

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»
(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Анализ применения различных источников тепла и выбор
низкокипящих теплоносителей в органическом цикле Ренкина

Студент Илья Константинович Михайлюк (личная подпись)
(И.О. Фамилия)

Научный к.т.н., доцент, Д.А. Павлов
руководитель (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Основные положения и принцип работы органического цикла Ренкина.....	6
2 Применяемость установок, работающих с ОЦР в альтернативной энергетике	11
2.1 Применение системы ОЦР с использованием солнечной энергии..	11
2.2 Применение системы ОЦР с использованием биомассы.....	11
2.3 Применение системы ОЦР с использованием геотермальной энергии	13
2.4 Применение системы ОЦР с использованием тепловых отходов крупных предприятий.....	14
2.5 Применение системы ОЦР с использованием тепловых отходов..	15
2.6 Использование системы ОЦР с бойлером	17
3 Экономический анализ установки с использованием ОЦР.....	18
3.1 Стимулирование развития системы ОЦР на европейском рынке..	20
3.2 Анализ рынка систем ОЦР.....	28
4. Выбор рабочей жидкости.....	41
4.1 Принцип выбора рабочей жидкости для органического цикла Ренкина на основе экологических выгод и экономических показателей....	48
4.2 Общий анализ выбора рабочей жидкости для различных источников тепла.....	51
4.3. Пример системы ОЦР для выбора рабочей жидкости.....	59
4.3.1 Выбор рабочей жидкости.....	60
4.4 Анализ эксэргии.....	66
5. Выбор детандера	69

5.1 ОЦР установки мощностью от 1 до 20 кВт.....	74
5.1.1 Пример проектирования установки с ОЦР мощностью до 4 кВт.	75
5.2 ОЦР установки мощностью от 20 до 70 кВт.....	77
5.3 ОЦР установки мощностью от 70 до 100 кВт.....	78
5.4 Сравнительный анализ детандеров	79
5.5 Выводы анализа современного состояния технологии ОЦР.....	81
6 Моделирование безопасности при использовании углеродных рабочих тел.....	82
6.1 Физическая проблема.....	82
6.2 Безопасная работа различных рабочих жидкостей.....	84
6.2.1 Сравнение распределения концентрации.....	84
6.2.2 Влиятельные фактора дисперсионных характеристик.....	85
6.3 Степень разрушения от взрыва.....	86
6.4 Меры по предотвращению риска	89
6.5 Вывод по безопасности при использовании углеродных рабочих тел.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	94

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

В настоящее время проблема использования энергоресурсов становится все более острой, поскольку разрабатываемые месторождения нефти и газа исчерпаемы, а добыча ресурсов становится все более дорогой. Стоимость электроэнергии будет увеличиваться, пока не будут найдены новые источники энергии. Из-за увеличения стоимости электроэнергии оказывается более выгодным найти возможность использования выделенного тепла, которое есть во многих технологических процессах. Это тепло можно использовать для нагрева, отопления, охлаждения или механической работы, например, в органическом цикле Ренкина.

Целью работы является выбор подходящего или универсального рабочего тела с различными источниками тепла для маломощных систем.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением **следующих задач:**

1. Проанализировать доступные рабочие тела и различные источники тепла
2. Определить зависимость выбора p и их влияние на параметры установки, работающей на органическом цикле Ренкина.
3. Определить зависимость выбора источников тепла и их влияние на параметры установки, работающей на органическом цикле Ренкина.

Объект исследования: установка, работающая с различными источниками тепла с определёнными рабочими телами в органическом цикле Ренкина (ОЦР).

Предмет исследования: исследование рабочих тел и источников тепла.

Методы исследования: экспериментальный метод исследования, метод статистической обработки информации и метод моделирования 3D-модели установки ОЦР.

Гипотеза исследования: в данной работе проведено исследование гипотезы, что существует идеальное рабочее тело для различных вариаций органического цикла Ренкина.

Научная новизна исследования: развитие альтернативной энергетики в виде маломощных установок на основе органического цикла Ренкина.

Практическая значимость работы: выбор универсального рабочего тела со всеми вариациями установок на основе ОРЦ и их экономическая выгода для внедрения на производство.

На защиту выносятся:

1. развитие альтернативной энергетики в виде маломощных установок на основе органического цикла Ренкина;
2. выбор универсального рабочего тела со всеми вариациями установок на основе ОРЦ и их экономическая выгода для внедрения на производство;
3. Возможное применение установки ОРЦ в альтернативной энергетике;

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» и на конференции.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатных работы в сборнике научно-практической конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 42 наименования. Работа изложена на 103 страницах машинописного текста, иллюстрированного 8 таблицами и 35 рисунками.

1 Основные положения и принцип работы органического цикла Ренкина

Непрерывный рост спроса на энергию заставляет задуматься, как в будущем будет развиваться сеть энергопроизводства. Одним из вариантов к достижению этой цели, является производство электроэнергии из возобновляемых источников, где производить электроэнергию возможно на месте производства. Это поможет избежать потерь при передаче и сократить выбросы углерода. К примеру, 800 единиц тепловой энергии, которая выбрасывается в окружающую среду, можно использовать для производства энергии- имеет важное значение для достижения целей. Описанный сценарий, продвигает научное сообщество для изучения новых технологий, которые могут эффективно локализовать энергию. Органический цикл Ранкина (ОЦР) привлек большое внимание, так как данный цикл позволяет вырабатывать энергию из возобновляемых источников тепла и преобразовывать энергию тепла в электричество. Геотермальная энергия, солнечная энергия и отходы.

Был проведен термоэкономический анализ, для снижения затрат на стоимость систем. Однако, фактическая стоимость установки часто приводят к большим расхождениям. В работе представлены основы многоцелевой термоэкономической оптимизации систем централизованного развития. Изменения в оптимальных термодинамических условиях и рабочей жидкости, рассматриваемые в качестве целевой функции, должны сводить к минимуму удельные затраты системы, а не производительность цикла. Предложен метод, который улучшает экономику небольших систем ОЦР. Было продемонстрировано, что данные системы могут быть оснащены турбиной с центробежным потоком в диапазоне мощностей от 2 до 30 кВт. Существует также предложение об использовании спирального теплообменника для сверхкритических систем, что улучшит коэффициент теплопередачи и эффективность цикла. Приводятся эксперименты на паяном пластинчатом теплообменнике (ППТ) с использованием R134 в качестве рабочей жидкости.

На рынке представлен широкий выбор различных теплообменников и насосов для разных мощностей и размеров. Однако на подбор правильных термодинамических параметров и на производительности системы влияют именно расширительные машины и рабочие тела, но их выбор не так широк под различные мощности.

Было обнаружено, что семейство алкилбензолов в системе ОЦР демонстрирует высокую эффективность, и литературные исследования показывают, что не существует единого рабочего тела для каждой установки с циклом Ренкина.

Анализ рабочего тела в сочетании с солнечной энергией показал, что фреон R134a превосходит другие анализируемые тела.

Сильное влияние на производительность оказывают расширительные машины и могут быть классифицированы как турбодетандеры или объемные машины. Турбодетандеры, как правило, обеспечивают более высокую эффективность. Поэтому, был представлен всесторонний обзор объемных расширителей для низкосортной рекуперации тепла. И было проанализировано производительность объемных и турбо экспандеров, подходящих для небольших ОЦР.

Существует два основных типа паротурбинных установок, работающих по циклу Уильяма Джона Ренкина – с регенерацией и без нее. Рабочими телами циклов могут являться очищенная вода и различные органические жидкости.

Конструктивная схема замкнутого цикла Ренкина без регенерации (рисунок 1.1) состоит из испарителя, в котором жидкое рабочее тело превращается в перегретый пар, паровой турбины, где потенциальная и внутренняя энергия рабочего тела преобразуется в полезную механическую работу вращения ротора паровой турбины, приводящей во вращение электрогенератор, конденсатора, в котором пар, конденсируясь на поверхности охлаждающих трубок, переходит в жидкую фазу и питательного насоса, повышающего давление жидкого рабочего тела до необходимого значения перед испарителем.

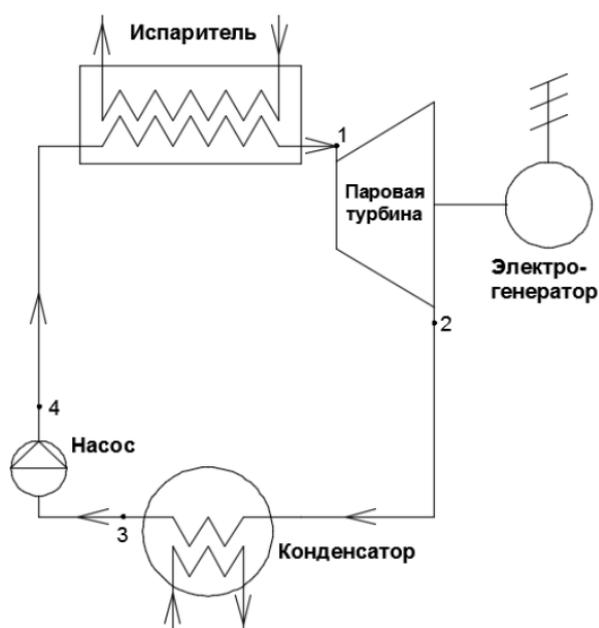


Рисунок 1.1 – Схема установки ОЦР без регенерации

Органический цикл Ренкина является альтернативной формой цикла Ренкина, который чаще всего используется, когда недоступны высокие температуры, необходимые для производства пара. Обычный цикл Ренкина использует тепловую энергию для преобразования воды в пар, который расширяется через турбину для выработки электроэнергии. Однако вместо использования воды, которая имеет относительно высокую температуру кипения, в органическом цикле Ренкина используется органическая жидкость, температура кипения которой намного ниже, чем у воды. Идеальная жидкость для этого должна иметь низкую температуру кипения, чтобы она быстрее испарялась, а также низкая температура замерзания, чтобы она никогда не становилась твердой в течение всего цикла. Соединения бутана или пентана удовлетворяют этим требованиям и обычно используются.

Эти системы используются, когда высокие температуры недоступны. Примеры включают системы, использующие отработанное тепло в когенерационной системе, низкотемпературное производство геотермальной электроэнергии или солнечные пруды. Цикл Ренкина или Цикл пара Ренкина - это процесс, широко используемый на электростанциях, таких как угольные электростанции

или ядерные реакторы. В этом механизме топливо используется для производства тепла внутри котла, превращая воду в пар, который затем расширяется через турбину, производя полезную работу. Этот процесс был разработан в 1859 году шотландским инженером Уильямом Дж. М. Раекином. Это термодинамический цикл, который преобразует тепло в механическую энергию, которая обычно преобразуется в электричество при производстве электроэнергии.

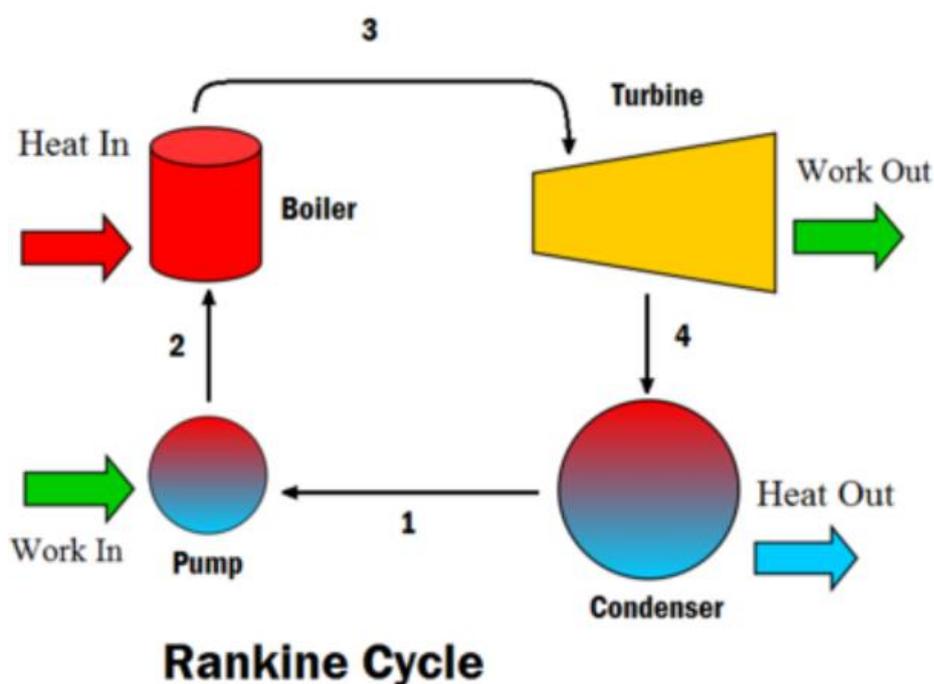


Рисунок 1.2 - Простая схема с компонентами для цикла Ренкина

Шаги в цикле Ренкина, как показано на рисунке 1.2, и соответствующие шаги на диаграмме объема давления (рисунок 1.3) описаны ниже:

Насос: сжатие жидкости до высокого давления с помощью насоса (это требует работы) (Рисунок 1.3: Шаги с 3 по 4)

Котел: сжатая жидкость нагревается до конечной температуры (которая находится в точке кипения), поэтому происходит фазовое изменение - от жидкости к пару. (Рисунок 1.3: Шаги с 4 по 1)

Турбина: Расширение паров в турбине. (Рисунок 1.3: Шаги с 1 по 2)

Конденсатор: Конденсация паров в конденсаторе (где отработанное тепло поступает в конечный радиатор (атмосфера или большой водоем (например, озеро или река)). (Рисунок 1.3: Шаги 2–3)

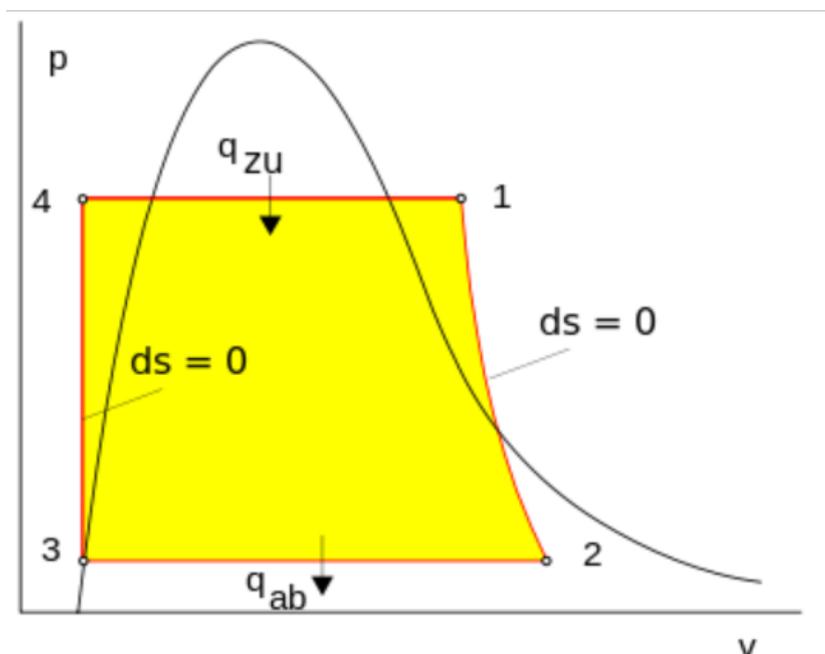


Рисунок 1.3 - Диаграмма объема давления цикла Ренкина. Это иллюстрирует изменения давления и объема, которым подвергается рабочая жидкость (вода) для выполнения работы.

Эффективность цикла Ренкина ограничена высокой теплотой испарения жидкостью. Жидкость должна постоянно циркулировать и повторно использоваться, поэтому вода является наиболее практичной жидкостью для этого цикла. Это не то, почему многие электростанции расположены рядом с водоемом - это для отвода тепла.

Когда вода конденсируется в конденсаторе, отработанное тепло выделяется в виде водяного пара, который можно увидеть вздымающимся с градирен завода. Это отработанное тепло необходимо в любом термодинамическом цикле. Благодаря этой стадии конденсации давление на выходе турбины снижается. Это означает, что насос требует меньше работы для сжатия воды, что приводит к повышению общей эффективности.

2 Применяемость установок, работающих с ОЦР в альтернативной энергетике

Преимущество цикла Ренкина перед циклами Стерлинга, Брайтона и Калины является возможность адаптации к различным источникам тепловой энергии, оборудования низкой стоимости и простота реализации. Возможность использования рабочей жидкости в широком диапазоне температур и давлений. К тому же, данная система может работать в бинарном цикле как в высокотемпературной, так и в низкотемпературной областях.

Рассмотрим наиболее перспективные области применения систем с ОЦР.

2.1 Применение системы ОЦР с использованием солнечной энергии.

Солнечная энергия все чаще используется для генерации электричество. Однако есть и другие возможности для преобразования энергии солнечного излучения в электричество. Данный метод заключается в концентрации солнечного света с использованием изогнутых зеркал. Использование солнечной энергии для производства электроэнергии являются самым перспективным решением на сегодняшний день. Солнечные электростанции, работающие на низкокипящем теле, имеют сравнительное преимущества с фотоэлектрическими установками т.к. они оснащены более простыми солнечными концентраторами и системой для преобразования электрической энергии, которые подключены в цепь аккумуляторов и обеспечивает круглосуточную работу установки.

2.2 Применение системы ОЦР с использованием биомассы.

«Биомасса производится в больших количественных показателей. Одним из способов использования биомассы - производство энергии. Биотопливо имеет относительно низкую плотность. Двигатели с внешним источником энергии (как установка с органическим циклом Ренкина) вполне подходят для использования биотоплива. Стоимость биотоплива значительно ниже стоимости иско-

паемого топлива. Однако использование данного продукта не всегда оправдано с экономической точки зрения.

Для автономных источников электричества более целесообразно использовать биотопливо в цикле отопления с выработкой электроэнергии и получением тепловой энергии или в цикле тригенерации. Возможность получения тепла из ОЦР в качестве побочного продукта при производстве электроэнергии или при сжигании биотоплива, можно считать преимуществом. Полученное тепло может быть использовано для отопления помещений и в технических целях. Мощность установок по утилизации биомассы обычно не превышает 6-10 МВт, из которых около 1 - 2 МВт приходится на электроэнергию. Для таких мощностей использование традиционного паротурбинного цикла Ренкина нецелесообразно. Схема установки для утилизации биомассы в ОЦР показана на рисунке 2.1.

Тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании биотоплива, передается через теплообменник на промежуточный теплоноситель, который представляет собой термомасло, а температура в теплообменнике изменяется в диапазоне 150°С до 320°С. Затем тепловая энергия передается с помощью термомасла в ОЦР, где оно служит для испарения рабочей жидкости. Кроме того, рабочая жидкость в виде пара расширяется в турбине, проходит через рекуператор, нагревая рабочее тело в жидком состоянии, и охлаждается в конденсаторе. Нагретая вода, которая охлаждает рабочую жидкость в конденсаторе, может использоваться для бытовых целей. Чтобы минимизировать потери энергии продуктов сгорания биотоплива, желательно максимально охлаждать их потоком рабочей жидкости и поступающим воздухом.» [44]

«Перспективы использования твердого топлива из биомассы для работы ОЦР рассмотрены в [5]. В зависимости от типа сырья и используемой технологии топливо из биомассы может быть получено в другом фазовом состоянии: жидком, твердом и газообразном. Рекомендуется использовать биотопливо в форме гранул, которые получают из различных видов биомассы, например, из

древесины. Однако для выработки электроэнергии можно использовать не только биотопливо, но и биогаз - синтетический газ, состоящий в основном из CO , CO_2 , CH_4 и H_2 . В [2] даны оценки эффективности автономной биотопливной отопительной установки: около 18% химической энергии топлива преобразуется в электричество, около 70% идет на нагрев воды и только 12% выбрасывается в окружающую среду. с продуктами сгорания.» [44]

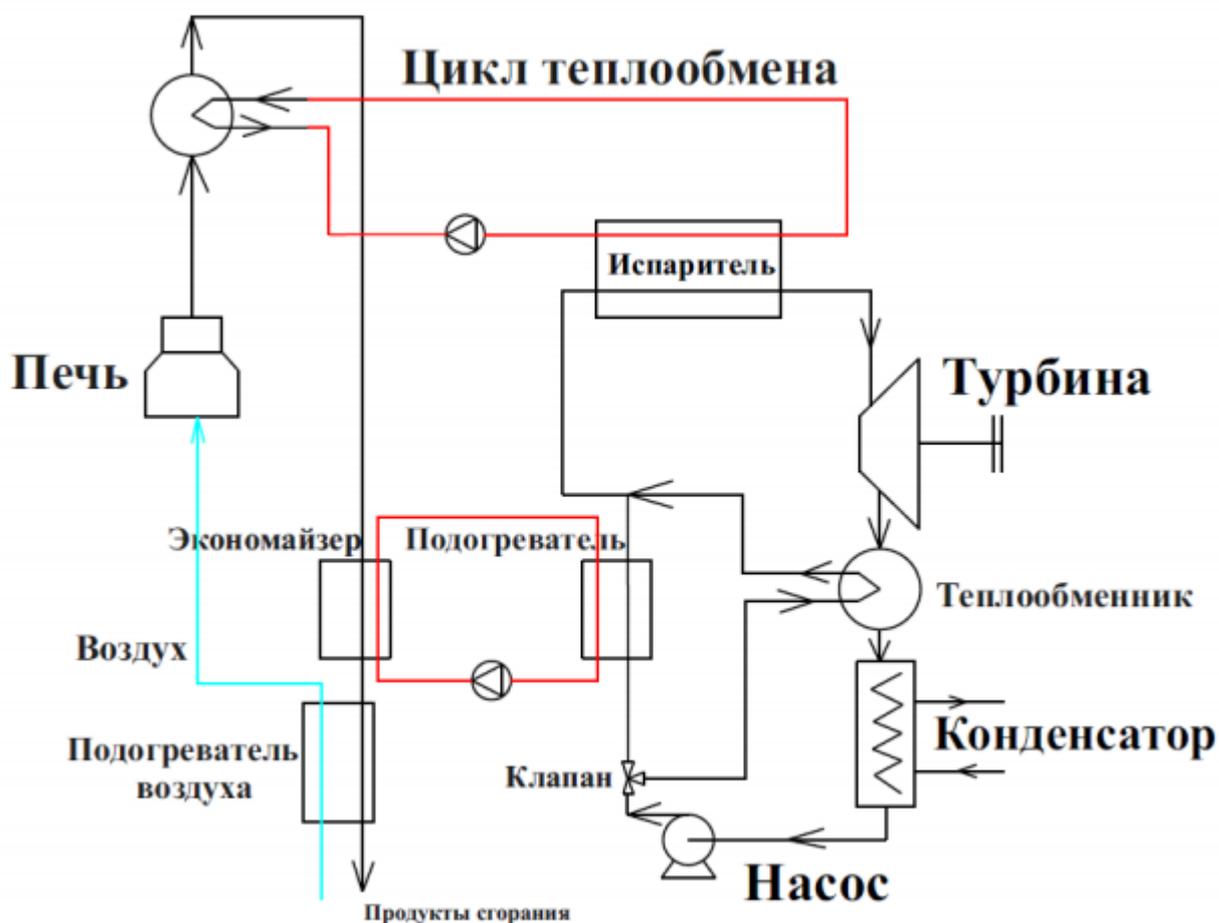


Рисунок 2.1 - Работа когенерационной установки

2.3 Применение системы ОЦР с использованием геотермальной энергии

Существует большое количество геотермальных источников. В некоторых случаях возможно непосредственное использование геотермального пара в турбине. Однако температура воды в источнике недостаточно высока, и здесь есть возможность использовать систему ОЦР. В настоящее время существует

несколько гидротермальных электростанций, использующих энергию низкоэнтальпийных гидротермальных источников, которые могут реализовать работу органического цикла Ренкина и цикла Калины.

Температура воды в геотермальном источнике различна, от нескольких десятков до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рисунок 2.2. Вода из источника закачивается в теплообменник, рабочее тело нагревается и испаряется, затем, вода закачивается обратно в землю.

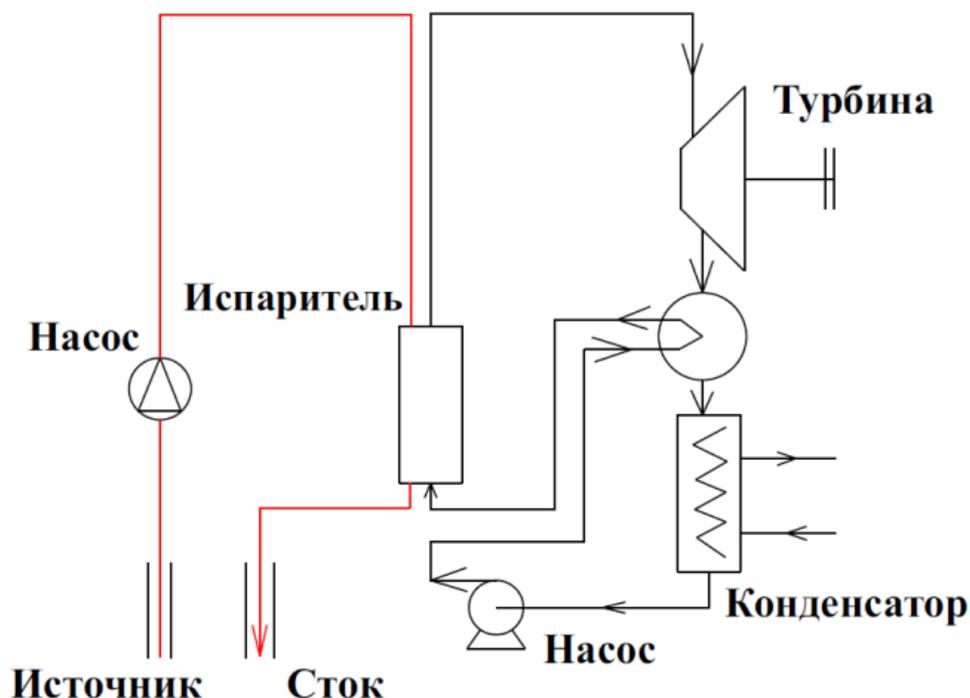


Рисунок 2.2 - Схема установки, использующая геотермальную энергию

2.4 Применение системы ОЦР с использованием тепловых отходов крупных предприятий.

«Промышленные предприятия выделяют большое количество тепловой энергии в окружающую среду наряду с потоком продуктов сгорания и теплоносителя при относительно низкой температуре. Это обстоятельство часто оказывает крайне неблагоприятное воздействие на окружающую среду, загрязняя ее и приводя к изменению климата. Кроме того, стоимость высвобождаемой энергии в конечном итоге определяется стоимостью производства. Как отмечено в

[1], если на ТЭЦ используется только 37% энергии топлива, это означает, что 63% этой энергии теряется навсегда. Поэтому в последние годы были приложены огромные усилия для утилизации тепловых отходов промышленных предприятий с возможностью выработки электроэнергии.

Многочисленные исследования показывают, что существует довольно много промышленных предприятий с неиспользованными запасами тепловой энергии. Например, производство цемента очень энергоемко. На этот сектор экономики приходится 12-15% общего количества энергии, потребляемой промышленностью, при этом до 15% энергии топлива рассеивается в окружающую среду. Температура продуктов сгорания на выходе из газовой турбины обычно превышает 400 ° С, нефтехимическая промышленность выделяет газы с температурой 150-300 ° С. В этом случае установка ОЦР также предоставляет возможность использовать оставшуюся тепловую энергию, однако, избавление от этих запасов, как правило, является непростой задачей.» [44]

2.5 Применение системы ОЦР с использованием тепловых отходов ДВС.

ДВС вырабатывают только около 30% энергии, выделяемой при механическом воздействии, от 15 до 30% энергии, излучаемой в окружающей среде через радиатор, остаточная энергия уносится из выхлопных газов при температуре от 400 ° С до 900 ° С. Применять данную энергию так же возможна в органическом цикле Ренкина. Идея для этой цели не нова. Еще в 1970-х годах была создана прототипная установка, при которой расход топлива составлял 12,5% [2]. Современные системы рециркуляции тепловых отходов ДВС позволяют использовать не только тепло выхлопных газов, но и тепловую энергию системы охлаждения. Как было отмечено в [2], благодаря использованию электрических установок удалось увеличить мощность двигателя на 19 кВт, при этом его КПД возросла с 27% до 33

«В работе [8] представлены моделирование низкотемпературной системы ОЦР с использованием тепловой энергии продуктов сгорания дизельного двигателя с использованием хладагент R245fa в качестве рабочей жидкости. Исследована работа комбинированной установки ОЦР с дизельным двигателем. Было установлено, что около 75% энергии выхлопных газов и 9,5% энергии охлаждающей воды можно превратить в полезную работу.

Обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований использования системы ОЦР для утилизации энергии продуктов сгорания двигателей внутреннего сгорания приведен в [10]. На основании экспериментов, проведенных авторами, было установлено, что использование двигателем вместе с системой ОЦР позволяет не только повысить степень использования энергии топлива, но и снизить в среднем содержание CO₂ и NO_x в выхлопных газах. 18%.» [44]

«Термоэлектрический генератор на основе эффекта Зеебека можно считать конкурирующим методом использования тепловой энергии продуктов сгорания. Его основными преимуществами являются простота, легкий вес и компактность по сравнению с установкой ОЦР. Однако для изготовления термоэлектрического генератора необходимо использовать дорогие материалы, содержащие редкоземельные металлы. Кроме того, считается, что такие генераторы характеризуются низкой эффективностью.

Существенной особенностью устройства для использования энергии продуктов сгорания двигателя являются ограничения на его, поскольку это устройство должно «вписываться» в предусмотренное для него пространство. Сравнение различных методов использования тепловой энергии продуктов сгорания двигателей приведено в [11]. Рассматривается история попыток использования системы ОЦР для этой цели. Авторы приходят к выводу, что лучшего со всех точек зрения способа утилизации тепловых отходов не существует. Утверждается, что во многих случаях система ОЦР являются очень конкурентоспособным способом их использования.» [44]

2.6 Использование системы ОЦР с бойлером

Внедрение бутанового контура в котельной позволяет создать когенерацию - одновременное производство тепловой и электрической энергии. В зависимости от потребителя мини-ТЭЦ может переключаться между режимами генерации как в направлении электричества, так и в направлении тепла, изменяя поток воды к испарителю бутана и подаче тепла. Эта схема показана на рисунке 2.3.

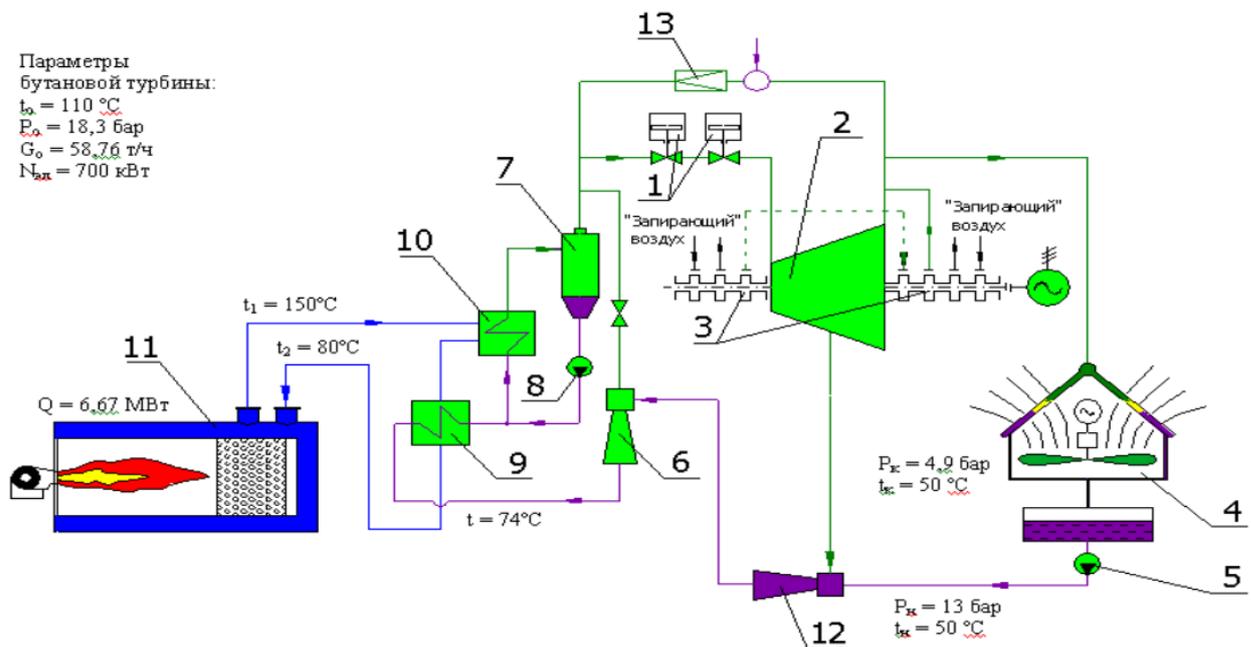


Рисунок 2.3 - Схема мини-ТЭЦ с бойлером и бутановым контуром: 1 - стопорные и регулирующие клапаны с пневматическим приводом; 2 - бутановая турбина; 3 - бутановые уплотнения; 4 - воздушный конденсатор; 5 - конденсатный насос; 6 - инжектор; 7 - сепаратор; 8 - насос сепараторный; 9 - бутановый обогреватель; 10 - испаритель бутана; 11 - водогрейный котел; 12 - смешительный бутановый нагреватель струйного типа; 13 - БРОУ

3 Экономический анализ установки с использованием ОЦР

Данный раздел определяет среднюю стоимости производства, при которой установки, работающие по технологии органического цикла Ренкина будет конкурентоспособной среди альтернативных производств электроэнергии. Данное исследование представлено для выяснения, является ли это экономично-эффективным инвестировать в систему ОЦР для различных областей применения. Средняя цена технологии ОЦР была оценена в сравнении с технологиями, доступными на рынке для производства электроэнергии. На рисунке 3.1 показана средняя стоимость установок используемые, ветряную энергию, солнечную энергию, двигатели внутреннего сгорания (ДВС), газовые и гидротурбины (рисунок 3.1)

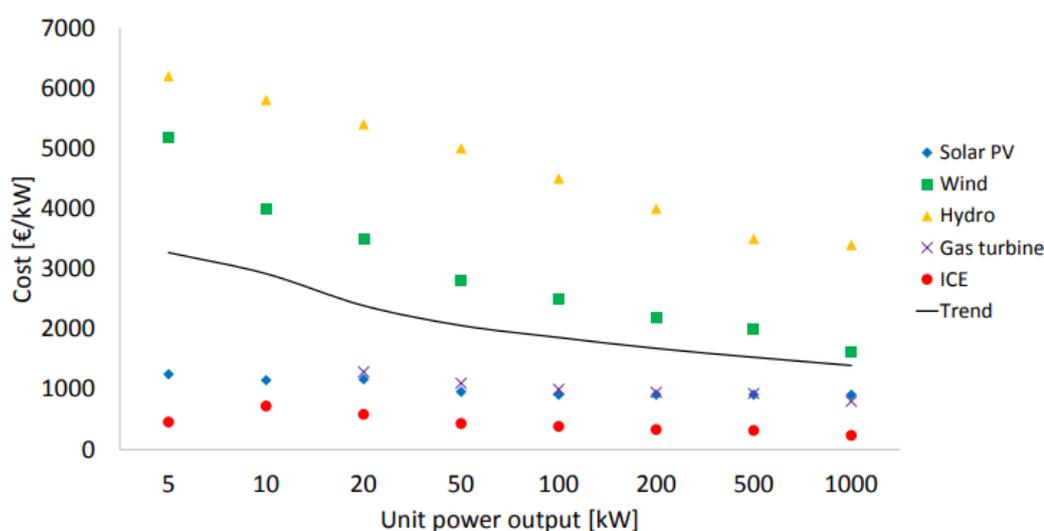


Рисунок 3.1 - Рыночная стоимость энергии для ОЦР (Рынок ЕС)

«Линия диаграммы на рисунке 3.1 представляет среднюю удельную стоимость среди всех технологий. Это даёт понять, что система ОЦР может быть конкурентоспособной, когда удельная стоимость производства падает ниже этой линии диаграммы. Основываясь на результатах, показанных на рисунке 3.1, удельная стоимость ОЦР не должны превышать значения 250000 руб. / кВт и 200000 руб. / кВт, соответственно, при диапазоне мощностей от 5 до 10 кВт и от 10 до 100 кВт. Обратите внимание, что технологии, удельные затраты кото-

рых ниже среднего значения, - это ДВС, газовые турбины и солнечная энергия. Возможно, все они имеют некоторые недостатки с использованием технологии ОЦР, например: газовые турбины и ДВС сжигают топливо для производства электроэнергии, выделяющий CO₂. Покупка топлива представляет собой дополнительные расходы на эксплуатацию таких установок, в то время как выбросы CO₂ лишают доступа к стимулам и увеличивают выбросы парниковых газов. С другой стороны, использование топлива не гарантируют непрерывное производство электроэнергии в течение дня и в течение года. Как правило, важным катализатором широкого распространения технологии ОЦР является цена на электроэнергию, т. е. цена, по которой отрасли покупают электроэнергию в сети. На самом деле, эти страны при которой удельная цена электроэнергии выше, гарантируется более привлекательный срок окупаемости. На рисунке 3.2 показана стоимость электроэнергии в европейских странах за период 2014–2016 гг.» [43]

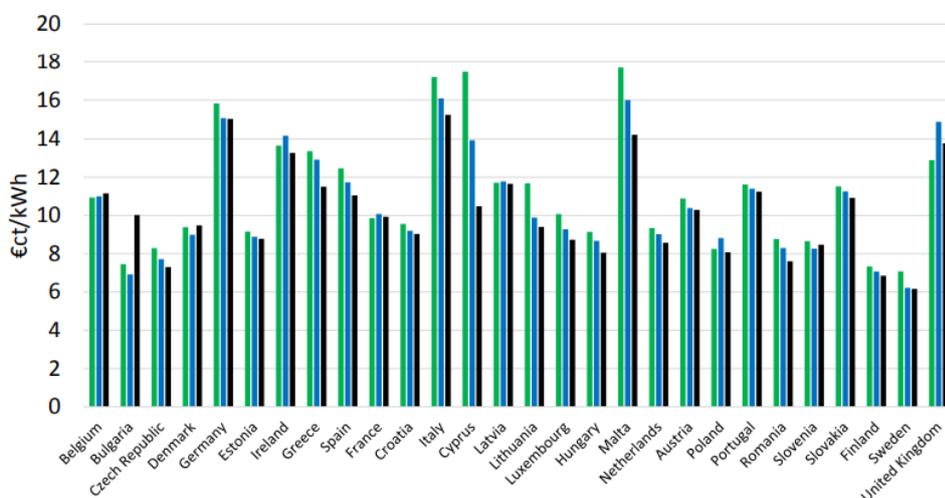


Рисунок 3.2 - Цены на электроэнергию для отраслей в европейских странах за 2014–2016 гг.

3.1 Стимулирование развития системы ОЦР на европейском рынке

Для систем, которые производят энергию за счет возобновляемых источников, например:

- 1) биомасса или биогаз
- 2) солнечная энергия
- 3) геотермальная энергия

Пользуются стимулами и субсидиями от государства, которые регламентируются Директивами 2009/28 / ЕС Европейского Парламента и Совета. А установки работающие за счет отработанных источников тепла, получают стимулы в рамках программ повышения энергоэффективности - Директивой 2012/27 / ЕС.

«Россия и Европейский союз привержен соблюдению Киотского протокола в целях контроля потребления энергии, увеличения доли возобновляемых источников энергии и повышения энергоэффективности. В соответствии с директивой 2009/28 / ЕС выгодно поддерживать этап демонстрации и коммерциализации децентрализованного производства возобновляемой энергии, поскольку благодаря таким инвестициям можно получить множество выгод. Европейский Совет установил обязательный целевой показатель 20% конечного потребления энергии из возобновляемых источников к 2020 году. С этой целью каждое из государств-членов должно разработать национальные планы действий (например, Национальный план действий по возобновляемой энергии, или Национальный план действий по энергоэффективности) с учетом собственных ресурсов. Европейская схема предоставляет следующие системы стимулирования:

- Входные тарифы (FiTs)
- Премияльные тарифы (FiP)
- Зеленые сертификаты / обязательства по квоте
- Инвестиционные стимулы
- Аукционы / тендеры

- Сетевой учет

Входной тариф (FiT) — это политика энергоснабжения для поощрения распространения технологий использования возобновляемых источников энергии. FiT обеспечивает заранее установленное соглашение о продаже электроэнергии, произведенной и поставленной в сеть, на определенный срок контракта (обычно 10–25 лет), что компенсирует дополнительные расходы, связанные с инвестициями в возобновляемые технологии. FiT не зависят от рыночной цены и обеспечивают поток доходов тем, кто устанавливает электростанции на основе производства энергии из возобновляемых источников. Предоставляемая финансовая поддержка зависит от типа технологии, размера проекта и страны. Например, стимулы для биогаза и биомассы предоставляются на основании нескольких факторов (например, качество, состав, установленная мощность). На рисунке 3.3 представлен спектр FiT для различной Европейской страны на 2016 год.» [43]

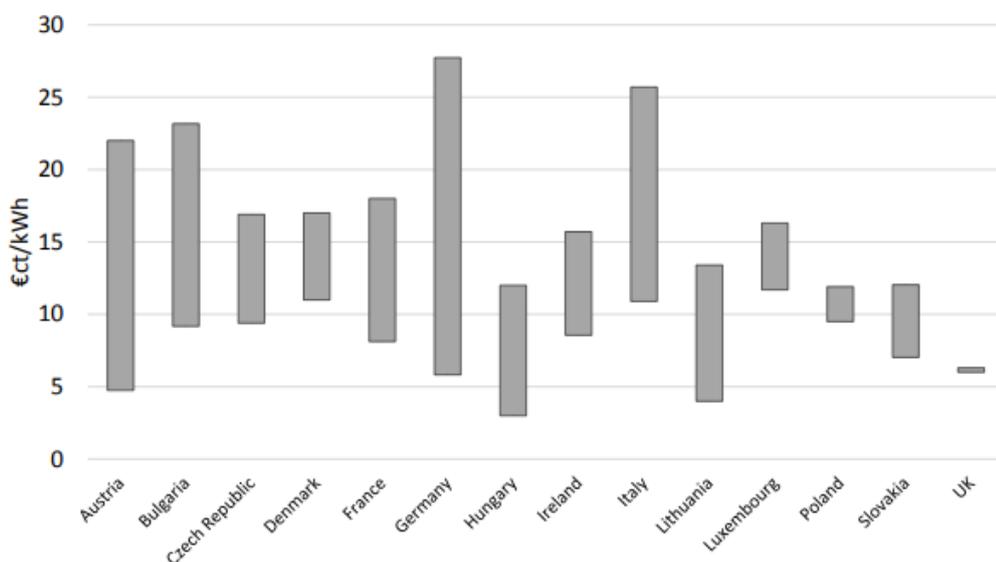


Рисунок 3.3 - Входные тарифы на 2016 год в европейских странах.

«На рисунке 3.3 показаны столбцы, представляющие диапазон стимулов, предоставляемых различными европейскими странами для тех, кто устанавливает заводы на основе технологий, отвечающих требованиям FiT. Более высо-

кие столбцы относятся к тем странам, которые предоставляют стимулы, отсортированные по принятой технологии использования возобновляемых источников энергии и размеру завода. Меньшие столбики относятся к тем странам, в которых стимулы не дифференцированы. Обращая внимание на то, что эти столбцы соответствуют европейским странам, которые поддерживают эту страну. Как видно из рисунка 3.3, некоторые страны представляют более сложные планы субсидий (например, Германия и Италия), чем другие (например, Великобритания и Польша). Общая сумма, предназначенная для вводных тарифных схем, пересчитывается ежегодно.

Премиальные тарифы предлагают премию сверх рыночной цены тем, кто производит электроэнергию из возобновляемых источников. В отличие от FiT, которые гарантируют предсказуемую отдачу от инвестиций независимо от колебаний цен на электроэнергию, премиальные тарифы по-прежнему подвержены колебаниям цен и, следовательно, стимулируют производство электроэнергии, когда спрос, выше всего.

Зеленые сертификаты выдаются для получения соответствующих возобновляемых источников энергии, производимых на основе энергии и, поставляемой в сеть. Поставщики энергии обязаны включать в себя специфичное количество возобновляемой электроэнергии (квоты) в своем портфолио. Приобретая зеленые сертификаты у производителей возобновляемой энергии, они могут выполнить это требование.» [43]

Инвестиционные стимулы включают субсидии, а также процентные ставки по долгосрочным кредитам для возобновляемых проектов. В таблице 3.1 приведены инвестиционные стимулы, предоставляемые различными европейскими странами.

«Аукционы представляют собой альтернативу FiT. Новые электростанции, основанные на возобновляемых технологиях (например, биомасса, солнечная энергия, геотермальная энергия и т. д.), могут извлечь выгоду из FiT. Существующие электростанции могут получать субсидии через аукционы.

Таблица 3.1 - Стимулы по инвестиционной стоимости

Страна	Стоимость покрытия (%)	Сумма вознаграждения (т. руб.)	Примечание
Бельгия	6–45	620 - 11800	Мин. инвестирование 590-2000т. руб.
Финляндия	35-45	-	-
Чешская республика	40–65	28350	-
Болгария	15–65	455	-
Франция	20-40	78000-39370	-
Германия	35	-	Мин. Инвестирование 2300т. руб.
Италия	25	-	-
Латвия	-	15700	-
Литва	80	1570-11800	-
Люксембург	40-45	-	-
Польша	100	-	Мин. Инвестирование 3500-8900т. руб. 40кВт
Румыния	50	15700	Только собственное потребление
Словения	50	1570	-

Операторы одновременно подают закрытые заявки для получения субсидий на определенную выделенную мощность. Победитель, предложивший самую низкую цену, получает дополнительное вознаграждение, которое сумми-

руется с ценой, по которой энергосистема оплачивает электричество. Таким образом, наиболее рентабельные проекты - награждаются.

Сетевой учет - это схема поддержки, для которой вырабатываемое электричество возвращается в сеть и компенсирует потребление. В случае избыточного производства возмещение не производится, но оно может быть перенесено на следующий расчетный период.

На рисунке 3.4 показана стоимость электроэнергии и цена, по которой владелец электростанции может продать электричество, произведенное в сеть в отсутствие стимулов в 2016 году в нескольких европейских странах.» [43]

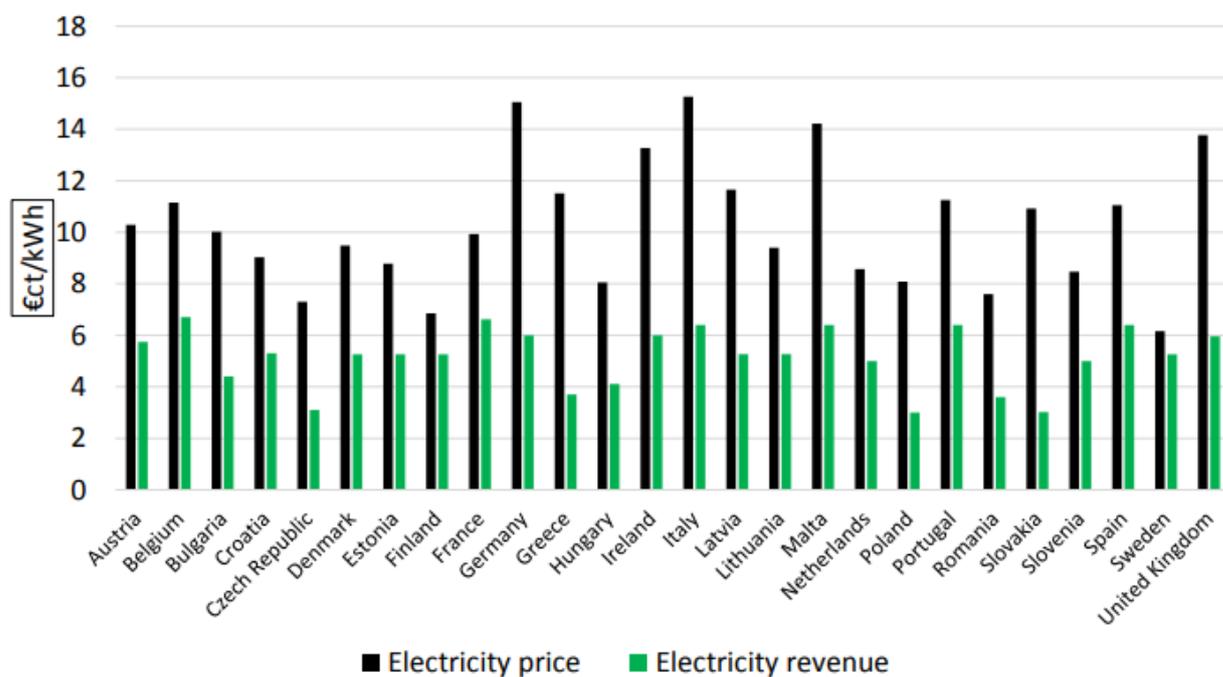


Рисунок 3.4 - 2016, цена на электроэнергию и выручка

В данной главе были проанализированы страны: Великобритания, Франция, Германия и Италия. Однако рассуждения могут быть легко распространены на разные страны ЕС. Относительно случая 3, то для каждой проанализированной страны было рассмотрено среднее значение подачи в тарифах, представленное на рисунке 3.3. В частности, для Италии, Германии, Великобритании и Франции были выбраны 1500т. руб. / кВт-ч, 1300т. руб. / кВт-ч, 624т. руб.

/ кВт-ч и 746 т руб./кВт-ч соответственно. Кроме того, Соединенное Королевство предоставляет дополнительную выгоду в 455 т. руб./ кВт-ч для конечных пользователей, которые экспортируют энергию в сеть, что было включено в расчеты. Предполагается, что установка ОЦР работает 85% времени, что соответствует 7446 ч./год. Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (ЭиТО) считаются равными 236 т. руб. / кВт. Временная стоимость денег и альтернативная стоимость были оценены с использованием ставки дисконтирования 4%. Кроме того, уровень инфляции 2% был рассмотрен. Таким образом, что расчетная номинальная ставка дисконтирования составляет 6,08%. В анализе по затратам на систему ОЦР мощностью 375 кВт считает, что затраты на интеграцию составляют 11% от общей стоимости установки. Влияние затрат на установку уменьшается с размером производства. Следует отметить, что затраты на интеграцию не были включены в это исследование, в первую очередь потому, что они сильно зависят от установки и источника тепла, с которым будет связан система ОЦР. Компании систем ОЦР стремятся создать полунезависимые системы ОЦР для малой мощности, эффективно минимизируя затраты на установку. Высокий уровень коммерческой «зрелости» для небольших систем ОЦР, скорее всего, будет достигнут благодаря приложениям, которые требуют небольшой настройки и обеспечивают большие объемы продаж. Такие применения включают утилизацию отработанного тепла от ДВС и газовых турбин, где затраты на интеграцию, вероятно, будут ниже. Вместо этого типичные крупномасштабные системы ОЦР были применены к заявлениям, которые требуют высоких уровней настройки, таких как геотермальное и промышленное отработанное тепло, где затраты на интеграцию неизбежно будут значительно выше по вышеупомянутым причинам, хотя такие затраты для коммерческих систем могут достигать до 10%. Затраты на установку не учитываются в текущем анализе.

Считается, что компании устанавливают установку ОЦР по определенной стоимости, указанной на рисунке 3.1, и продают ее по цене, которая гарантиру-

ет конечному пользователю срок окупаемости в три года. Поэтому выручка для компаний рассчитывается как разница между ценой, по которой они продают установку конечному пользователю, и стоимостью производства, определенной с использованием данных на рисунке 3.1.

Рисунок 3.5 а – d сообщает о результатах анализа.

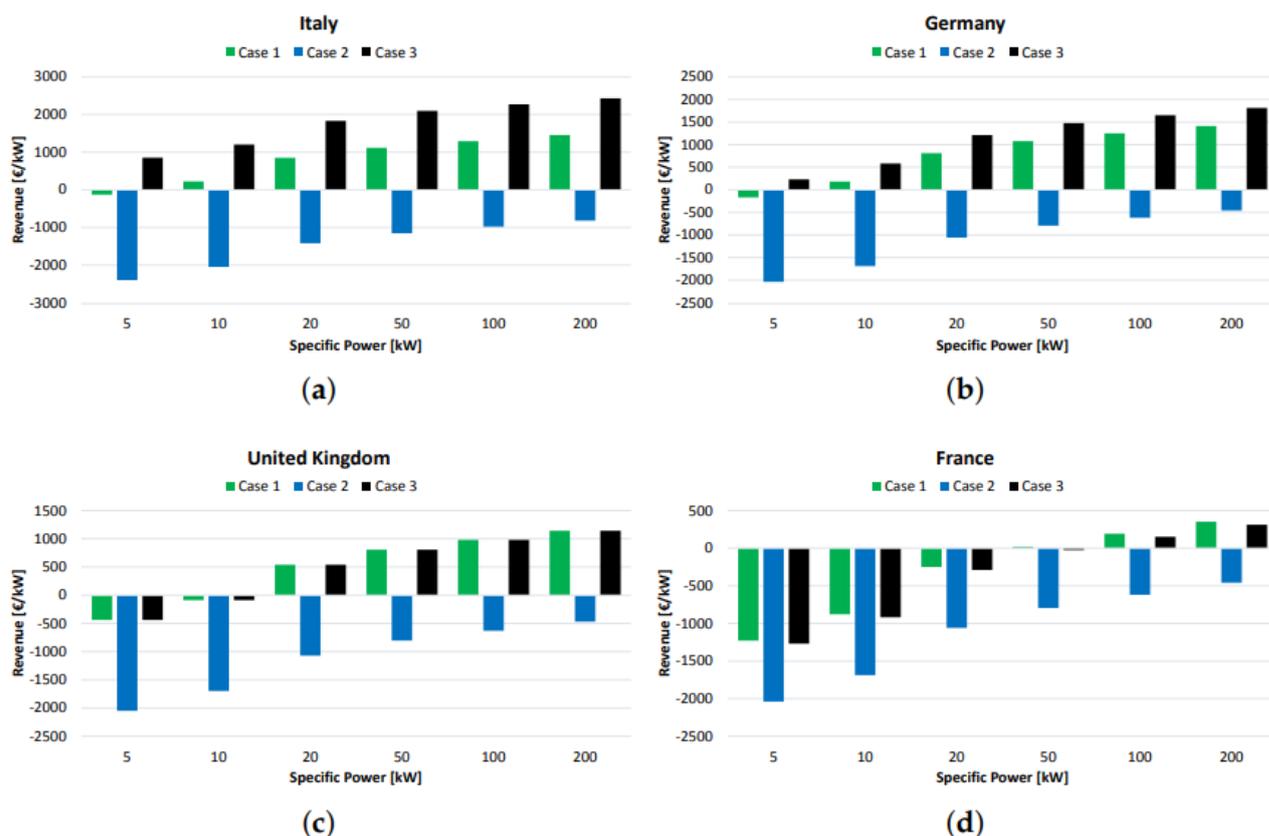


Рисунок 3.5. Доходы от установки завода с ОЦР в Италии (а); Германии (б); Великобритании (с) и Франции (d) с трехлетним периодом окупаемости для конечного пользователя.

Как и ожидалось, доход для компаний с ОЦР больше в тех странах, где цена на электроэнергию и стимулы выше. На рисунке 3.5 показан минимальный размер завода, при котором доход гарантируется компании с ОЦР, если она преуспеет в создании системы по удельной стоимости, определенной линией диаграммы на рисунке 3.1. Каждый случай теперь будет анализироваться независимо: в случае 1 доход, полученный компанией с ОЦР, рассчитывается с уче-

том первоначальных инвестиционных затрат на основе данных, изображенных на рисунке 3.1. Предполагая, что установка ОЦР работает 7446 ч / год и что конечный пользователь экономит сумму денег, которая зависит от стоимости электроэнергии в стране интереса (см. рисунок 3.4), выручка рассчитывается как разница между актуализированной экономией на счетах за электроэнергию в первые три года эксплуатации завода и первоначальные инвестиционные затраты. Например, в Италии, Германии и Великобритании, компании, занимающиеся системами ОЦР выиграет от производства установок с выходной мощностью более 10 кВт (см. рисунок 3.5 а – с), в то время как во Франции компания не получит прибыли от установки системы ОЦР с выходной мощностью ниже 100 кВт (см. рисунок 2.5 d). Фактически, стоимость электроэнергии во Франции ниже, чем в других странах, в отношении которых ведется исследование (см. Рисунок 3.4), что приводит к снижению экономии на счетах за электроэнергию.

В случае 2, рассматривается установка системы ОЦР для производства электроэнергии из выхлопных газов стационарного двигателя. Предполагалось, что произведенная электроэнергия будет продана обратно в сеть по цене, указанной на рисунке 3.4. Учитывая, что установка ОЦР работает в течение трехлетнего периода окупаемости 7446 ч / год, выручка для компании с ОЦР рассчитывается как разница между фактическим доходом, полученным от продажи электроэнергии, произведенной в сеть, и первоначальными инвестиционными затратами. Ни одна из проанализированных стран не позволяет компаниям с ОЦР получать доход от инвестиционной схемы, как описано в случае 2, когда выходная мощность ОЦР ниже 200 кВт (см. Рисунок 3.5 a-d). Можно сделать вывод, что существующая схема стимулирования должна быть улучшена, чтобы заставить компании ORC инвестировать в рекуперацию отработанного тепла для производства энергии для продажи в сеть. Например, выручка от продажи электроэнергии в сеть может быть увеличена относительно текущих значений, показанных на рисунке 3.4.

Случай 3 исследует установку систем ОЦР, связанных с возобновляемыми источниками энергии. Когда система используется для выработки энергии, произведенной из возобновляемого источника, конечный пользователь получает выгоду от FiT. Следовательно, можно рассчитать доход для компании с ОЦР как разницу между доходом, полученным в первые три года, и первоначальной инвестиционной стоимостью. Как показано на Рисунке 3.5 a-d, установка систем ОЦР для применения, которые даёт право на FiT, приводит к наибольшему доходу для компаний с ОЦР среди проанализированных вариантов. В Италии и Германии, где стоимость электроэнергии высока (см. Рисунок 3.4), установка систем ОЦР гарантирует компании доход, когда выходная мощность превышает 5 кВт. В Соединенном Королевстве удобно устанавливать ОЦР по схеме стимулирования FiT, если выработка электроэнергии станцией превышает 20 кВт. Наконец, во Франции вариант не является экономически эффективным для производства электроэнергии ниже 100 кВт.

3.2 Анализ рынка систем ОЦР

В разделе 3.1 сообщалось об относительном преимуществе инвестиций в технологии ОЦР в зависимости от местоположения и схемы окупаемости. В разделе 3.2 сообщается о компаниях, которые в настоящее время участвуют в разработке и коммерциализации такой системы для производства электроэнергии в небольшом диапазоне, то есть ниже 100 кВт.

В таблице 3.2 приведен список существующих компаний с ОЦР в небольшом ассортименте. Следует отметить, что все компании, которые известны были включены; однако можно ожидать, что этот список не может быть всеобъемлющим.

Компании Turboden, Ormat и Enertime разрабатывают установки которые работают на ОЦР и вырабатывают мегаваттную мощность, и не хотят расширять свой продукт в сторону мелкого рынка. Это является доказательством того, что сокращение масштабов этой технологии не является прямым шагом в её развитие.

Таблица 3.2 показывает, что компании пытаются получить конкурентное преимущество за счет разработки специальных расширителей.

Несмотря большой список компаний, которые занимаются производством систем на ОРЦ в таблице 3.2, большинство из них все еще разрабатывают прототипы. Причина в том, что конкретные затраты, изображенные на рисунке 3.1, представляют собой труднодостижимую цель.

В разделах 3 и 4 описаны методы, предложенные в литературе для выбора оптимального рабочего тела и расширителя. Приведенный ниже анализ не имеет цели быть окончательным или представить оригинальные результаты. Цель разделов 3 и 4 - предоставить нынешнее состояние технологии ОРЦ в небольших приложениях.

Таблица 3.2 - Список мелких производителей систем ОЦР

Название компании	Страна	Мощность (кВт)	Тип расширителя	Источник тепла T (° C)	Примечания
Exergy	Италия	90-240	Центробежный	-	Коммерческий
Triogen	Нидерланды	150	Аксиальный	150-300	Патент на детандер в сочетании с насосом
Enogia	Франция	15-25-45-100	Центробежный	90-400	Коммерческая турбина в сочетании с высокоскоростным генератором
Rainbow	Франция	100	Аксиальный	-	Экспандер 12–15 об / мин, КПД > 80%
Entropea Labs	Украина	30-310	Центробежный	300-500	Прототип
ElectraTherm	США	40-70-120	Винт	80-130	Коммерческий индукционный асинхронный генератор бесщёточный
Zuccato Energia	Италия	40-50-60	Центробежный	Вода T > 94	Коммерческий, синхронный генератор 15 об / мин, керамические подшипники
GE clean energy	США	130	Центробежный	150	Коммерческий, R 245fa, частота вращения 26,5 об / мин, магнитные подшипники

Продолжение таблицы 3.2

Infinity turbine	США	10–40–90	Центробежный	<110	Жидкость R 245fa, магнитные подшипники
Pratt and Whitney	США	80–260	Центробежный	91–149	R 245fa, 2-полюсная индукционная машина
Termo 2 Power	Польша	<300	Кулачковый компрессор	-	Прототип, 1,5–3 об / мин, самовозбуждающийся синхронный генератор
Calnetix	США	125	Аксиальный	Low	24,5 об / мин, магнитные подшипники
Mattei	Италия	3	Лопастной компрессор	80–150	-
Rank	Испания	50–100	Центробежный	85–140	Срок окупаемости 2–5 лет
EXA	Италия	15–150	Поршень / винт	70–350	Жидкости R 134, R 245fa, Толуол, Индукционный генератор
NewComen	Италия	3–120	-	-	-
Orgap	Германия	20	Центробежный	550	-
ConPower	Германия	13–75	-	-	Прототип

Продолжение таблицы 3.2

Clean power	США	77	Спиральный	270	Скорость детандера 1,5–1,8 об / мин, жидкость R 245fa
ZE	Великобритания	95–130	Многоступенчатый центробежный	-	Генератор с постоянными магнитами
ICENOVA	Италия	10–30	Спиральный	150	R 245fa, Регенерированный цикл
Climeon	Швеция	150	Турбинный	70–120	-
Echoes	Франция	15	Поршневой	-	Транспортные приложения
E-rational	Бельгия	<500	Одно-винтовой	105–150	Асинхронный генератор
Orson	Швеция	<800	Турбинный	250	-

4 Выбор рабочей жидкости

Выбор рабочей жидкости является важным пунктом при проектировании установки для органического цикла Ренкина, т.к. это зависит от многих факторов, в частности, от источника энергии, давления установки, её мощности и диапазона рабочих температур установки. Вопросы выбора рабочей жидкости рассматривались во многих работах, например, [5, 11–15]. В большинстве случаев модель термодинамического цикла используется для сравнения характеристик перспективных рабочих жидкостей. Более того, основным критерием сравнения часто является термический КПД цикла, который существенно зависит от физико-химических свойств рабочего тела.

К сожалению, трудно однозначно сказать, какие именно свойства вещества оказывают наибольшее влияние на эффективность цикла. В общем случае при выборе рабочей жидкости следует учитывать следующие соображения.

1) Для данного диапазона рабочих температур удельная работа цикла должна быть максимальной. Желательно, чтобы теплота испарения рабочего тела была как можно выше.

2) Низкая вязкость жидкой и паровой фаз должна обеспечивать низкие потери на трение и большое значение коэффициента теплопередачи.

3) Высокая теплопроводность рабочего тела обеспечит эффективный нагрев и охлаждение в теплообменниках.

4) Давление насыщенных паров рабочего тела в цикле Ренкина не должно быть слишком большим или очень небольшим, так как в противном случае могут возникнуть проблемы с созданием вакуума и обеспечением прочности и герметичности трубопроводов и фитингов.

5) Важным требованием к рабочей жидкости является термическая стабильность при высоких температурах. К сожалению, многие органические соединения подвергаются химическим превращениям при нагревании, их свойства также изменяются.

6) Вещество не должно замерзать во всем диапазоне рабочих температур. Поэтому тройная точка рабочего тела должна лежать ниже самой низкой температуры цикла.

7) Рабочая жидкость не должна быть токсичной и легковоспламеняющейся, а ее попадание в окружающую среду не должно вызывать загрязнение.

8) Желательно, чтобы рабочая жидкость была недорогой и легко доступной. В этом отношении вещества, используемые в холодильной промышленности, являются хорошими кандидатами на роль рабочей жидкости в органическом цикле Ренкина.

«Основными преимуществами воды как рабочей жидкости являются доступность, низкая цена, экологичность, вода нетоксична, не горюча, химически устойчива, имеет низкую вязкость. Основными недостатками воды можно считать необходимость в нагревателе с высокой температурой, высоким давлением в цикле, использование цикла Ренкина на водяных парах экономически целесообразно только для установок сравнительно высокой мощности.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что при выборе рабочей жидкости для реализации в ОЦР нельзя исходить только из соображений термического КПД. Проблема выбора оптимального вещества является многокритериальной; он был подробно рассмотрен в ряде работ, см., например, [16, 17]. В частности, также необходимо учитывать площадь теплообменника, размеры турбины, стоимость установки и стоимость ее эксплуатации. Таким образом, экономические соображения могут привести к совершенно другим характеристикам рабочего тела, отличным от тех, которые получены по результатам термодинамического анализа.

Несмотря на то, что в литературе было рассмотрено довольно много веществ, которые в принципе могут быть использованы в системе ОЦР, только некоторые из них используются на коммерческих предприятиях, ра-

ботающих на ОЦР. К ним относятся HFC-134a, HFC-245fa, OMTS (октамети-лтрисилоксан), толуол, Solkatherm (азеотропный раствор).

В работе [12] приведены результаты анализа возможностей использования более 30 веществ (алканов, фторированных алканов, простых и фторированных простых эфиров) в интервале температур 30–100 °С, характерного для геотермальных источников энергии. представил. В статье [14] были исследованы возможности использования 20 веществ в КРО с максимальной температурой, не превышающей 75 °С.

Использование твердого биотоплива для установок, работающих на КРО, имеет некоторые особенности. Эксплуатационные характеристики перспективных рабочих жидкостей для таких установок проанализированы в [13]. Максимальная температура цикла колеблется от 250 °С до 350 °С. Следует отметить, что анализ учитывал тепловой КПД цикла и максимальное количество используемой тепловой энергии. Некоторые характерные температуры для установки, работающей на твердом биотопливе, согласно FES приведены в таблице 4.1, [13]. Высокая температура рабочей жидкости в конденсаторе (последний ряд таблицы) позволяет нагревать воду для технических целей. Было установлено, что для установок, работающих в указанном температурном диапазоне, максимальное давление лежит в области 9-15 бар. Для этого диапазона параметров наилучшую эффективность цикла можно получить, используя в качестве рабочей жидкости вещества из семейства алкилбензолов.» [44]

Таблица 4.1 Температуры системы ОЦР на твердом биотопливе.

Температура пламени	1200К
Максимальная температура термомасла	630К
Максимальная температура рабочего жидкости в системе ОЦР	600К
Температура в конденсаторе	370К

На рисунке 4.1 представлена работа, которая подчеркивает, что выбирать рабочее тело нужно в зависимости от температуры источника тепла. Выбор рабочего тела так же влияет на размер установки, её стоимости и на термодинамические характеристики. Поэтому его правильный выбор имеет решающее значение на этапе проектирования установки ОЦР.

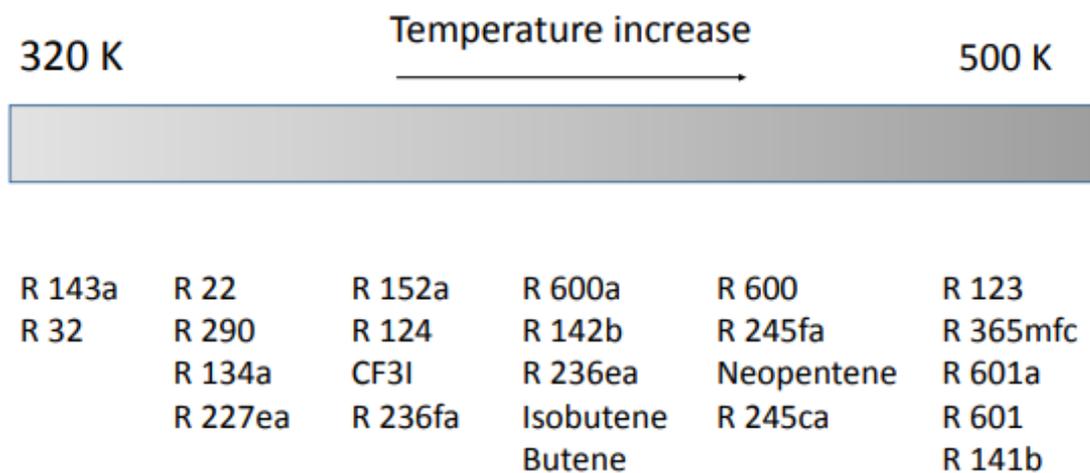


Рисунок 4.1 - Оптимальный выбор рабочей жидкости в зависимости от температуры источника тепла

Цель этого раздела – это влияние рабочего тела на конструкцию установки ОЦР и предоставить распространенные методологии, выбора рабочего тела.

Жидкостные рабочие тела можно разбить на две группы

1) основываться на химическом составе, где органические соединения классифицируются как линейные силоксаны, простые эфиры, алканы, фторированные алканы, фторсодержащие ароматические соединения

2) основываясь на наклоне кривой насыщенного пара, в которой рабочие тела делятся на влажные, изотропные и сухие..

«Сухие и изэнтропические рабочие жидкости, по нескольким причинам, должны быть предпочтительными в применении органического цикла Ренкина. В отличие от влажных жидкостей, сухие и изоэнтропические жидкости могут оставаться в паровой фазе в течение всего процесса расширения,

что позволяет избежать эрозии лопаток. Кроме того, сухие и изоэнтропийные жидкости позволяют минимизировать уровень перегрева, что снижает общую поверхность теплопередачи, что, в свою очередь, снижает стоимость системы. Но, использование чрезвычайно сухой рабочей жидкости подразумевает необходимость повторного цикла для улучшения производительности системы, что может увеличить размер и стоимость установки. Можно сделать вывод, что существует компромисс между производительностью и стоимостью, который сильно зависит от выбора типа органической жидкости.» [43]

Дополнительная классификация продиктовано государственными регулирующими органами. Стремительный рост популярности органических привел к постепенному прекращению использования небезопасных жидкостей, опасных для людей и окружающей среды. GWP (Потенциал глобального потепления) и ODP (Потенциал истощения озонового слоя) измеряют воздействие жидкостей на окружающую среду [22]. Национальная ассоциация противопожарной защиты (NFPA) разработала систему для количественной оценки риска здоровью, воспламеняемости и реактивности для химических веществ, обычно используемых в промышленности [23]. ASHRAE (Американское общество инженеров по отоплению, холодильной технике и кондиционированию воздуха) опубликовало несколько справочников, предлагающих рекомендации по выбору надлежащих технических жидкостей [24].

Хладогент R236ea показал хорошую производительность среди множества рассматриваемых жидкостей. Некоторые, исследовали зеотропные смеси с помощью стационарного анализа, чтобы понять, могут ли они дать какое-либо преимущество. Подбор тела, для использование их в ОЦР усложняет конструкцию компонентов, так как во время изменения фазы в теплообменниках следует избегать фракционирования жидкости

Динамические модели характеризуют поведение системы в переходных условиях. Этот цикл анализа важен для применения в транспортных средствах или в солнечной батарее. Динамическое поведение систем ОЦР зависит

от рассматриваемого рабочего тела в которой свойства теплопередающей органической жидкости играют важную роль в использовании динамики системы. Т.е. теплообменные свойства жидкости напрямую влияют на конструктив конденсатора. Рабочие жидкости, имеющие достаточно хорошую теплоизоляционную характеристику, позволяют размещать компактные теплообменники, из-за чего повысится производительность и уменьшится вес. Быстро реагирующие системы имеют решающее значение в условиях, когда источник тепла подвергается рабочим циклам и поэтому не имеет постоянных термодинамических условий. Несколько рабочих процессов направлены на определение правильной стратегии управления, чтобы максимизировать производственную систему в течение всего рабочего цикла из источника тепла. Было предложено динамическая модель для изучения поведения небольших ОЦР для применений утилизации тепла. Особое внимание было уделено переходному поведению теплообменников для разработки надлежащей системы управления. Сравнивались методы перемещения границы и конечного объема при проектировании теплообменников для применений ОЦР. Так же было изучено многопараметрическая стратегия управления для системы ОЦР мощностью 100 кВт.

В некоторых работах рассматривается анализ методом «черного ящика», в котором система ОЦР изучается на уровне процесса. Метод черного ящика - Тестирование черного ящика оценивает систему исключительно извне, в то время как оператор или тестировщик не знает, что происходит внутри системы, чтобы генерировать ответы на тестовые действия. Черный ящик относится к системе, чье поведение должно полностью контролироваться входами и выходами. Даже если внутренняя структура рассматриваемого приложения понятна, тестировщик предпочитает игнорировать ее.

«Был использован анализ [31] «черного ящика» для моделирования двойного цикла ОЦР для морских применений. Это подразумевает, что выбранные термодинамические параметры могут отрицательно повлиять на конструкцию компонентов. По этой причине некоторые авторы предложили

методы, в которых выбор термодинамических параметров связан с ограничениями, возникающими из практических ограничений в конструкции компонентов. Кроме того, в некоторых работах рассматривались модели термоэкономической оптимизации [33, 34]. В таких моделях исследователи определяют, какие компоненты более ответственны за высокую удельную стоимость небольших систем ОЦР. Лишь несколько работ посвящены процедурам выбора жидкости, основанным на одновременной оптимизации термодинамических характеристик и конструкции компонентов. Сравним методы скрининга и методы работы с картами как наиболее распространенные из рассмотренных в литературе. Они утверждают, что методы скрининга наиболее часто используются в литературе и что они могут вводить в заблуждение в процессе выбора жидкости. Методы рабочей карты имеют дело с взаимодействием между рабочей жидкостью и типом расширителя. Оно рассматривает турбину с радиальным притоком, винтовую и спиральный компрессор.» [43]

Сделав выводы по обзорам различной литературы, можно выделить общие рекомендации, чтобы подчеркнуть те свойства рабочей жидкости, которые влияют на удельную стоимость небольших установок ОЦР. Цена: поскольку органические жидкости дороги (1500–2300 руб. / кг), важно найти правильный компромисс между стоимостью и производительностью. Как правило, жидкости, используемые на действующих заводах с ОЦР системой, широко используются в других областях, что снижает их цену. Плотность: если плотность жидкости будет низкая, это может привести к высокой скорости потока, что скажется на компонентах системы. Чем выше объемный расход - тем больше габариты компонентов и их стоимость. Давление конденсации: высокое давление конденсации приводит к увеличению общего давления в системе и стоимости компонентов. Давление ниже 0,4 бар приводит к росту затрат на уплотнение. Кроме того, более низкие давления увеличивают размер конденсатора. Точка критического замерзания рабочего тела: что бы предотвратить это, температура замерзания должна быть ниже минимальной температуры окружающей среды в периоды бездействия установки. Давле-

ние в верхней части цикла: необходимо поддерживать давление в верхней части цикла ниже критического давления жидкости. Это необходимо для предотвращения образования нестабильности при испарении. Низкое давление позволяет использовать менее дорогие материалы. Коэффициент теплопередачи: это может сыграть решающую роль в размере и стоимости теплообменников. Выбор органического соединения с хорошими свойствами теплопередачи приводит к уменьшению общего размера, веса и стоимости системы установки.

4.1 Принцип выбора рабочей жидкости для органического цикла Ренкина на основе экологических выгод и экономических показателей

В настоящее время возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, геотермальная и ветровая энергия, а также потери тепла в широком спектре отраслей промышленности, все чаще рассматриваются в качестве источников энергии, которые могут помочь удовлетворить мировой спрос. Отработанное тепло часто находится при относительно низких температурах, что делает очень трудным преобразование такого тепла в электрическую энергию с помощью традиционных методов. В результате многие потенциальные источники тепла теряются. Исследования о том, как преобразовать такие тепловые ресурсы в электроэнергию, продолжаются.

Принципы работы для циклов Ренкина на органической и паровой основе аналогичны. Основным отличием является выбор рабочей жидкости. Хладагенты, такие как бутан, пентан, гексан и силиконовое масло, которые имеют более низкие температуры кипения, чем вода, могут использоваться в качестве рабочих жидкостей в органических циклах Ренкина. Эти жидкости нагреваются с помощью низкотемпературного тепла, такого как регенерированное отработанное тепло, и имеют свойства, которые во многих отношениях отличаются от свойств воды.

Существует множество поставщиков оборудования с ОЦР. Ormat и Turboden производят установки для утилизации отработанного тепла для

различных отраслей промышленности (нефть и газ, биомасса, энергия, упаковка, цемент и стекло). В последние годы шведские компании Uron AB и Entrans установили несколько циклов органического Ренкина в Швеции. Uron AB разработала технологию Uron Power Box, которая вырабатывает электроэнергию из отработанного тепла. Циклы органического Ренкина общей мощностью более 1800 МВт установлены сегодня во всем мире, большинство из которых связаны с комбинированными источниками тепла и энергии из биомассы (ТЭЦ) и геотермальными источниками тепла [3].

Базовая конфигурация и термодинамические принципы парового и органического циклов Ренкина аналогичны, но рабочие жидкости с термодинамическими свойствами, которые лучше всего подходят для источника тепла, выбираются для каждой системы отдельно. ОЦР имеют многочисленные преимущества по сравнению с обычными системами производства электроэнергии:

- 1) Применение при более низких температурах
- 2) Низкие затраты на эксплуатацию и обслуживание
- 3) Компактность
- 4) Нет потребления воды в некоторых моделях
- 5) Меньшие расширители с более высокими скоростями вращения
- 6) Тихая работа
- 7) Простые процедуры запуска / остановки

Другое преимущество органических рабочих жидкостей состоит в том, что турбина в ОЦР требует одноступенчатого расширителя. Это делает органические циклы более простыми и экономичными. Применение ОЦР включают следующее:

- 1) Биомасса
- 2) Геотермальная энергия
- 3) Солнечная
- 4) Рекуперация тепла

Наклон кривой насыщения для органических рабочих жидкостей может быть положительным (изопентан), отрицательным (R22) или вертикальным (R11). Эти жидкости называются «влажными», «сухими» и «изэнтропическими» жидкостями соответственно. Влажные жидкости (вода) обычно должны быть перегреты для выработки электроэнергии. Другие органические жидкости сухого или изоэнтропического типа не требуют перегрева.

Много исследований было проведено на органических циклах Ренкина и их рабочих жидкостях. Была исследована эффективность ОЦР с использованием бензола, аммиака, R11, R12, R134a и R113 в качестве рабочих жидкостей. Из этого можно понять, что изоэнтропийные жидкости являются наиболее подходящими для регенерации низкотемпературного отходящего тепла. Было проведено многочисленные исследования различных жидкостей в системах ОЦР. Например, система ОЦР с использованием ГХФУ-123 в качестве рабочей жидкости имеет лучшую эффективность, чем система, использующая воду в качестве рабочей жидкости.

Оценка эффективности и оптимизации ОЦР с использованием ГФУ-245fa (3-пентафторпропан) в качестве рабочей жидкости, который был приведен в действие отработанным теплом. Это дало понять, что использование тепла отработавших газов является хорошим способом улучшить выходную мощность и эффективность системы. Было исследовано 31 чистое вещество в качестве рабочей жидкости для органических циклов Ренкина. Придя к выводу, что ОЦР обычно работают при температуре от 100 до 300 °C для геотермальных электростанций при давлениях, в основном ограниченных до 20 бар, но в некоторых случаях также учитываются сверхкритические давления. В случае процессов с докритическим давлением необходимо идентифицировать: является ли форма линии насыщенного пара на диаграмме T-s колоколообразной или выступающей; является ли пар, поступающий в турбину, насыщенным или перегретым.

Кроме того, для случая, когда пар, выходящий из турбины, перегрет, может использоваться внутренний теплообменник (ИНЕ). Наибольшая тепло-

вая эффективность получена для высокотемпературных кипящих веществ с нависающей линией насыщенных паров в докритических процессах в ИНЕ, например, для н-бутана, термическая эффективность составляет 0,130. С другой стороны, пинч-анализ теплопередачи для теплоносителя с максимальной температурой 120 °С к рабочей жидкости показывает, что наибольшее количество тепла может быть передано в сверхкритическую жидкость и, по меньшей мере, в докритическую высокую температуру кипения жидкости.

4.2 Общий анализ выбора рабочей жидкости для различных источников тепла.

В таблице 4.3, показан тип химического состава рабочего тела в зависимости от температуры испарения и конденсации. Для большинства вариантов, которые используют тепло от производственных процессов при температуре источника тепла 80-150 °С, рекомендуется использовать фреон R142b (C2F2ClH3), т.к. он малоопасный и малотоксичный хладагент, используемый в качестве хладагента как для бытовых, так и для промышленных низкотемпературные установки

Таблица 4.3 - Рабочие жидкости для разных систем

Источник тепла	Температура конденсатора	Температура испарителя	Рабочая жидкость	Рекомендуемая рабочая жидкость
Утилизация тепла	30-50	120	R11, R114, R113, R142b	R142b, R113
Утилизация тепла	30	150-200	HFE 7100, RC123, Тoluол, бензол, п-ксилол	Тoluол, RC123, Бензол
Холодильная промышленность	55	60-150	H ₂ O, RC123, R142b, R245fa, R245ca, R152a, изопентан, бутан, изобутан,	H ₂ O, R142b, R245ca, Изобутан
Когенерация	90	250-350	R123, PF5050, аммиак, OMTS, бутил-бензол, пропилен-бензол, этилбензол, толуол	Бутил-бензол
Геотермальная	30	100	Эфиры, фтороэфиры, алканы, фтор- алканы,	R142b, R245ca, R245fa, R601, RE133, R245, R600
Геотермальная	25	80-115	R227ea, RC318, R236fa, R142b, R245fa, пропилен, изобутан	R227ea, R245fa, R142b, пропилен

Продолжение таблицы 4.3

Утилизация тепла	25	100-250	R113, R123, R142b, R245fa, изобу- тан	R113, R142b
Солнечная энергия	35	60-100	R245, R600, R245fa, R245ca, R601 R290	R152a, R600, R290
Солнечная энергия	45	120-230	H ₂ O, н-пентан	Н-пентан
Утилизация тепла	25	145	R11, RC123, R141B, R142b, H ₂ O, NH ₄ , бутан, изобутан	R142b, бутан
Утилизация тепла	50	80-220	RC123, R113, R600a, R245fa	R113, RC123
Когенерация	50	170	R12, R141b, R365mfc, гептан, пен- тан, этанол	этанол
Холодильная про- мышленность	76	100-270	R124 R134a, R1234yf, R245fa, R600, R600a	R134a
Холодильная про- мышленность	95	120-300	R125, R143a, R218	R134a
Геотермальная	30	150	R1234zeZ, R1234zf, R1225yeE, R1225zc, R1234yeE, R1225yeZ, R1234yf, R1234zeE	R1234yf, R1225yeE

Продолжение таблицы 4.3

Утилизация тепла	20-35	150	R113/R245fa, R245fa, R236ea R245fa/R152a, R245fa/R600a, R601a/R600a,	R113, R245fa, R245fa, R600a
Холодильная промышленность	35	96-221	R11, R134, бензол	Бензол
Утилизация тепла	15	120	R245fa, R134a, R227ea, R290, R600a, R601	R600a/R601
Утилизация тепла	27-87	327	R113, R11, R141b, R114, RC123, R245fa, R245ca, R236ea, бутан	R11, R113, RC123, R245fa, R245ca
Солнечная энергия	30	150	R134a, R142b, R245fa, SES36, н- пентан	R134a, R142b, R245fa

4.3 Пример системы ОЦР для выбора рабочей жидкости

На рисунке 4.2 показан регенеративный органический цикл Ренкина, рассмотренный в анализе. Он состоит из котла, детандера, регенератора, конденсатора и насоса. В теплообменнике регенератора тепло передается между высокотемпературным паром на выходе детандера и низкотемпературной жидкостью на выходе насоса, чтобы избежать потери энергии. Причина этого заключается в том, что при использовании изэнтропической или сухой жидкости выходной поток детандера перегревается. В зависимости от рабочей жидкости и коэффициента давления расширителя эта температура выше, чем у потока, выходящего из насоса. После того, как рабочая жидкость покидает регенератор, она поступает в котел и поглощает тепло от источника тепла. Фаза рабочей жидкости варьируется от переохлажденной жидкости до насыщенного или перегретого пара. Затем насыщенный или перегретый пар проходит через расширитель, связанный с электрическим генератором, который преобразует энергию пара в электрическую энергию. Рабочая жидкость, выходящая из теплообменника, попадает в конденсатор, где тепло отводится в окружающую среду. Рабочая жидкость конденсируется, и тепло отводится в радиатор.

Следующие допущения используются для упрощения анализа:

- 1) КПД генератора постоянен на уровне 85%.
- 2) Температура на входе детандера постоянна и составляет $110\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3) Изэнтропическая эффективность насоса постоянна на уровне 85%.
- 4) Температура и давление окружающей среды приняты равными $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $101,325\text{ кПа}$ соответственно.
- 5) Потери тепла от турбины, трубопровода и насоса незначительны.
- 6) Теплообменник имеет эффективность 0,8.
- 7) Разница температур между состояниями 3 и 4 составляет $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 8) Температура источника тепла составляет $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поскольку система разработана для многих типов низкотемпературных источников тепла, таких

как солнечное или промышленное тепло, температура источника тепла в этом исследовании считается $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9) Система находится в устойчивом состоянии.

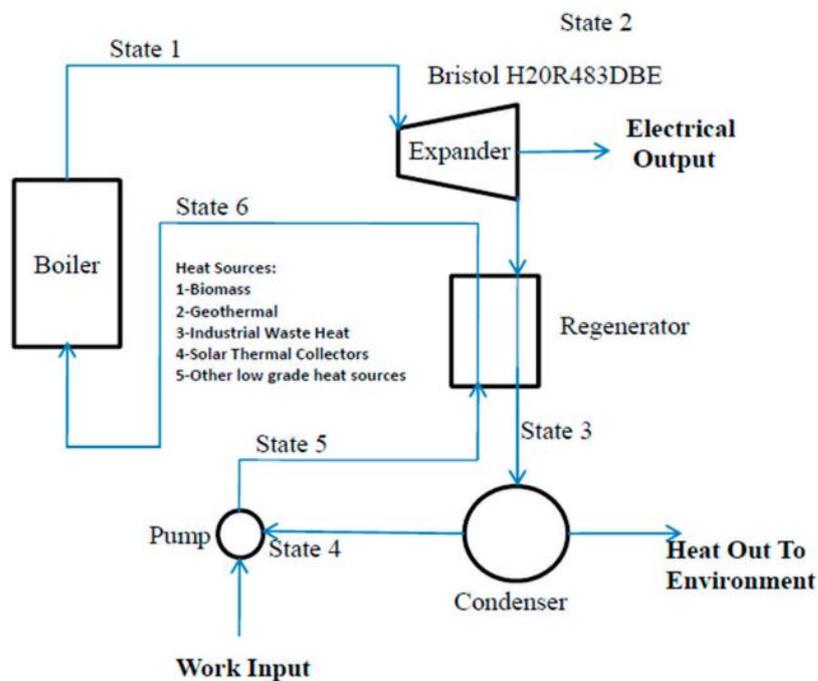


Рисунок 4.2 - Схема регенеративного органического цикла Ренкина.

4.3.1 Выбор рабочей жидкости

Выбор рабочей жидкости является одним из наиболее важных соображений при проектировании ОЦР. Для выбора рабочей жидкости необходимо учитывать несколько критериев: устойчивость окружающей среды, потенциал истощения озонового слоя (ПИО), потенциал глобального потепления (ПГП), безопасность (негорючий, нетоксичный и неагрессивный), давление пара в котле, критическая температура и термостойкость. Девять рабочих жидкостей выбраны для анализа поведения цикла ОЦР. В таблице 4.2 приведены основные свойства для выбранных рабочих жидкостей.

Таблица 4.2 - Основные свойства рабочих жидкостей.

Жидкость	Критическая температура (°C)	Критическое давление (кПа)	Плотность (kg/m ³)	Температура парообразования (kJ/kg)
R134a	101	4059	4.258	217
R227ea	102.8	2999	7.148	137.7
R245fa	154	3651	5.718	196
R123	183.68	3668	1464	170.6
R600	151.98	3796	2.441	358
Толуол	318.6	4216	862.2	361.3
Изобутан	134.7	3640	2.44	165.5
Изопентан	187.2	3370	614.5	342.5
Н-пентан	196.5	3364	620.8	358

Для оптимизации системы в качестве целевых функций выбраны два независимых параметра. В этом случае оптимизируемой функцией является эффективность эксергии, а двумя независимыми переменными являются отношение давления (Pr) и степень перегрева (Tsh). Функция эксергетической эффективности может быть не связана напрямую с отношением давления и степенью перегрева, но эти две переменные заметно влияют на выходную мощность и количество требуемого тепла. Эти две характеристики влияют на эффективность эксергии, поскольку она зависит как от выходной электрической работы, так и от подводимой теплоты. На рисунках 4.3 и 4.4 показаны значения Tsh и Pr , оптимизированные для каждой из рабочих жидкостей. Все сухие жидкости (например, R227ea, R134a, н-пентан и R123) в соответствии с указанными ограничениями требуют более высокой температуры перегрева, которая находится вблизи предела, указанного для системы. Это ограничение

связано с ограничениями температуры конденсатора, которая принята равной 30 °C.

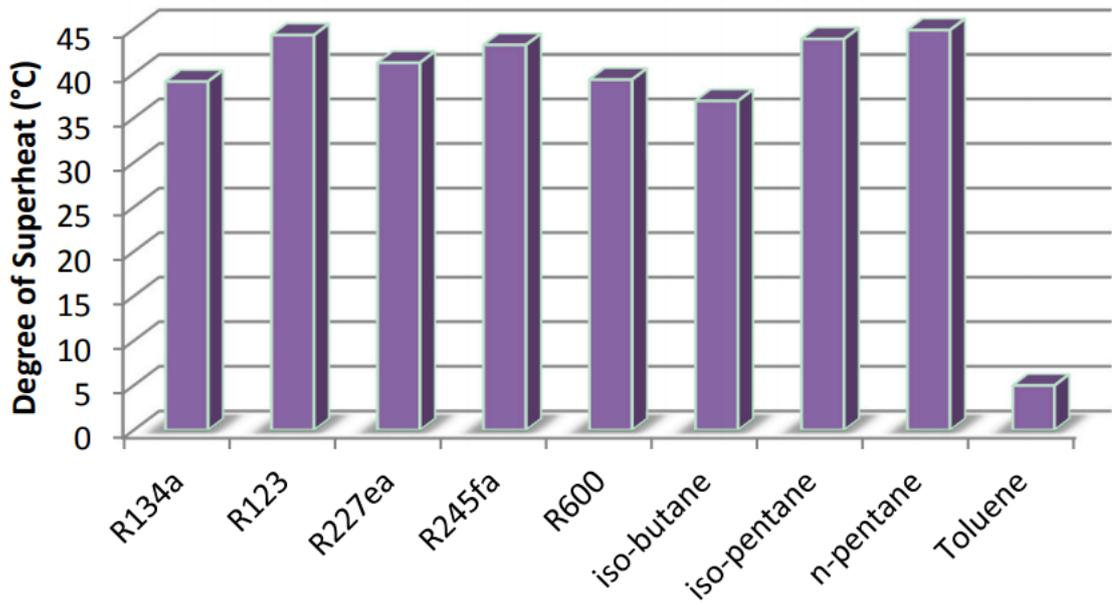


Рисунок 4.3 - Оптимизированные значения степени перегрева для рассматриваемых рабочих жидкостей.

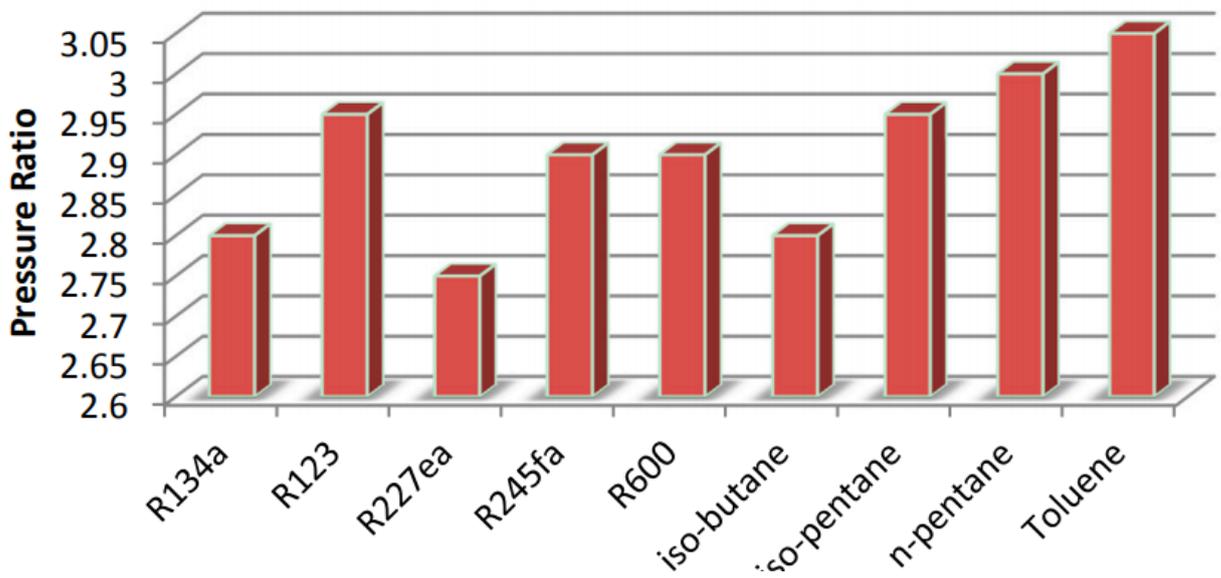


Рисунок 4.4 - Оптимизированные значения коэффициента давления для рассматриваемых рабочих жидкостей.

Н-пентан имеет самую высокую степень перегрева ($44,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), а толуол - самую низкую ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Коэффициент давления варьируется от 2,75 для R227ea до 3,3 для воды. Повышение изэнтропической эффективности приводит к увеличению выходной мощности, что увеличивает эффективность эксергии системы. В зависимости от рабочей жидкости более высокая степень перегрева может повысить изэнтропическую эффективность. Когда перегрев увеличивается, отношение давления слегка увеличивается для большинства жидкостей. Эффективность эксергии системы для различных рабочих жидкостей показана на рисунке 4.5, где значения варьируются от 15,4% для толуола до 21,9% для изобутана. Системы, использующие рабочие жидкости изобутан, R600 и R134a, имеют наивысшую эффективность эксергии.

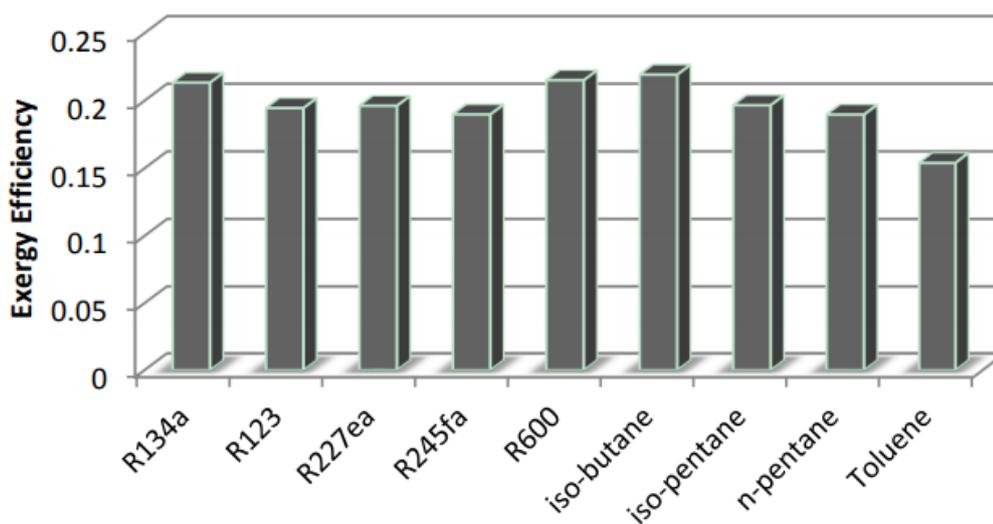


Рисунок 4.5 - Эффективность эксергии системы для различных рабочих жидкостей.

В рисунке 4.6 для оптимальных условий представлены значения эксергетической эффективности, энергетической эффективности, изэнтропической эффективности, коэффициента затрат на электроэнергию, выходной мощности, скорости вращения детандера, разности давлений и входного тепла системы.

Fluid	η_{ex} % Exergy Efficiency	η_{th} % Thermal Efficiency	η_s % Isentropic Efficiency	c_e (USD/kWh)	\dot{W}_{elec} (kW)	Ω (RPM)	ΔP (kPa)	\dot{Q}_{inb} (kW)
R134a	21	6.1	52	0.08	0.40	3917	1389.3	7.70
R123	19	5.5	52	0.49	0.06	655	222	1.30
R227ea	20	5.6	51	0.15	0.20	3053	920.7	4.30
R245fa	19	5.4	52	0.29	0.10	684.9	366	2.28
R600	22	6.1	51	0.14	0.23	1021	539	4.35
Iso-butane	22	6.2	52	0.10	0.30	1009	745.5	5.70
Iso-pentane	20	5.6	51	0.36	0.084	939	212.5	1.76
n-pentane	19	5.4	50	0.46	0.065	937	165.3	1.43
Toluene	15	4.4	50	1.43	0.021	836	58.3	0.56

Рисунок 4.6 - Оптимизированные значения термодинамических параметров для различных рабочих жидкостей.

Поскольку эффективность эксэргии является функцией выхода электрической работы и подводимой теплоты, эффективность энергии можно считать максимизированной, когда эффективность эксэргии максимальна, так как они зависят от одних и тех же переменных. Самая низкая энергоэффективность наблюдается для толуола рабочей жидкости (4,4%), а самая высокая - для изобутана (6,2%). Системы, использующие R600 и R134a, показывают относительно высокую энергоэффективность, обе - около 6,1%. Жидкости R600 и R134a подходят для использования в органических циклах Ренкина, поскольку они обеспечивают наилучшую эффективность в анализируемых условиях.

Изоэнтروпическая эффективность расширительной машины важна при определении количества полезной эффективности работы, которую он производит. Более низкая изоэнтропическая эффективность означает, что создаёт значительные потери внутри. По мере расширения жидкости потенциальная работа вместо этого теряется при преодолении потерь на трение и утечку. Изоэнтропическая эффективность для большинства рассматриваемых рабочих жидкостей находится на максимальном уровне или близка к нему при данных условиях. Изоэнтропическая эффективность считается максимальной, если давление после секции изохорического давления совпадает с дав-

лением в теплообменнике. Эти дополнительные процессы приносят необратимость, поскольку они не способствуют полезной работе. Высокие отношения давления приводят к дополнительной утечке, поскольку массовый расход утечки является функцией входного и выходного давлений. Системный расширитель, использующий R134a, имеет самую высокую изоэнтропическую эффективность (52%), в то время как тот, который использует н-пентан, имеет самую низкую (50,3%). Эти значения являются относительно низкими и предполагают, что расширительная машина будет иметь значительные потери из-за трения и утечки.

Из эксерго-экономического анализа себестоимость единицы электроэнергии рассчитывается с оптимизированными результатами. Результаты полезны при определении того, какая жидкость имеет самую низкую удельную электрическую выходную стоимость. Согласно рисунку 4.6, толуол и R123 имеют удельные затраты на электроэнергию, равные 79 руб. / кВт ч. и 34 руб. / кВт ч., соответственно, которые являются самыми высокими из всех рассмотренных рабочих жидкостей. Системы, использующие R134a, изобутан и R600, демонстрируют самые низкие удельные затраты на электроэнергию со значениями 5.55, 0.7 и 0.97 руб. / кВт ч. соответственно. Эти затраты отражают самую низкую цену, которая должна взиматься за электроэнергию, и существенно зависят от объема производства работ. Рабочие жидкости с наивысшей удельной стоимостью за электроэнергию имеют наименьшую электрическую производительность. И наоборот, рабочие жидкости с самыми высокими электрическими рабочими выходами имеют самые низкие тарифы на электроэнергию. Например, системы, использующие R134a, изобутан и R600, вырабатывают 396,7, 301,7 и 226 Вт электроэнергии соответственно, тогда как системы, использующие толуол и R123, вырабатывают 20,8 и 61,3 Вт электроэнергии соответственно.

Разница в давлении от впуска к выпуску для расширительной машины играет большую роль в определении его рабочей производительности. Поскольку крутящий момент, создаваемый расширителем, напрямую связан с

этой разницей давления, полезно проанализировать этот эффект, чтобы помочь объяснить результаты работы систем, использующих каждую рабочую жидкость. Расширитель, использующий R134a, имеет самую высокую разность давлений (1389 кПа), а толуол - самую низкую (58,3 кПа). Другие рабочие жидкости, такие как R123 и н-пентан, имеют низкую разность давлений, что соответствует низкой выходной электрической мощности. Скорость работы на выходе также соответствует скорости подачи тепла, необходимой системе. Системы, использующие рабочие жидкости, которые приводят к высокой рабочей производительности, такие как R134a и изобутан, имеют высокие тепловые затраты. Система, использующая R134a, требует мощности подводимого тепла почти 7,7 кВт для выработки 396,7 Вт электроэнергии. Наименьшая тепловая мощность требуется для системы, использующей толуол, для которой требуется тепловая мощность 560 Вт для выработки 20,8 Вт электроэнергии.

4.4 Анализ эксэргии

Таблица 4.4 показывает разбивку по эксергетическому разрушению для системы для каждого рассматриваемого рабочего тела. Коэффициент эксергетического разрушения для всей системы, использующей R134a, составляет 1,3 кВт. Большая часть эксергетического разрушения происходит в источнике тепла (котле) (59,7%) и происходит из-за необратимых процессов теплопередачи в этом компоненте. Экспандер несет ответственность за почти 32% разрушения эксэргии. Эти результаты предполагают, что потенциалы улучшения для этих компонентов велики. Эта большая доля эксергетического разрушения в детандере является следствием низкой изоэнтропической эффективности детандера - 52%. Крупномасштабные системы обычно имеют более высокую изэнтропическую эффективность расширителя, приближаясь к 80-90%.

Таблица 4.4 - Процент разрушения эксергии рабочего тела

Рабочая жидкость	Разрушение эксергии (% от общего количества в системе)				
	Источник тепла (котёл)	Экспандер	Теплообменник	Насос	Регенератор
R134a	59.67	32.18	0.3	0.61	7.25
R123	65.44	25.76	0.35	0.08	8.37
R227ea	56.31	29.14	0.66	0.53	13.38
R245fa	64.53	25.99	0.09	0.13	9.25
R600	59.77	30.79	0.28	0.24	8.92
Изо-бутан	57.91	32.07	0.25	0.39	9.37
Изо-пентан	63.16	26.46	0.25	0.09	10.04
Н-пентан	64.16	25.61	0.58	0.06	9.59
Толулен	44.54	49.85	1.05	0.04	4.52

Различные жидкости тестируются, чтобы определить наиболее эффективную, для рассматриваемого применения. Толуол рабочей жидкости демонстрирует низкую производительность в этой системе из-за низкого перепада давления в расширителе по сравнению с системами использующие другие жидкости. R134a и изобутан показывают многообещающие результаты для использования в качестве рабочих жидкостей в системе ОЦР и позволяют получать высокую выходную мощность. Считается, что выходная электрическая мощность является важной, поскольку она напрямую коррелирует с уровнем затрат на ее производство. Эффективность эксергии для систем, использующих R134a и изобутан, составляет 21,3% и 21,9% соответственно, и большая часть потерь эксергии происходит в котле и детандере для всех

рабочих жидкостей. Система, использующая R134a, имеет самую низкую стоимость затрат на электроэнергию: 5 руб. / кВт ч. при наименьших затратах на подачу топлива и 7 руб. / кВт ч. при самых высоких затратах на топливо. Результаты исследования показывают, что системы, использующие R134a и изобутан, имеют наивысшую энергетическую и эксергетическую эффективность при температуре источника тепла 120 ° С.

5 Выбор детандера

Выбор подходящего расширителя для небольших значений мощности представляет собой нерешенную проблему. В литературных обзорах о небольших расширителях предлагаются различные конфигурации [35].

Как видно из Таблицы 3.5, компании пытаются развивать рынок расширительных машин своими силами, предлагая свои разработки. Это показано в [35], что коммерческому рынку не хватает подходящих расширителей для небольших установок.

Расширители можно разделить на две основные группы: объемные и турбодетандеры. Спиральные, винтовые и лопастные расширители являются наиболее распространенными машинами среди объемных.

Турбокомпрессорные и осевые турбины являются наиболее распространенными турбомашинами. В отличие от объемных машин, турбомашинны удобны, но они имеют низкую выходную мощность из-за высокой скорости вращения, которая приводящие к отказам подшипников.

Существует экспериментальная модель [39], связанная с радиальной турбиной для применений ОЦР с использованием R 245fa в качестве рабочей жидкости. Максимальная эффективность, достигнутая в ходе экспериментальной кампании, составила 78,7%, а максимальная выходная мощность - 32,7 кВт.

В диапазоне 20–50 кВт двухвинтовой компрессор являются наиболее перспективными. Этот вид объемной расширительной машины обеспечивает эффективность 70% при работе на низкой скорости. Такие небольшие ОЦР-системы могут быть установлены по цене около 117000. Руб. – 156000 руб. / кВт.

На рисунке 5.1 представлен график, который дает руководство по выбору правильного расширителя на основе конкретной скорости (N_s) и определенного диаметра (D_s).

«На рисунке 5.1 параметры N_s и D_s рассчитаны как функция объемного расхода (V_3) и падения энтальпии адиабатического расширителя (H_{ad}). Различные типы расширителей обеспечивают оптимальные рабочие характеристики в определенных диапазонах безразмерных параметров N_s и D_s . Например, поршневые расширители хорошо работают, когда рассчитаны на низкие значения удельной скорости (0,01–0,1), тогда как оптимальное значение N_s для радиальных турбин находится в диапазоне 30–300.» [43]

Несколько работ включают экспериментальное исследование небольших систем ОЦР. На рисунке 5.2 показаны характеристики экспериментальных установок, установленных по всему миру.

Рисунок 5.2 а-с подчеркивает, что большинство испытательных стендов находятся в диапазоне 1-10 кВт. В соответствии с рисунком 5.1, большинство экспериментальных установок имеют объемные расширительные машины. Верхнее давление цикла и коэффициент объемного расширения в большинстве случаев низки. Представленные результаты свидетельствуют о том, что эффективность объемных машин лежит в диапазоне 60–80%.

На рисунке 5.3 классифицируются экспериментальные испытательные стенды, показанные на рисунке 5.2, и коммерческие установки, представленные в таблице 5.2, в зависимости от типа детандера.

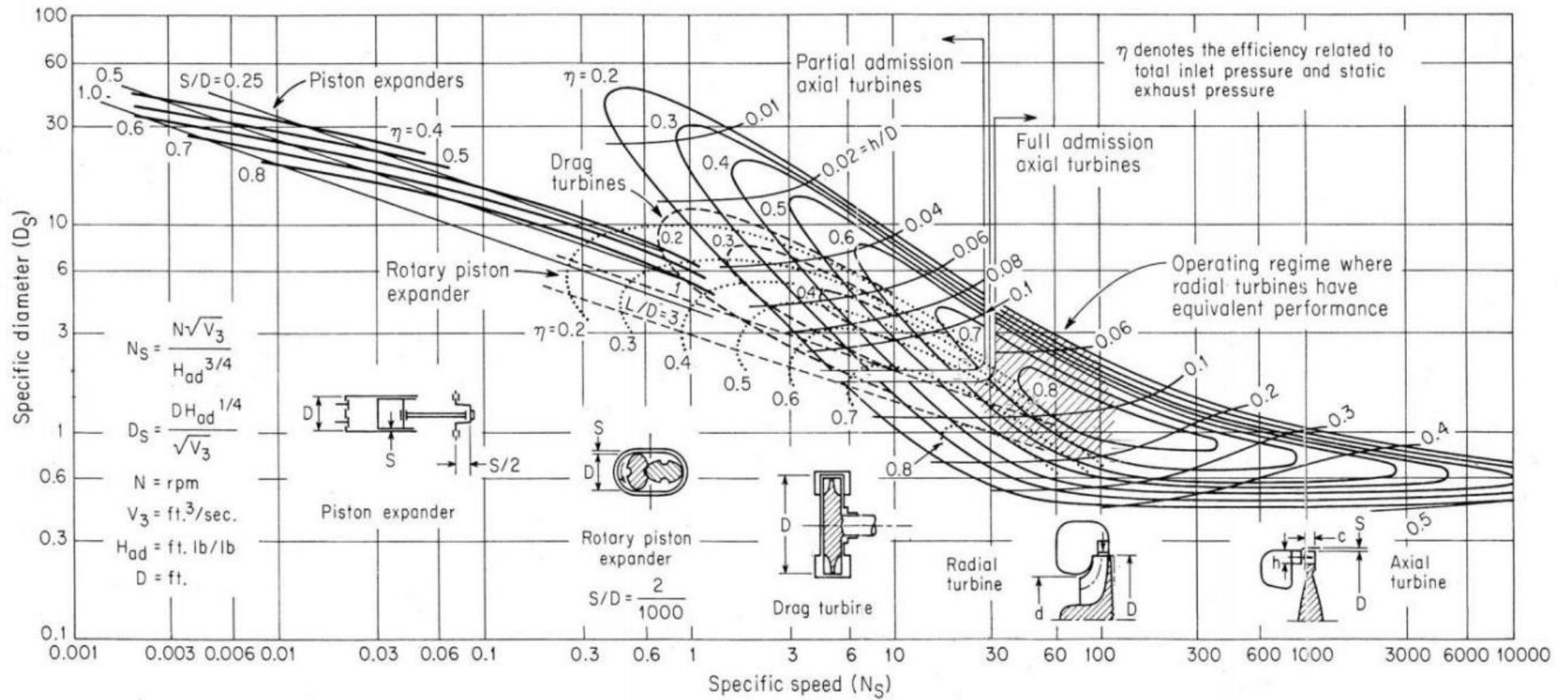
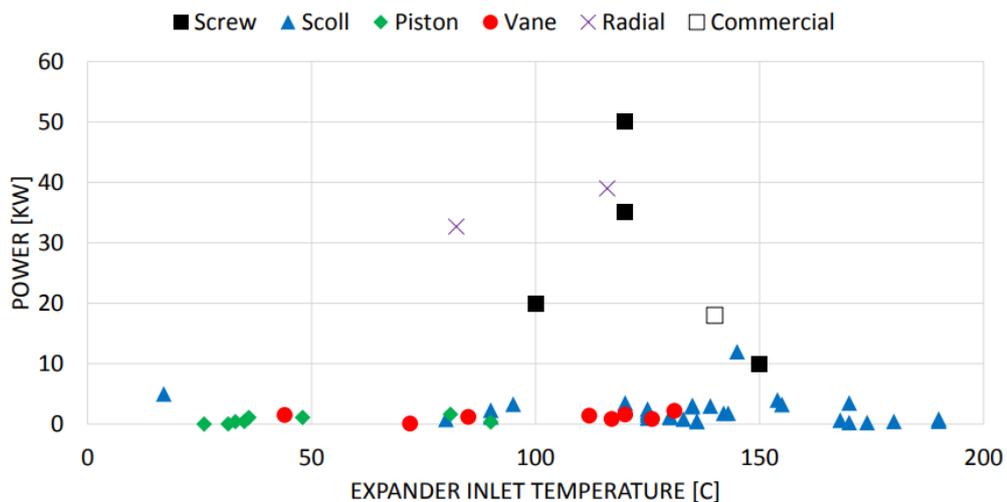


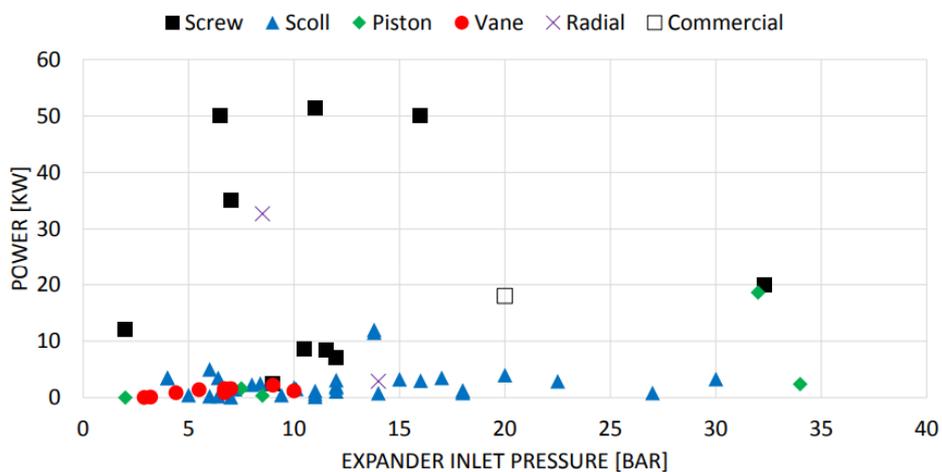
Рисунок 5.1 - График выбора расширителя из [37]

EXPANDERS MAP INLET TEMPERATURE - POWER



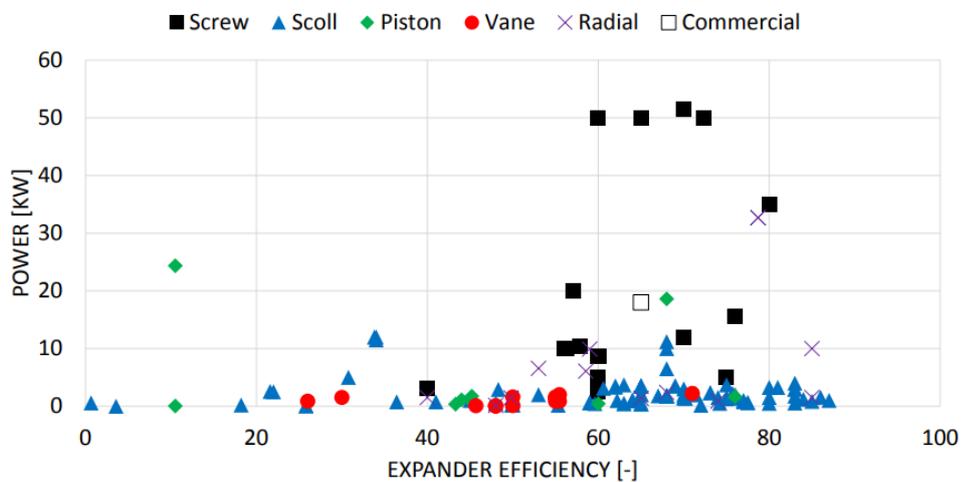
(a)

EXPANDERS MAP INLET PRESSURE - POWER

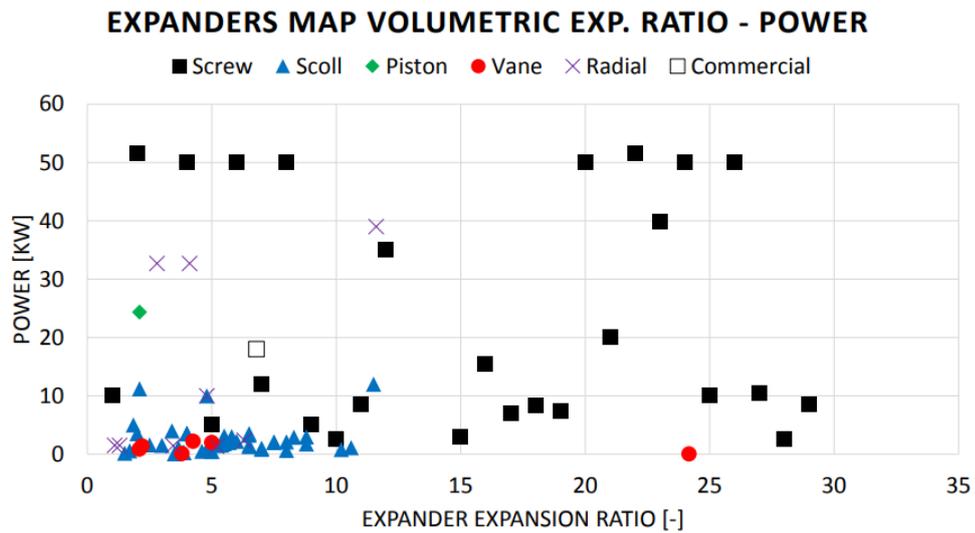


(b)

EXPANDERS MAP EFFICIENCY - POWER



(c)



(d)

Рисунок 5.2 - Расширители экспериментальных результатов из [17,37,38,40].
 а) температурно-силовая диаграмма; (б) диаграмма давления-мощности; (с) диаграмма эффективности-мощности; (г) диаграмма экспериментальной-мощности.

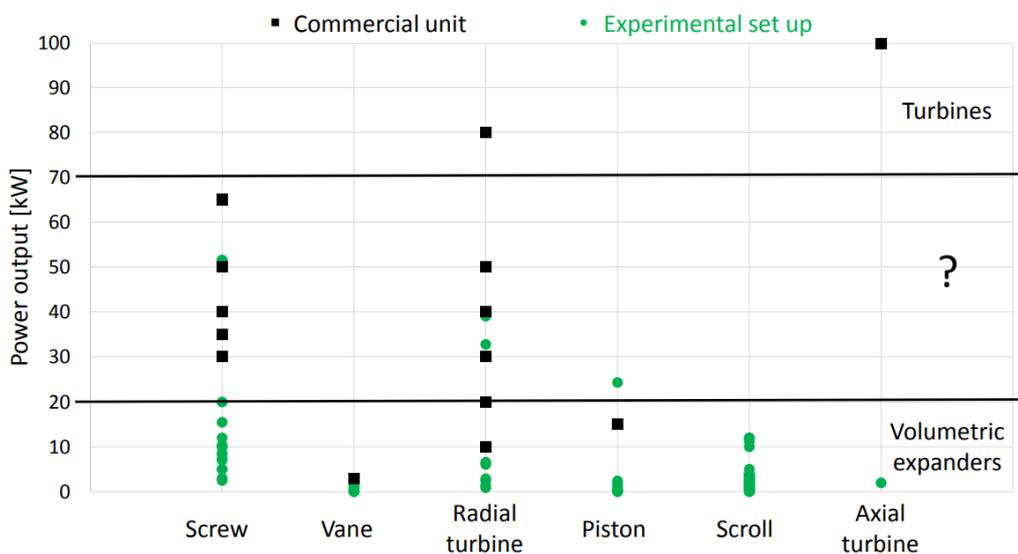


Рисунок 5.3 - Расширители классификации по ссылкам [17, 59, 103, 106]

«Выбор расширительной машины, как описано на рисунке 5.3, сильно зависит от выходной мощности системы. На основании проанализированных данных можно сделать вывод, что объемные расширители имеют тенденцию покрывать диапазон мощности 0–20 кВт, тогда как турбомашин выбирают

ся, когда выходная мощность превышает 70 кВт (см. Рисунок 5.3). При выходной мощности, превышающей 70 кВт, объемные машины громоздки, и на их производительность сильно влияют потери от утечки. В диапазоне мощностей 20–70 кВт производительность двух типов расширителей (то есть турбо и объемных) сопоставима. Поэтому опыт проектирования играет решающую роль при выборе машины. Также можно заметить, что существует несоответствие между выходной мощностью экспериментальных установок и коммерческих устройств. Как правило, в научных кругах тенденция состоит в том, чтобы исследовать более мелкие единицы измерения (см. Рисунок 5.2), а затем экстраполировать результаты на более высокую выходную мощность, в то время как компании занимающиеся системами ОЦР стремятся изучить разработку энергоблоков мощностью более 30 кВт (см. Таблицу 3.2).» [43]

5.1 ОЦР установки мощностью от 1 до 20 кВт

В диапазоне мощности от 1 до 20 кВт в литературе можно найти многочисленные экспериментальные исследования, дающие полное представление о производительности различных типов детандеров. Как показано на рисунках 5.1 и 5.2, объемные расширители превосходят турбомашину в этом диапазоне мощности. В частности, спиральные и роторные расширители обеспечивают высочайшую производительность.

«Спиральные расширители получают интерес в диапазоне 1–10 кВт из-за отсутствия клапанов и их относительно низкой стоимости [31]. Модель спирального расширителя [41] мощностью 2 кВт, который подтвержден экспериментально, достигнув максимальной эффективности 68%. Проводилось исследование системы ОЦР на основе двух спиральных расширителей, работающих параллельно. Целью работы было повышение производительности системы в переходных условиях. Максимальная выходная мощность, измеренная в двойном режиме, была ниже 3,5 кВт. Систему ОЦР с расширителем

спирального типа, получили максимальную выходную мощность 2,3 кВт и максимальный КПД 73%.

Спиральные расширители представляют собой лучший выбор, когда выходная мощность системы находится в диапазоне 1–25 кВт. Эти расширители демонстрируют более высокую производительность, когда расширение слегка влажное и объемное соотношение между входной и выходной секциями машины ограничено (см. Рисунок 5.2).» [43]

В диапазоне мощностей 1–10 кВт вращающиеся лопастные расширители представляют собой еще одно подходящее решение для применений в ОЦР. Лопастные расширители могут работать с жидкостями при низкой температуре и давлении, например, лопастной расширитель, который может выдерживать 120°C и 7 бар., вращающиеся лопастные расширители обеспечивают низкие скорости вращения, поэтому они способны работать с жидкостями и иметь минимальные затраты на техническое обслуживание.

В сравнении с поршневыми, винтовыми и спиральными расширителями, винтовые расширители охватывают диапазон мощности выше 20 кВт. Винтовые расширители в диапазоне мощности ниже 10 кВт трудно найти на рынке из-за трудностей с их уплотнением.

5.1.1 Пример проектирования установки с ОЦР мощностью до 4 кВт

Проектирование установки начинается с определения источника тепла и его температуры. В данной установке источником тепла является горячая вода от котла Прометей-40 Автомат. Моделирование и расчет параметров схемы выполнялись с помощью калькулятора CoolProor и программы SmoWeb. На рис. 5.4 представлена схема цикла этой установки, приведенная в табл. 5.1 - основные параметры установки, в табл. 5.2 - основные параметры для очков. Выбор рабочей жидкости для заданной температуры источника тепла был сделан с учетом термодинамической эффективности, экологических показателей. Выбранная рабочая жидкость - фреон R142b. По расчет-

ным данным было выбрано оборудование и смоделирована установка. На рис. 5.5 представлена 3D модель установки

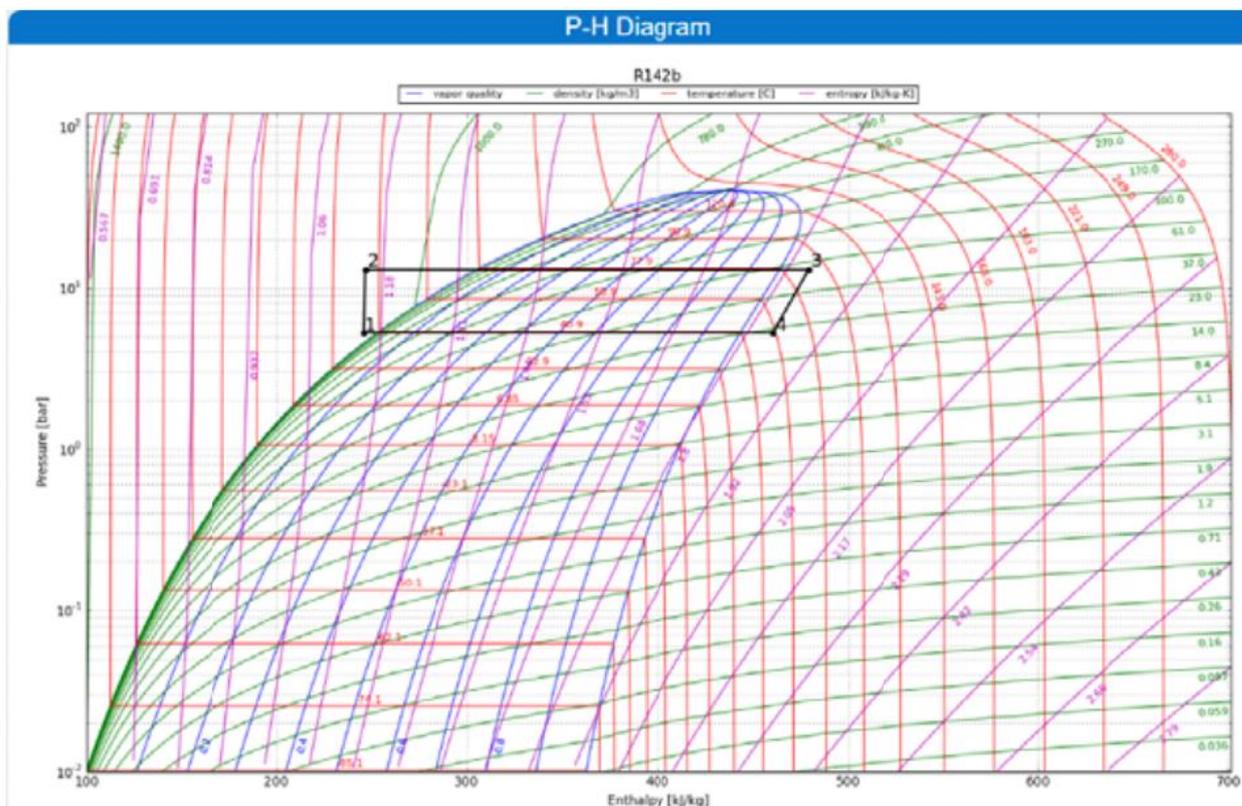


Рисунок 5.4 диаграмма давление-энтальпия в ОЦР

Таблица 5.1 - Параметры установки

Параметр	Значение
Мощность установки , кВт	4
Температура источника тепла, °С	95
КПД установки, %	10
Масса	150 кг
Габариты, мм	2000 x 800 x 1500

Таблица 5.2 - Параметры в точках

Точка	1	2	3	4
Давление, МПа	0,523	1,3	1,3	0,523
Температура, °С	35	35,4	90	57,21
Энтальпия, кДж/кг	245,43	246,15	479,47	460,65
Плотность	1085,62	1087,75	479,47	460,65

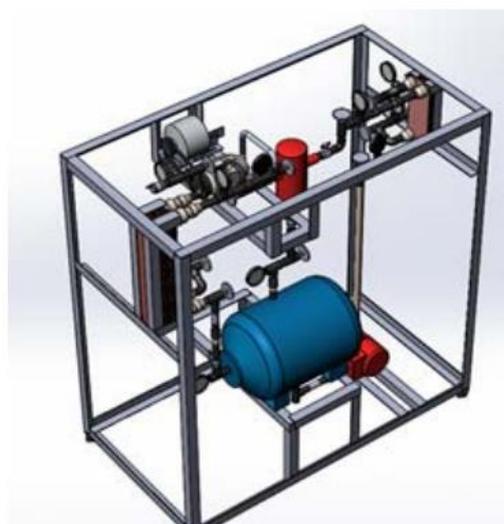
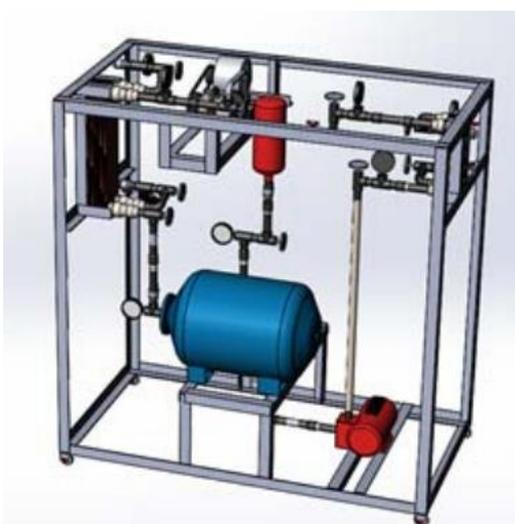


Рисунок 5.5 3D-модель установки

5.2 ОЦР установки мощностью от 20 до 70 кВт

«Расширительные машины в диапазонах от 20 до 70 кВт представляет серую область в выборе расширительной машины. когда выходная мощность системы превышает 20 кВт - вес и размер объемных расширителей увеличиваются. Из-за того, что турбодетандерам требуется высокая скорость вращения, это приводит к последствиям выхода из строя подшипников. В том числе, высокая скорость вращения турбомашин усложняет связь между турбодетандером и стандартным электрическим генератором.» [43]

В анализе экономически эффективных небольших систем ОЦР в диапазоне 20–50 кВт указывают, что двухвинтовые расширители являются наиболее перспективными. Утверждают, что двухвинтовые расширители могут достигать КПД 70% при работе на низкой скорости и что их стоимость установки составляет примерно 100000–130000 руб. / кВт.

Несколько компаний по ОЦР разрабатывают прототипы в этом диапазоне мощностей (см. рисунок 5.3 и таблицу 3.2). Винтовые и радиальные расширительные машины, из таблицы, имеют наибольшую повторяемость. Однако, основным недостатком радиальных расширительных машин является их высокая скорость вращения в диапазоне мощностей 20–70 кВт, а у винтовых расширителей - их высокие потери на утечку [17].

5.3 ОЦР установки мощностью от 70 до 100 кВт

Как показано в таблице 3.2, различные компании разрабатывают системы ОЦР в этом диапазоне мощностей от 70 кВт до 100 кВт. Однако, несмотря на большой коммерческий интерес, количество исследований, в которых приводятся экспериментальные результаты систем в диапазоне мощностей 70–100 кВт, ограничено (см. Рисунок 5.3).

На рисунке 5.3 и в таблице 3.2 показано, что турбодетандеры имеют преимущество в мощностях от 70 до 100 кВт. Когда выходная мощность превышает 70 кВт - скорость вращения турбомашин уменьшается в геометрической прогрессии. Это позволяет сохранить срок службы подшипников и соединить детандер со стандартным электрическим генератором. Размер и вес объемных расширителей при мощностях выше 70 кВт увеличиваются экспоненциально. Из этого вытекает увеличение утечек, что влечет за собой снижение эффективности турбомашин. В диапазоне мощностей от 70 до 100 кВт единственные варианты расширителей представляют радиальные турбины и спиральные расширители. Компаний, которые занимаются разработкой системой с органическим циклом Ренкина мощностью до 100 кВт,

предлагают радиальные турбины. Но, некоторые компании разработали собственные расширительные машины (см. таблицу 3.2).

5.4 Сравнительный анализ детандеров

«В установках с переменным источником тепла выдающие небольшую мощность, объемные расширители имеют идеальные характеристики для такой системы. Т.к. они могут работать бесперебойно, даже когда термодинамические условия на входе в машину значительно различаются. Другим преимуществом является то, что они могут работать на низких скоростях вращения – не ниже 3000 об. / мин., обеспечивая прямое соединение с низкоскоростными электрогенераторами. Из этого выходит то, что:

1) Недорогие генераторы и широко доступны на рынке – это низкоскоростные электрические генераторы, а низкие скорости вращения, что типично для объемных машин, позволяют использовать обычные подшипники, что сможет увеличить долговечность вращающихся деталей и уменьшает частоту технического обслуживания.

2) Низкая стоимость электрического генератора помогает снизить отдачу от инвестиций и повысить конкурентоспособность технологий.

Однако, основными недостатками таких объемных расширителей являются объемные и динамические потери жидкости зависящие от процесса смазки и утечки. Из-за необходимого зазора расширения, чтобы защитить движущиеся части, которые подвергаются тепловым и механическим напряжениям - объемные потери не могут быть устранены.

Как сообщается в разделе 5.2, турбошины, как правило, не требуют выработки электроэнергии ниже 10 кВт, в основном из-за их скоростей вращения. Это создает серьезную проблему при соединении турбины с электрическим генератором. Для подключения турбомашины к электрогенератору доступны два различных варианта.

1) Использование коробки передач, чтобы разделить частоту вращения турбины от частоты вращения электрического генератора. Однако это имеет высокую механическую потерю.

2) Напрямую соединить детандер и высокоскоростной электрический генератор. Однако такая конструкция имеет высокую стоимость установки на выходе. На рисунке 5.6 представлена карта существующих высокоскоростных электрических генераторов.» [43]

«Как видно из рисунка 5.6, варианты, доступные в интересующем диапазоне мощности, ограничены машинами с постоянными магнитами. Кроме того, балансировка машины с турбиной подразумевает низкие допуски в процессе производства. В целом, высокоскоростные турбины представляют собой более эффективную альтернативу объемным расширителям, когда выходная мощность превышает 20 кВт. Однако более высокая стоимость турбодетандеров (по сравнению с объемными машинами) делает их экономически эффективными только в тех случаях, когда они значительно превосходят объемные машины; как, например, когда термодинамические условия источника тепла стабильны во времени.» [43]

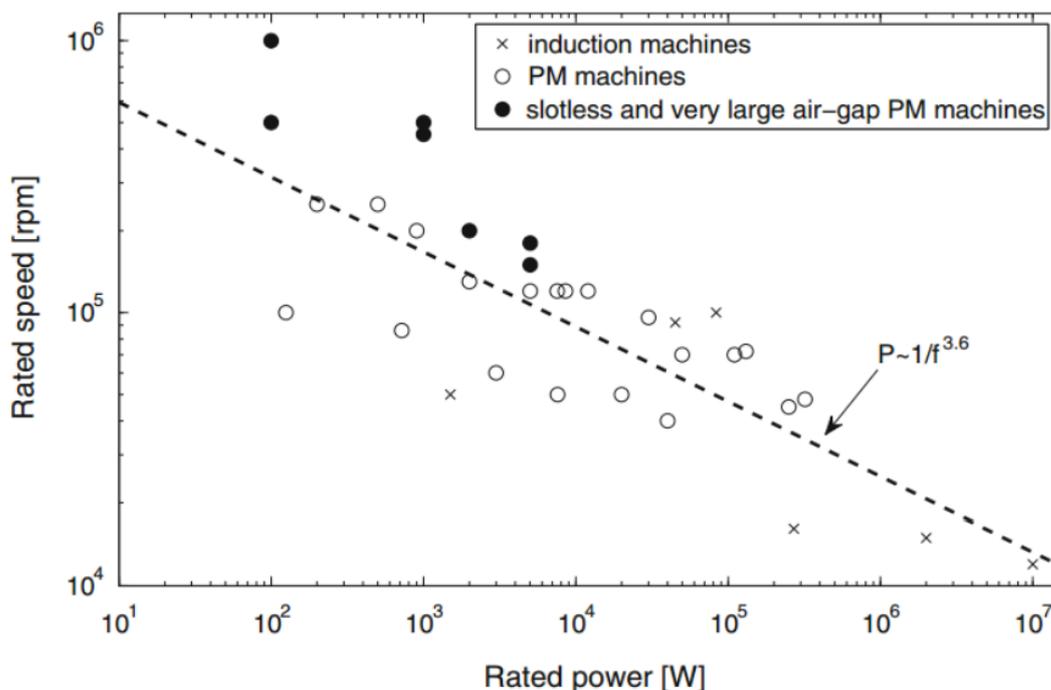


Рисунок 5.6 - Высокоскоростные электрические генераторы

5.5 Выводы анализа современного состояния технологии ОЦР

В этой главе представлен обзор современного состояния технологий. Цель анализа – это разработать экономическое исследование для определения конкретных затрат, чтобы определить конкурентоспособность в малом производстве и представить технический обзор методологий, использованных в литературе для выбора расширительных и рабочих жидкостей.

Выводы, сделанные из этого исследования:

1) Удельная стоимость систем с органическим циклом Ренкина при мощности от 5 до 10 кВт не должна превышать значения 274000 руб. / кВт и 195000 руб. / кВт.

2) Высокая удельная стоимость является основной причиной, почему данная технология не является доступной на коммерческом уровне при малом производстве электроэнергии. Требуется оптимизация системы для снижения затрат, что повлечет за собой снижения срока окупаемости.

3) Недостаток информации с экспериментальными данными систем, работающих на органическом цикле Ренкина в диапазоне мощностей от 10 до 100 кВт, которые важны для распространения технологии в малом диапазоне мощностей.

4) Можно отметить, что, объемные машины превосходят турбодетандеры из-за их компактности, эффективности, отношении мощности к весу, особенно, если требуется выдать мощность более 10 кВт. Снижение стоимости высокоскоростных электрогенераторов вместе с использованием рабочих жидкостей, которые не требуют неоправданно высокой скорости вращения турбины, может быстро сделать экономически эффективными малые установки ОЦР.

«Системы ORC для производства выходной мощности в диапазоне 1-100 кВт все еще испытывают незначительное поглощение на рынке. Достижения в области технологий вместе с дополнительными государственными стимулами для инвестиций имеют важное значение для заполнения существующего рыночного разрыва.» [43]

6 Моделирование безопасности при использовании углеродных рабочих тел

6.1 Физическая проблема

На основе системы ОЦР, используемой для рекуперации отработанного тепла двигателя в лаборатории, упрощенная физическая модель показана на рисунке 6.1. Упрощенная система ОЦР, которая состоит из четырех основных компонентов: насоса, конденсатора, детандера и испарителя, расположена в помещении (длина 4,5 м, ширина 3,4 м, высота 2,5 м). Чтобы сравнить безопасные характеристики пропилена / диоксида углерода и пентана / диоксида углерода в практическом применении, было смоделирована возможная утечка в программе ANSYS-FLUENT. При самом высоком давлении 11 МПа в транскритическом ОЦР выход насоса рассматривается как источник утечки. Скорость утечки пропилен / диоксид углерода и пентан / диоксид углерода (0,5 / 0,5) составляет 251 м / с и 212 м / с соответственно. Подробную настройку можно увидеть на рисунке 6.1.

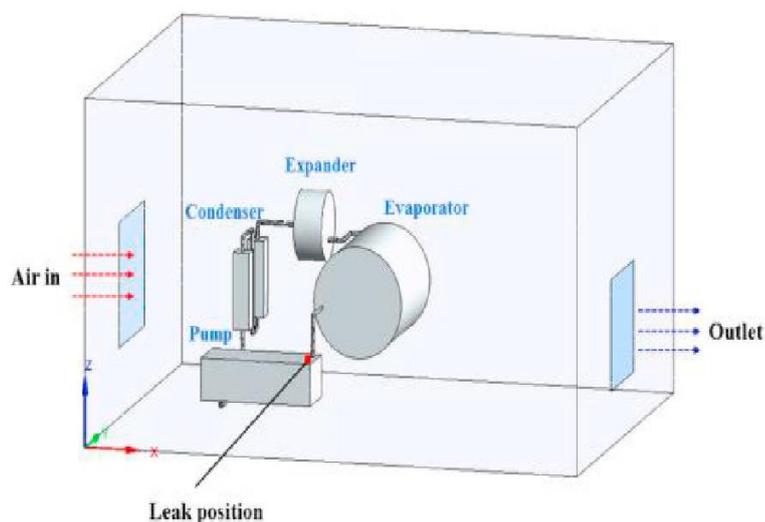


Рисунок 6.1 - Схема физической модели

Предполагается, что начальное термодинамическое состояние в лаборатории составляет 298К и 0,1 МПа. Свежий воздух поступает с постоянной скоростью 0,5 м / с через воздухозаборник. Выход определяется как границы выпускного давления. Рабочая зеотропная жидкость смеси вытекает из источника со скоростью звука. Для стены был принят стандартный метод функции стены в программе ANSYS. Противоскользкие и адиабатические условия были применены ко всем стенам. Основываясь на методологии модели оценки риска для системы ОЦР с использованием легковоспламеняющейся рабочей жидкости, процесс анализа безопасной производительности углеводородов / углекислого газа иллюстрируется блок-схемой на рис. 6.2.

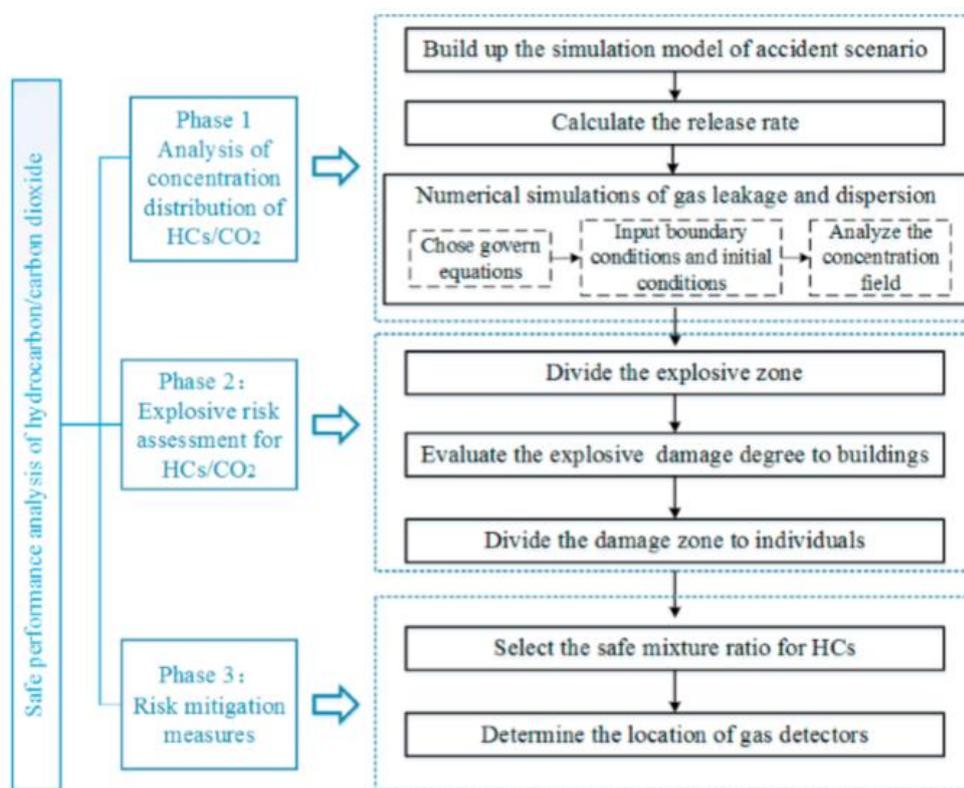


Рисунок 6.2 - безопасный анализ производительности процессов углеводорода / углекислого газа

6.2 Безопасная работа различных рабочих жидкостей

6.2.1 Сравнение распределения концентрации

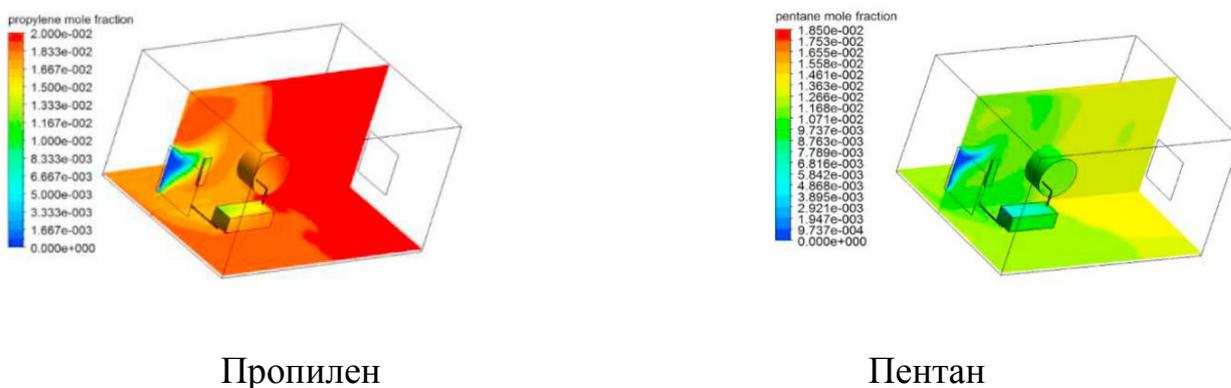


Рисунок 6.3 - Распределение концентрации на плоскости $y = 2,05\text{м}$

Для проблемы безопасности утечки газа, распределение концентрации является наиболее существенной проблемой. В одном из расчетов концентрация легковоспламеняющихся компонентов превышает верхний предел воспламеняемости, при наличии источника возгорания может произойти взрыв. Как видно на рисунке 6.3, значение концентрации пропилена выше, чем концентрация пентана в той же позиции. Основной причиной этого явления является скорость высвобождения различных рабочих жидкостей, которая рассчитывается на основе параметров работы. Когда соотношение диоксида углерода одинаково, скорость высвобождения снижается от пропилена к пентану, с приращением молярной массы углеводорода. Кроме того, это показывает, что наличие испарителя препятствует потоку воздуха на другую сторону в некоторой степени. Когда воздух сталкивается с препятствиями впереди, он может изменить направление, что приведет к снижению концентрации на ветреной стороне испарителя.

6.2.2 Влиятельные фактора дисперсионных характеристик

Что касается различной скорости ветра, изменение концентрации пропилена на линии $y = 1,2$ м, $z = 0,2$ м показано на рисунке 6.4. На рисунке показано, что скорость ветра оказывает сильное влияние на диффузию пропилена. С увеличением скорости ветра усиливались стратосферный перенос газового облака и интенсивность турбулентности, поэтому газ быстро рассеивался соответственно. Анализ влияния разной скорости ветра послужит руководством к проектированию системы вентиляции.

Что касается различного соотношения пропилена, связь между концентрацией пропилена и временем высвобождения в точке (3, 1.123, 1) показана на картинке 6.5. Очевидно, что соотношение оказывает большое влияние на изменение концентрации. Даже при том, что условия работы системы ОЦР отличаются при различном соотношении смеси, а также скорости высвобождения. Мы все еще можем сделать вывод, что концентрация увеличивается с увеличением доли углеводорода в смеси.

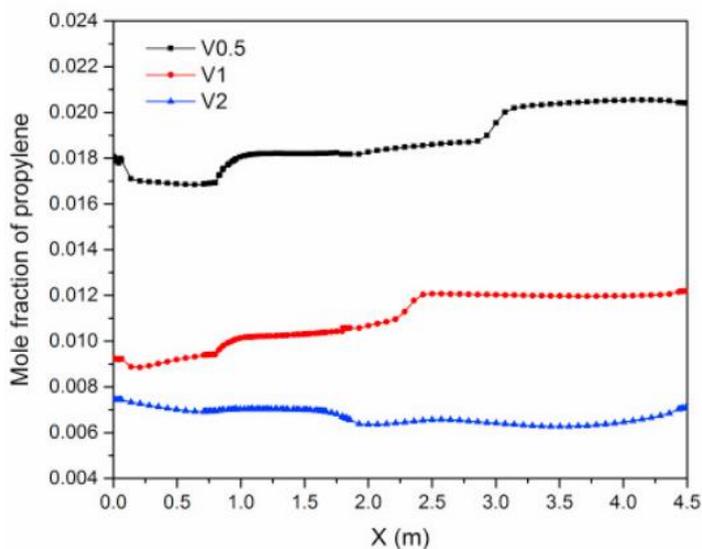


Рисунок 6.4 - Концентрация пропилена на линии $y = 1,2$ м $z = 0,2$ м для различной скорости ветра

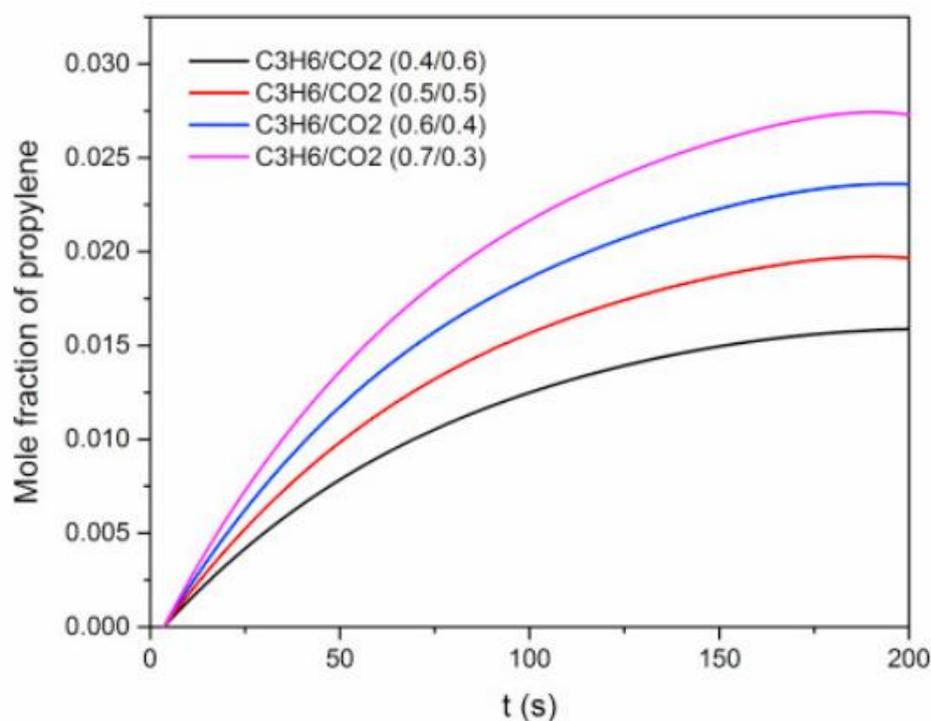


Рисунок 6.5 - Концентрация пропилена в точке (3, 1,23, 1) для разных соотношений

6.3 Степень разрушения от взрыва

На основании явления взрыва, вызванного утечкой рабочей жидкости, количественно рассчитывается разрушительное воздействие на здания и людей. На рисунке 6.6 показано ослабление пикового избыточного давления с увеличением расстояния на 200с. В зависимости от воздействия взрывного избыточного давления на конструкции, большинство зданий будут разрушены, когда избыточное давление превысит 70 кПа. Как следствие, здания будут снесены, когда расстояние до источника взрыва будет менее 4 метров. Можно видеть, что величина избыточного давления, вызванного взрывом пентана, больше, чем пропилена. Причиной этого явления является то, что взрывной эффект оценивается по методу, эквивалентному тротилу, избыточное давление будет увеличиваться вместе со значением теплоты взрыва. Поскольку тот факт, что теплота взрыва будет увеличиваться с увеличением атомного номера, то значение теплоты взрыва пентана / углекислого газа

больше, чем у пропилена / углекислого газа, что приводит к более сильному взрывному эффекту пентана / углекислого газа. На расстоянии 2 м избыточное давление пропилена и пропилена / диоксида углерода (0,5 / 0,5) составляет 361 кПа и 224 кПа соответственно, тогда как избыточное давление пентана и пентана / диоксида углерода (0,5 / 0,5) составляет 500 кПа и 295 кПа. Показано, что избыточное давление чистой рабочей жидкости намного больше, чем давление в смесях углеводород / диоксид углерода. Таким образом, степень повреждения чистой углеводородной рабочей жидкости является более серьезной, чем у смеси углеводород / диоксид углерода.

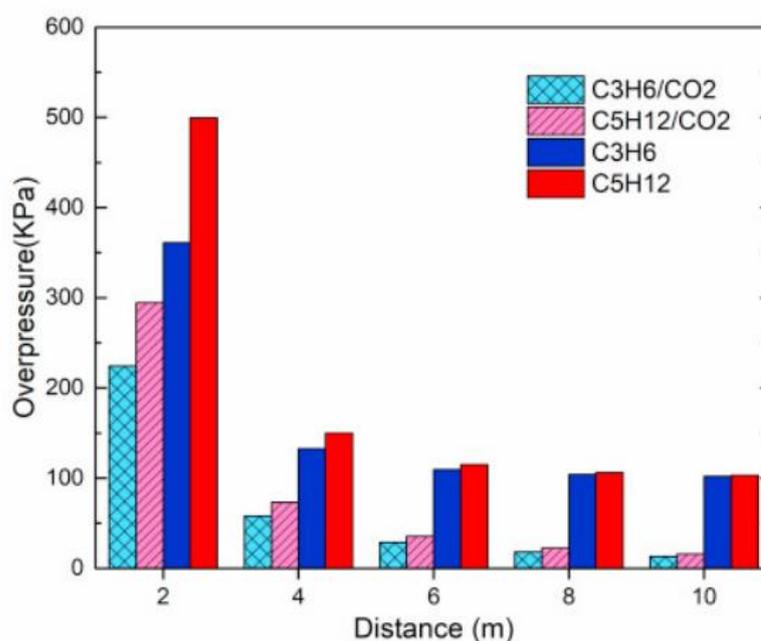


Рисунок 6.6 - Связь между избыточным давлением и расстоянием от места взрыва

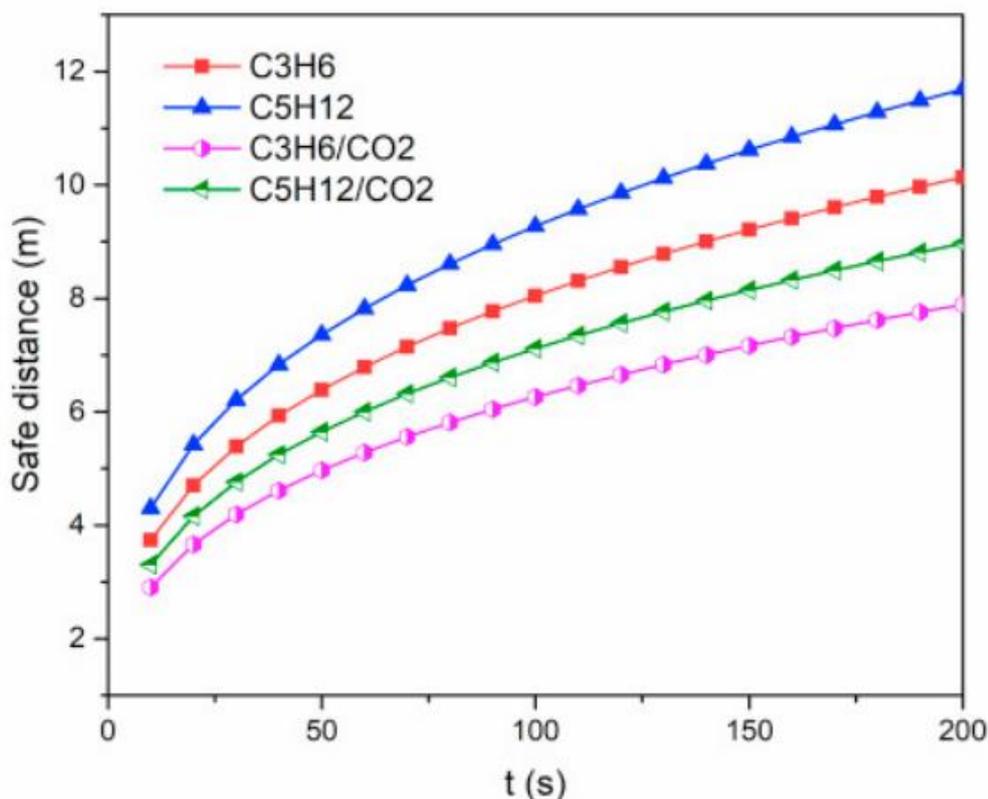


Рисунок 6.7 - Безопасное расстояние для людей

На рисунке 6.7 показано безопасное расстояние для разных смесей на основе эквивалентного взрыва тротила. Когда расстояние между людьми и источником взрыва превышает безопасное расстояние, большинство людей не пострадают, и вероятность смерти будет почти равна нулю. Как показано на рисунке 5.7, безопасное расстояние пропилен / диоксид углерода составляет 7,8 м, в то время как расстояние между пентаном / диоксидом углерода составляет 8,6 м и 8,9 м соответственно при 200 с. Для пропилена, смеси пентана с углекислым газом, безопасное расстояние, вызванное последовательным снижением взрыва. Это связано с увеличением значения теплоты взрыва от пропилена к пентану с увеличением молярной массы. Согласно рисунку 6.6 и рисунку 6.7 повреждение, вызванное взрывом пентана / диоксида углерода, является более серьезным, чем пропилен / диоксид углерода, из-за более высокого значения избыточного давления и большего безопасного расстояния. При большем избыточном давлении и безопасном расстоянии степень повреждения взрывчатых веществ чистыми углеводородами зданий и

людей является более серьезной, чем у углеводородов / углекислого газа. Ввиду риска взрыва, смешивание углеводородов с углекислым газом может улучшить безопасные характеристики чистых углеводородов.

6.4 Меры по предотвращению риска

Меры по предотвращению риска состоят из двух основных аспектов: точное расположение газодетекторных устройств и оптимизация соотношения смеси на основе результатов относительного моделирования. На рисунке 6.8 показано, что одна из областей с более высокой концентрацией расположена с подветренной стороны рядом с полом, а другая - в потолке в середине комнаты. Для обнаружения выброса газа как можно раньше газодетектор должен быть установлен в надлежащем месте. Различные точки в этих двух регионах выбираются для мониторинга изменения концентрации. В этой работе значение концентрации 10% от низкой воспламеняемости устанавливается в качестве порога. Когда локальная концентрация углеводородов превышает пороговое значение, устройство газовой сигнализации будет отправлять сигналы тревоги соответствующему персоналу, своевременно принимающему экстренные меры.

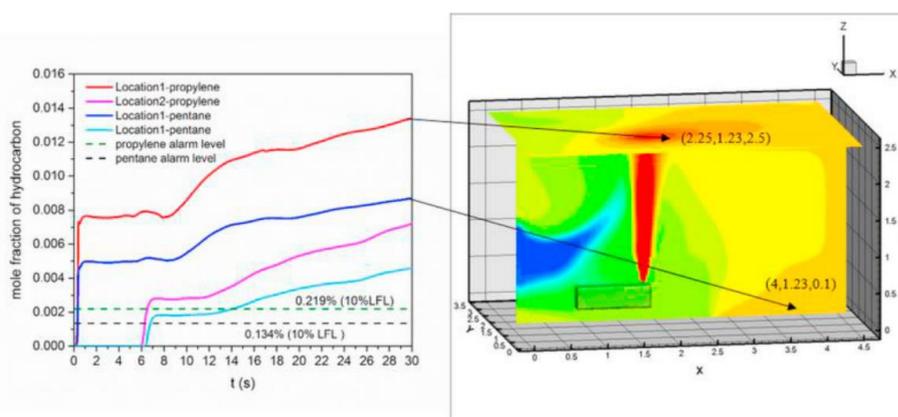


Рисунок 6.8 - Зависимая от времени мольная доля пропилена и пентана в разных местах расположения датчиков

На рисунке 6.8 показана зависящая от времени концентрация пропилена и пентана в положениях монитора. Как показано на рисунке, концентра-

ция увеличивается наиболее быстро в местоположении 1. Мольная доля углеводорода в месте 1 прошла уровень оповещения очень рано в переходном процессе (менее 1 с). Устройства обнаружения газа в этом месте позволят принимать контрмеры для снижения риска во времени.

Взрывоопасная зона определяется как зона, где концентрация углеводорода находится между нижним пределом воспламеняемости и верхним пределом воспламеняемости. С увеличением количества углеводорода производительность цикла будет улучшаться, а безопасное снижение производительности. Выбор правильного соотношения смеси, который может гарантировать отличную производительность цикла, а также показатели безопасности, является важным предметом особого внимания.

Чтобы лучше понять изменение объема взрывоопасной зоны, введен новый параметр η для представления отношения взрывчатости.

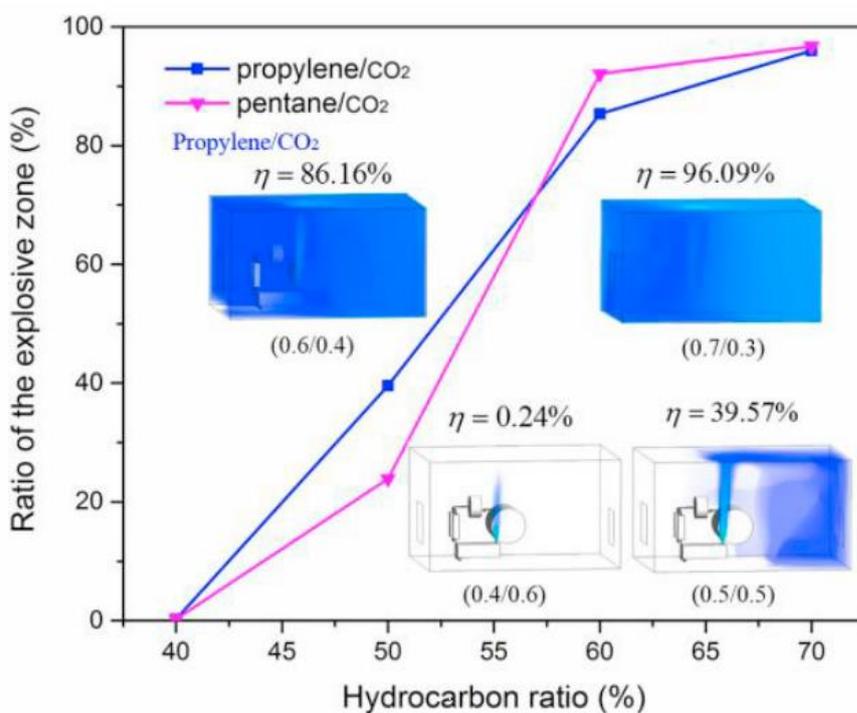


Рисунок 6.9 - Соотношение взрывоопасных зон смеси углеводородов / углекислого газа различного соотношения

Что касается различного соотношения углеводородов, соотношение взрывоопасных зон показано на рисунке 6.9. Как показано на рисунке, когда отношение углеводородов равно 0,4, взрывоопасная зона выходит только в верхней части утечки. Взрывоопасная зона расширяется с увеличением углеводородного соотношения. Как только соотношение достигает 0,6, область действия взрывоопасной зоны резко расширяется почти до всей комнаты. Это явление полезно, чтобы обеспечить руководство для оптимизации соотношения смеси, используемого в ОЦР системе. Согласно рисунку 6.9, соотношение пропилена и пентана не может превышать 0,4 ввиду риска взрыва.

6.5 Вывод по безопасности при использовании углеродных рабочих тел

В этой главе описаны безопасные характеристики пропилена / диоксида углерода и пентана / диоксида углерода, вытекающие из цикла органического Ренкина. Результаты показывают, что значение концентрации пропилена выше, чем концентрация пентана в том же положении после утечки. Скорость ветра и соотношение углеводородов оказывают очевидное влияние на дисперсионную характеристику. Степень повреждения зданий и людей в результате взрыва увеличивается от пропилена / углекислого газа до пентана / углекислого газа. Чтобы улучшить безопасные характеристики смеси углеводородов / углекислого газа при практическом применении, в середине потолка предпочтительно устанавливается газодетекторное устройство, которое может обнаружить утечку газа менее чем за одну секунду. С учетом безопасности утечки максимальное соотношение пропилена и пентана в смесях должно составлять 0,4 при смешивании с диоксидом углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описывается возможно применение установки с органическим циклом Ренкина в альтернативной энергетике, подбор рабочего тела при различных источниках тепла, подбор расширительной машины для разных мощностей и рабочих тел, так же проведён анализ рынка.

Высокая удельная стоимость является основной причиной, почему данная технология не является доступной на коммерческом уровне при малом производстве электроэнергии. Требуется оптимизация системы для снижения затрат, что повлечет за собой снижения срока окупаемости.

Выбор рабочей жидкости является важным пунктом при проектировании установки для органического цикла Ренкина, т.к. это зависит от многих факторов, в частности, от источника энергии, давления установки, её мощности и диапазона рабочих температур установки.

Так же, не стоит забывать про правильный выбор расширительной машины, ведь, это так же является важнейшим пунктом при проектировании установки. От этого будет зависеть какая мощность будет на выходе; совместимость с электрогенераторами и с рабочим телом.

Можно отметить, что, объемные машины превосходят турбодетандеры из-за их компактности, эффективности, отношении мощности к весу, особенно, если требуется выдать мощность более 10 кВт. Снижение стоимости высокоскоростных электрогенераторов вместе с использованием рабочих жидкостей, которые не требуют неоправданно высокой скорости вращения турбины, может быстро сделать экономически эффективными малые установки ОЦР.

Недостаток информации с экспериментальными данными систем, работающих на органическом цикле Ренкина в диапазоне мощностей от 10 до 100 кВт, которые важны для распространения технологии в малом диапазоне мощностей.

Так же, должны быть стимулы со стороны государства для распространения технологии на производствах и на коммерческом рынке/бизнесе.

Много исследований было проведено на органических циклах Ренкина и их рабочих жидкостях. Была исследована эффективность ОЦР с использованием бензола, аммиака, R11, R12, R134a и R113 в качестве рабочих жидкостей. Из этого можно понять, что изоэнтропийные жидкости являются наиболее подходящими для регенерации низкотемпературного отходящего тепла. Было проведено многочисленные исследования различных жидкостей в системах ОЦР. Например, система ОЦР с использованием ГХФУ-123 в качестве рабочей жидкости имеет лучшую эффективность, чем система, использующая воду в качестве рабочей жидкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Velez F., Segovia J.J., Martin M.C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 6, pp. 4175- 4189.
2. Quoilin S., Van Den Broekb M., Declayea S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22.
3. Chen H., Goswami D.Y., Stefanakos E.K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, pp. 3059- 3067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>
4. Andersen, W.C.; Bruno, T.J. Rapid screening of fluids for chemical stability in organic Rankine cycle applications. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, 44, 5560–5566.
5. Куфтов А.Ф., Кузьмина Ю.С. [Перспективы использования твердого топлива из биомассы]. *Наука и образование МГТУ им. Н.Е. Баумана - Наука и образование Баумана МСТУ*, 2011, no. 8
6. Гринман М.И., Фомин В.А. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами. *Энергомашиностроение*, 2006.
7. Imran, M.; Usman, M.; Park, B.S.; Lee, D.H. Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 57, 1090–1109.
8. Yu G., Shu G., Tian H., Wei H., Liu L. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). *Energy*, 2013, vol. 51, pp. 281-290.

9. Bombarda P., Invernizzi C.M., Pietra C. Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 212-219
10. Srinivasan K.K, Mago P.J., Krishnan S.R. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. *Energy*, 2010, vol. 35, pp. 2387-2399.
11. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 51, pp. 711-722.
12. Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1210-1221.
13. Drescher U., Brüggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp. 223-228.
14. Tchanche B.F., Papadakis G., Lambrinos G., Frangoudakis A. Fluid selection for a lowtemperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, no. 11-12, pp. 2468-2476.
15. Mikielwicz D., Mikielwicz J. A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 2357-2362.
16. Stijepovic M.Z., Linke P., Papadopoulos A.I., Grujic A.S. On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 36, pp. 406-413.
17. Wang Z.Q., Zhou N.J., Guo J., Wang X.Y. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat. *Energy*, 2012, vol. 40, iss. 1, pp. 107-115.
18. Tabor, H.; Bronicki, L. Establishing Criteria for Fluids for Small Vapor Turbines; Technical Report; SAE Technical Paper; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1964.

19. Angelino, G.; Gaia, M.; Macchi, E. A review of Italian activity in the field of organic Rankine cycles. *VDI-Berichte* 1984, 465–482.
20. Янчошек Л., Кунц П. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации. *Турбины и дизели*, 2012.
21. Ивлев В.И., Бозров В.М., Воронов В.А. Оценка технических показателей перспективных спиральных пневмомоторов. *Компрессорная техника и пневматика*, 2014, № 1.
22. Council Regulation 1005/2009 on Substances That Deplete the Ozone Layer, 31.10.2009 OJ L 286.
23. National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 329: Recommended Practice for Handling Releases of Flammable and Combustible Liquids and Gases; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2015.
24. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals; American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, 2009.
25. Воронов В.А., Леонов В.П., Розеноер Т.М. Испытания спирального детандера. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1.
26. Tchanche, B.F.; Papadakis, G.; Lambrinos, G.; Frangoudakis, A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Appl. Therm. Eng.* 2009, 29.
27. Papadopoulos, A.I.; Stijepovic, M.; Linke, P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. *Appl. Therm. Eng.* 2010, 30, 760–769.
28. Ziviani, D.; Beyene, A.; Venturini, M. Advances and challenges in ORC systems modeling for low grade thermal energy recovery. *Appl. Energy* 2014, 121, 79–95.
29. Linke, P.; Papadopoulos, A.I.; Seferlis, P. Systematic methods for working fluid selection and the design, integration and control of organic Rankine cycles—A review. *Energies* 2015, 8, 4755–4801.

30. Rayegan, R.; Tao, Y. A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). *Renew. Energy* 2011, 36, 659–670.
31. Sciubba, E.; Tocci, L.; Toro, C. Thermodynamic analysis of a Rankine dual loop waste thermal energy recovery system. *Energy Convers. Manag.* 2016, 122,
32. Карабарин Д.И., Михайленко С.А. Проект автономной котельной в районах децентрализованной энергетики «НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ» часть 4. НГТУ, 2017, 1
33. Baral,S.;Kim,D.; Yun,E.;Kim,K.C. Experimental and thermoeconomic analysis of small-scale solar organic Rankine cycle (SORC) system. *Entropy* 2015, 17, 2039–2061.
34. Nusiaputra, Y.Y.; Wiemer, H.J.; Kuhn, D. Thermal-Economic modularization of small, organic Rankine cycle power plants for mid-enthalpy geothermal fields. *Energies* 2014, 7, 4221–4240.
35. Qiu, G.; Liu, H.; Riffat, S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Appl. Therm. Eng.* 2011, 31, 3301–3307.
36. Kang, S.H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. *Energy* 2012, 41, 514–524.
37. Kenneth, E.; Nichols, P. How to Select Turbomachinery for Your Application; Barber-Nichols Inc.: Arvada, CO, USA, 2012; pp. 5–6.
38. Bao,J.;Zhao,L.A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle.*Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 24, 325–342.
39. Kang, S.H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. *Energy* 2012, 41, 514–524.
40. Hsieh, J.C.; Fu, B.R.; Wang, T.W.; Cheng, Y.; Lee, Y.R.; Chang, J.C. Design and preliminary results of a20-kW transcritical organic Rankine cycle with a screw expander for low-grade waste heat recovery .*Appl. Therm. Eng.* 2017, 110, 1120–1127.

41. Lemort, V.; Quoilin, S.; Cuevas, C.; Lebrun, J. Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle. *Appl. Therm. Eng.* 2009, 29, 3094–3102.

42. Franchetti, B.; Pesiridis, A.; Pesmazoglou, I.; Sciubba, E.; Tocci, L. Thermodynamic and technical criteria for the optimal selection of the working fluid in a mini-ORC. In *Proceedings of the 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Portorož, Slovenia, 19–23 June 2016.

43. Lorenzo Tocci; Tamas Pal; Ioannis Pesmazoglou and Benjamin Franchetti. *Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC): A Techno-Economic Review*. Published: 23 March 2017

44. Карабарин Д.И.; Михайленко С.А.; Использование низкопотенциальных источников энергии на основе органического цикла ренкина. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2018, 11(7), 867-876