Низкое давление (давление конденсатора). (МПа) – 0.3
3. КПД турбины в процентах (%) – 80
4. КПД насоса в процентах (%) – 75
5. Эффективность охлаждения в процентах (%) – 25
6. Перегретый пар в турбине – нет
7. Массовый расход рабочей жидкости в цикле Ренкина (кг/с) – 3.14

Выбранные параметры	Результаты расчета
-----	-----
Рабочее тело: n-Pentane	Rankine Cycle mass flow rate = 3.14 kg/s
Low Pressure: 0.3000 MPa	Geo. Brine mass flow rate = 13.15 kg/s
High Pressure: 3.3000 MPa	Plant thermal (energetic) eff = 3.3%
Isentropic Turbine Efficiency: 80.0%	Plant exergetic efficiency = 21.9%
Isentropic Pump Efficiency: 75.0%	Plant cooling eff. (user specified) = 25.0%
Plant Cooling Efficiency: 25.0%	Rankine cycle thermal eff = 13.1%
	Rankine cycle exergetic eff = 42.0%
	Rankine cycle back work ratio = 10.61%

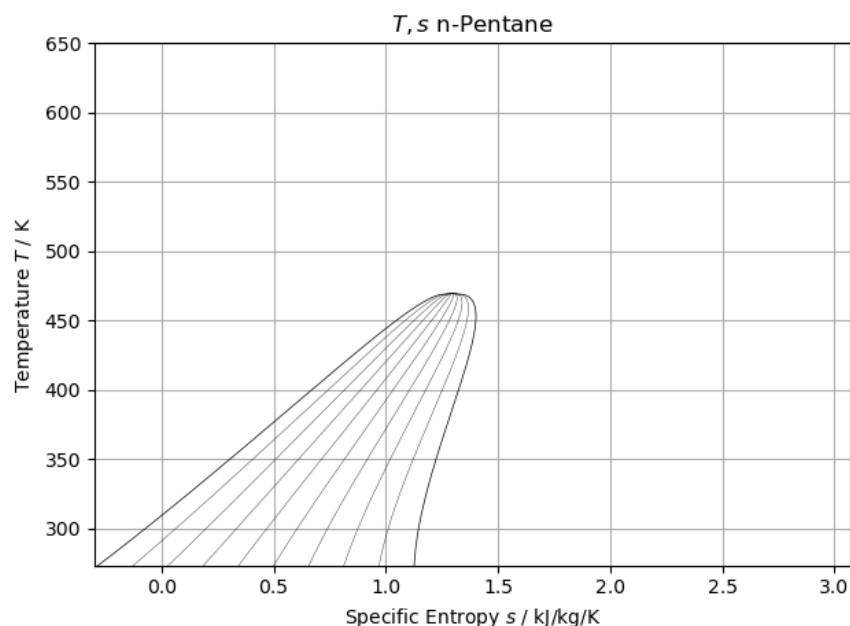


Рис. 13 Результаты моделирования для н-пентана

Результаты моделирования циклов показаны в таблице 5. В полученных данных наблюдается линейный рост тепловой эффективности установки, и тепловой эффективности цикла с увеличением критической точки для данной жидкости, и в то же время уменьшение коэффициента обратной работы. Стоит отметить, что если проанализировать данную зависимость для жидкостей, производных от химического класса предельных углеводородов, то можно заметить взаимосвязь между структурой молекул жидкости и итоговой эффективностью ее использования в ОЦР. А именно, с увеличением количественного состава молекулы вещества, и, соответственно атомов углерода и водорода в ней, понижается КПД установки и повышается значение критической точки данного цикла. В первую очередь это обусловлено зависимостью физических свойств от строения молекулы – примеры приведены в таблице 3. Однако, схожая тенденция наблюдается и для остальных химических классов возможных органических рабочих тел.

Учитывая данные выводы стоит более внимательно выбирать рабочее тело для каждого конкретного источника тепла. Чтобы добиться максимального прироста КПД, для более низкотемпературных источников (утилизация остаточного тепла промышленного оборудования, утилизация отработанного тепла ДВС) стоит использовать жидкости с более низкой критической точкой (этан, н-пропан), а для источников с температурой выше (солнечная и геотермальная энергия, биомасса) лучше выбрать вещества менее чувствительные к температуре (н-пентан, изобутан).

Выбранные параметры	Результаты расчета
-----	-----
Рабочее тело: n-Propane	Rankine Cycle mass flow rate = 3.14 kg/s
Low Pressure: 0.3000 MPa	Geo. Brine mass flow rate = 13.14 kg/s
High Pressure: 3.5000 MPa	Plant thermal (energetic) eff = 4.0%
Isentropic Turbine Efficiency: 80.0%	Plant exergetic efficiency = 26.9%
Isentropic Pump Efficiency: 75.0%	Plant cooling eff. (user specified) = 25.0%
Plant Cooling Efficiency: 25.0%	Rankine cycle thermal eff = 16.1%
	Rankine cycle exergetic eff = 132.9%
	Rankine cycle back work ratio = 9.73%

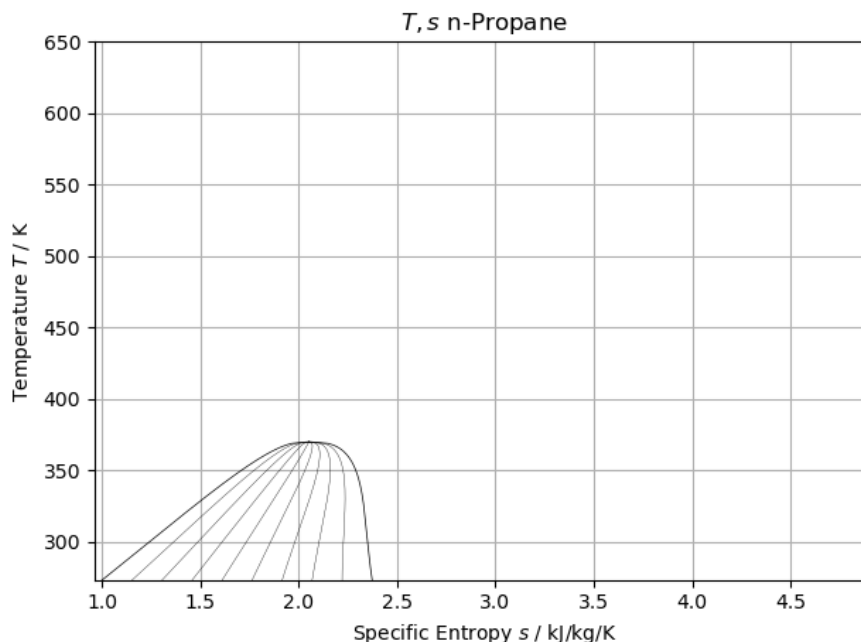


Рис. 14 Результаты моделирования для н-пропана

Определяющими характеристиками в подборе рабочего тела могут стать показатели ОРП и ПГП, а также возможные негативные реакции органических жидкостей на значительные перепады температур. К тому же, в некоторых странах существуют законодательные акты, ограничивающие выбор рабочих тел для ОЦР, основанные на идеи защиты окружающей среды.

Выбранные параметры	Результаты расчета
-----	-----
Рабочее тело: Ethane	Rankine Cycle mass flow rate = 3.14 kg/s
Low Pressure: 0.3000 MPa	Geo. Brine mass flow rate = 13.83 kg/s
High Pressure: 3.5000 MPa	Plant thermal (energetic) eff = 4.4%
Isentropic Turbine Efficiency: 80.0%	Plant exergetic efficiency = 29.2%
Isentropic Pump Efficiency: 75.0%	Plant cooling eff. (user specified) = 25.0%
Plant Cooling Efficiency: 25.0%	Rankine cycle thermal eff = 17.4%
	Rankine cycle exergetic eff = -237.1%
	Rankine cycle back work ratio = 9.12%

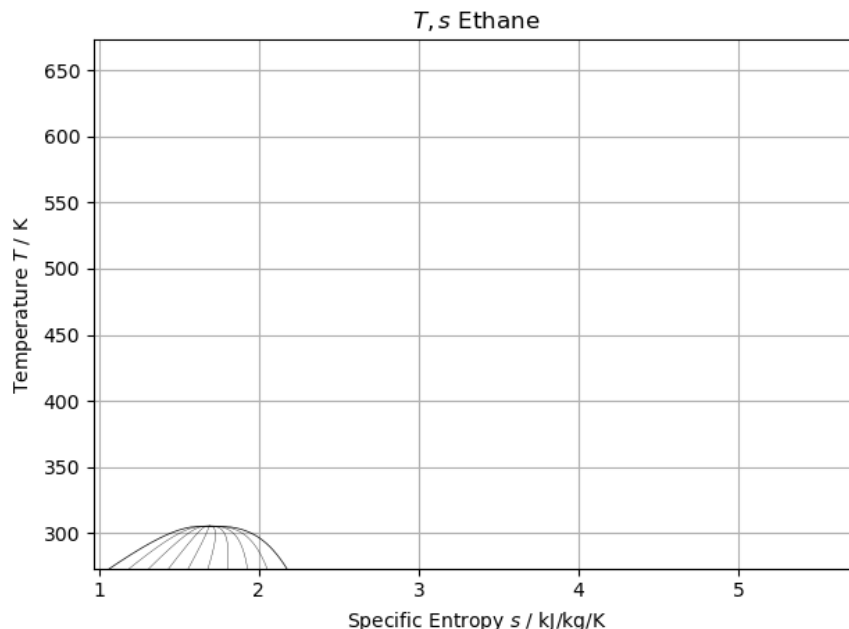


Рис. 15 Результаты моделирования для этана

Основными же факторами увеличения эффективности данных установок остаются правильно подобранные начальные характеристики цикла, условия эксплуатации установки и выбор подходов к оптимизации работы ОЦР.

В данной работе были выбраны усредненные начальные параметры установки ОЦР, оптимальные для большинства распространенных источников низкопотенциального тепла. При этом выходная эффективность циклов оказалась сопоставимой, или даже превосходящей, чем у уже существующих машин, что доказывает актуальность и целесообразность использования и развития технологии ОЦР.

В Республике Беларусь возможно распространение циклов ОЦР с использованием жидкостей R113, R134a, R11, R114, а также некоторых предельных углеводородов обладающих низкой токсичностью, из-за хорошо развитого сельского хозяйства и легкой промышленности, которые могут обеспечить широкий

доступ к низкопотенциальным источникам тепла в виде биомассы и большого количества сбрасываемых тепловых отходов.

Таблица 5. Результаты моделирования циклов для различных рабочих тел

	Тепловая эффективность установки(%)	Тепловая эффективность ОЦР(%)	Коэффициент обратной работы(%)
Изобутан	3,7	14,7	11,14
Н-бутан	3,7	14,7	10,13
Н-пентан	3,3	13,1	10,61
Н-пропан	4	16,1	9,73
Этан	4,4	17,4	9,12

Таким образом, проектирование мелкомасштабной системы ОЦР часто зависит от процесса оптимизации, включая ряд компромиссов в отношении выбора рабочей жидкости, оптимальных условий работы или конфигурации цикла. Это несущественное отличие от традиционных паровых электростанций, где границы часто являются результатом практических ограничений материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы проведено моделирование органического цикла Ренкина для различных рабочих тел (изобутана, н-бутана, н-пентана, н-пропана, этана) на основе разработанной математической модели. При этом

1) показано, что тепловая эффективность ОЦР для данных рабочих тел лежит в диапазоне 14,7 (изобутан) – 17,4% (этан), что подчеркивает эффективность применения данной технологии для использования остаточного низкопотенциального тепла;

2) выполнена визуализация ОЦР в координатах T_s и создан интерфейс программы, позволяющей произвести варьирование параметров энергетической установки с целью определения её оптимальных режимов работы, что делает возможным использование разработанной программы в качестве модельной среды для анализа данных установок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д. И. Карабарин, С. А. Михайленко Особенности проектирования установок органического цикла Ренкина // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-ustanovok-organicheskogo-tsikla-renkina> (дата обращения: 28.05.2020).
2. Леонов Виктор Павлович, Воронов Владимир Андреевич, Апсит Константин Александрович, Ципун Александр ЦИКЛ РЕНКИНА С НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. №2 (38). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsikl-renkina-s-nizkopotentsialnym-istochnikom-teploty> (дата обращения: 28.05.2020).
3. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organicheskiy-tsikl-renkina-i-ego-primeneniye-v-alternativnoy-energetike> (дата обращения: 28.05.2020).
4. Карабарин Д.И., Михайленко С.А. Использование низкопотенциальных источников энергии на основе органического цикла Ренкина // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2018. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nizkopotentsialnyh-istochnikov-energii-na-osnove-organicheskogo-tsikla-renkina> (дата обращения: 28.05.2020).
5. Kotpalliwar, Onkar & Singhal, A & Dutta, T & Samanta, A. (2018). Efficiency Analysis of Organic Rankine Cycle.
6. Kaplan, Uri. (2020). Organic Rankine Cycle Configurations.
7. Pramodana, Eghan & Aufari, Shabrina. (2018). Simulator of Organic Rankine Cycle. Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi. 9. 47. 10.5614/joki.2017.9.1.5.
8. Karabarin, Denis & Mihailenko, Sergei. (2019). Features Design of Organic Rankine Cycle. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 733-745. 10.17516/1999-494X-0173.
9. Quoilin, Sylvain. (2011). Sustainable energy conversion through the use of Organic Rankine Cycles for waste heat recovery and solar applications. 183.