**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра энергофизики**

УДК 536.717, 536.8, 536-1

НИЛОВ

Илья Витальевич

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА**

Дипломная работа

Научный руководитель:

старший преподаватель

кафедры энергофизики БГУ

Ларькин А.В.

Рецензент:

старший преподаватель

кафедры ядерной физики БГУ

Семенович О.В.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой энергофизики БГУ

доцент, к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Мазаник

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2021 г.

Минск, 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

# ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС – атомная электрическая станция

𝑇 – температура

𝑠 – удельная энтропия

𝑝 – давление

ℎ – удельная энтальпия

𝑥 – степень сухости пара

КПД – коэффициент полезного действия

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

ЦВД – цилиндры высокого давления турбины

ЦНД – цилиндры низкого давления турбины

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

ОЦР – органический цикл Ренкина

МГЭИК – межправительственная группа экспертов по изменению климата

ПГП – потенциал глобального потепления

ОРП – озоноразрушающий потенциал

# ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, в связи со все более тяжелой энергетической и экологической ситуацией, энергосбережению и сокращению выбросов уделяется все больше внимания. Низкосортная отработанная тепловая энергия является важной частью процессов по рекуперации и утилизации энергии. Среди распространенных способов ее переработки выделяют органический цикл Ренкина, цикл Калины, цикл Брайтона, абсорбционный холодильный цикл, цикл Стирлинга, и другие термодинамические циклы. Среди этих циклов, ОЦР - многообещающая технология по освоению и утилизации низкопотенциальной тепловой энергии - был хорошо изучен и широко применяется благодаря своим преимуществам - высокой эффективности, простой конфигурации, безопасности и надежности, а также низким инвестиционным затратам. Кроме того, ОЦР также может быть интегрирован с другими циклами для объединения структур циклов и улучшения рециркуляции энергии, что может повысить его термодинамическую эффективность, например, интеграция ORC с другими циклами - Цикл Брайтона, цикл Стирлинга и т.д. Поэтому оптимизация ОЦР в последние годы стала актуальной международной темой исследований.

В настоящее время большинство исследований базируются на традиционных методах конкретного эксперимента и термодинамического моделирования, трудоемкость и стоимость которых относительно велики при решении крупномасштабных задач, хотя результаты исследований обладают высокой точностью. В последние годы вышло всего лишь несколько исследований по расчёту эффективности ОЦР основанных на машинном обучении, главным образом из-за отсутствия методологии и визуализации результатов.

Известные на данный момент исследования в большей степени рассматривают вопросы применимости методов машинного обучения в конкретных случаях, или же наоборот – общие методы и подходы к внедрению искусственного интеллекта в процесс исследования термодинамических циклов. К тому же, индивидуальность и общая комплексность описываемых работ не гарантирует высокой точности воспроизведения подобных результатов при проверке. К тому же тематика данной работы соответствует основным принципам Государственной программы «Энергосбережение» на 2016 − 2020 годы (Раздел II, подпрограмма 1 «повышение энергоэффективности»).

Задачи дипломной работы:

* изучение литературных источников по методам моделирования термодинамических процессов;
* Проведение термодинамического анализа работы теплосиловых установок, работающих по органическому циклу Ренкина;
* Разработка математической модели для аналитического изучения органического цикла Ренкина;
* Внедрение принципов машинного обучения для анализа эффективности органического цикла Ренкина в рамках разработанной модели

**ГЛАВА 1  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА**

## 1.1 Органический цикл Ренкина

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

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

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

В настоящее время известно более 200 электростанций на ОЦР, и это число растет огромными темпами. Большинство установок применяются для обеспечения работы ТЭЦ на биомассе, геотермальных источниках или для использования остаточного 8 тепла. Однако впервые эта технология была применена в области геотермальной энергетики.

Схема ОЦР немного меньше, чем схема классического цикла: одну теплообменную установку можно применять для трех фаз: преднагрев, перегрев и испарение. На рис. 1, 2 изображены две принципиальные схемы, ОЦР. На рис. 1 приведена схема органического цикла Ренкина без регенератора, на рис. 2 – схема органического цикла Ренкина регенератором.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.1 Схема ОЦР без  регенератора | Рис.2 Схема ОЦР с регенератором |

На рис. 1 в нагреватель подается жидкое рабочее тело при помощи насоса, где оно испаряется, далее, расширяясь при попадании в турбину, пар совершает работу. Далее электрогенератор приводится в действие вращением вала турбины. Совершивший работу пар охлаждается и конденсируется. После этого жидкое рабочее тело попадает обратно в насос и цикл завершается. В то же время в схеме на рис. 2 часть тепловой энергии рабочего тела отдается сжатой жидкости и попадает обратно в нагреватель, при попадании рабочего тела в регенератор после выхода из турбины. Для переноса тепловой энергии от источника к рабочему телу может использоваться промежуточный теплоноситель в виде термального масла. Данное решение позволяет нивелировать возможный локальный перегрев рабочего тела. В органическом цикле Ренкина можно использовать как турбины, так и поршневые детандеры – ключевым критерием при выборе является величина энергетического потока. Стоит заметить, что, при флуктуации тепловых потов внешнего источника предпочтительнее использовать поршневые детандеры.

Рассмотрим процессы протекающие в ОЦР:

1-2 – адиабатическое сжатие рабочего тела насосом при неизменной энтропии

2-3 – рабочее тело доводится до состояния насыщенной жидкости путем подогрева в регенераторе и нагревателе.

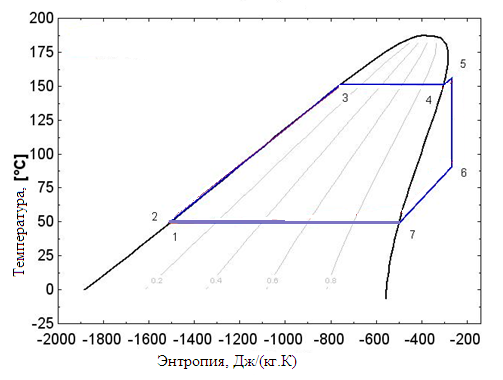
3-4 – в испаритель, при постоянных температуре и давлении, подводится дополнительное тепло, доводя рабочее тело до состояния насыщенного пара

Рис.3 Температурно-энтальпийная диаграмма органического цикла Ренкина

4-5 – подводом дополнительной теплоты рабочее тело доводится до состояния перегретого пара;

5-6 – механическая работа преобразуется в электрическую энергию путем адиабатического расширения рабочего тела в турбине;

6-7 – при постоянном давлении, рабочее тело в виде пара проходит через регенератор, где часть тепловой энергии отводится для подогрева рабочего тела в жидком состоянии;

7-1 – влажный пар поступает в конденсатор, и посредством изобарического и изотермического отвода тепла рабочее тело переходит в состояние насыщенной жидкости.

## 1.2 Применение органического цикла Ренкина

**1.2.1 Биомасса и комбинированная теплоэнергетика**

Источники тепла в виде биомассы доступны на ряде предприятий сельской промышленности. Для повышения эффективности такие источники тепла целесообразно использовать непосредственно на месте получения по двум причинам:

1. Физико-химические свойства данного топливо кратно увеличивают затраты на транспортировку, по сравнению с ископаемыми аналогами.

2. Характеристики установок на ОЦР позволяют удовлетворить спрос на тепло и электроэнергию только на конкретных производствах, а также повысить независимость от внешней сети.

Мощности локальных генераторных установок (<1-2МВт) делают использование классических паровых циклов экономически неэффективными, и обуславливает использование мелкомасштабных установок.

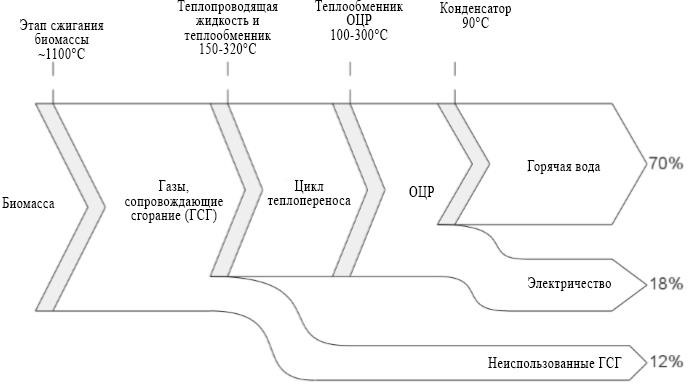
Для примера на рис. 5, электрическая эффективность данной системы ТЭЦ довольно низка (18%), хотя общая эффективность системы составляет 88%, что значительно выше, чем у централизованных электростанций, в которых теряется большая часть остаточного тепла.

Рис. 4 Принцип работы ОЦР на биомассе

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

Предовой технологией генерации энергии из низкопотенциальных источников биологического происхождения является газификация биомассы – метод превращения органических веществ и продуктов биомассы в синтетический газ, состоящий в основном из H2, CO, CO2, CH4. Полученный газ очищается от твердых веществ и фильтруется, после чего может использоваться в виде топлива для ДВС или газовой турбины.

Несмотря на то, что экономическая эффективность использования органического цикла Ренкина на биомассе достаточно низка, а эксплуатационная целесообразность носит отрицательный характер, газификация позволяет получить более высокое отношение мощности к выработанному теплу, что в итоге компенсирует описанные выше затраты. Следует также отметить, что OЦР - это хорошо зарекомендовавшая себя технология, в то время как фактически действующие газификационные установки являются в основном прототипами для демонстрационных целей.

**1.2.2 Геотермальная энергия**

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

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

Таблица 1. Характеристика геотермальных источников

Однако, в данных системах для рекуперации тепла при приемлемой температуре скважины должны быть пробурены в грунте, как для добывающей, так и для возвратной скважины (Рис. 6). Горячий раствор откачивается из первой и впрыскивается во вторую при более низкой температуре. В зависимости от геологической конфигурации, скважины могут иметь глубину до нескольких тысяч метров, что требует нескольких месяцев непрерывной работы. Это приводит к увеличению инвестиционных затрат (до 70%) для использования геотермальной установки. Низкотемпературные геотермальные установки ОЦР также характеризуются относительно высоким вспомогательным потреблением: насосы потребляют от 30 до более чем 50% выходной мощности. Основным потребителем является насос, который должен обеспечивать циркуляцию раствора на больших расстояниях. Расход рабочей жидкости насосом также выше, чем в более высоких температурных циклах, поскольку соотношение между расходом насоса и выходной мощностью турбины (“коэффициент обратной работы”) увеличивается с уменьшением температуры испарения.

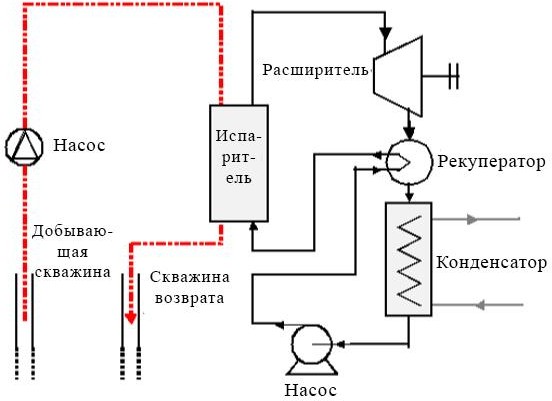


Рис.5 Схема ОЦР для геотермальной установки

Высокую температуру геотермальных источников позволяет парировать режим комбинированного производства тепла и электроэнергии, путем использования более горячей жидкости охлаждения установки для отопления. Так, снижая электрический КПД установки, можно повысить ее общую эффективность.

**1.2.3 Солнечная энергетическая установка**

Концентрирование солнечной энергии - это хорошо зарекомендовавшая себя технология: положение солнца отслеживается и лучи отражаются на коллектор, передавая тепло жидкости. Далее она используется в термодинамическом цикле, производящем энергию. Рассмотрим три основные технологии концентрирования солнечного света: параболическая тарелка, солнечная башня и параболический желоб.

Наиболее высокий коэффициент концентрации, и, соответственно, более высокие температуры обеспечивают солнечные башни и параболические тарелки. Для таких установок лучше всего подходит двигатель Стирлинга (в случае малых установок), а также паровой или же комбинированный цикл для солнечных башен.

Параболические желоба более пригодны для производства энергии при помощи классических паровых циклов Ренкина, так как они работают при более низких, порядка 300 °С - 400 °С, температурах. Однако требования эффективности к параметрам цикла, справедливые и для остальных используемых низкопотенциальных источников тепла, остаются неизменны: высокие температура, давление и мощность.

Возможность работать при более низких температурах и масштабировать общую мощность энергетической установки делают органический цикл Ренкина перспективной технологией для снижения необходимых затрат на локальных производствах.

**1.2.4 Утилизация тепла на механическом оборудовании и промышленных процессах**

Остаточное тепло на многих промышленных предприятиях не отличается высокой температурой. На крупномасштабных установках это тепло обычно не может быть повторно использовано на месте, или, например, для теплоснабжения. Поэтому оно выбрасывается в атмосферу. Это приводит к двум типам загрязнения:

1. Загрязняющие вещества (CO2, NOx, SOx, HC), содержащиеся в газах, могут создавать проблемы для здоровья или окружающей среды.

2. Сброс тепла может привести к изменению теплового фона, нарушить тепловое равновесие и оказать негативное влияние на биоразнообразие.

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

Некоторые отрасли промышленности обладают особенно высоким потенциалом рекуперации отработанного тепла. Как, например, цементные производства, где около 40% тепла рассеивается в дымовых газах. Выбросы CO2 в цементной промышленности составляют 5% от общего объема мировых выбросов CO2, причем половина из них приходится на сжигание ископаемого топлива в печах. К другим возможным отраслям относятся черная металлургия (например, 10% выбросов CO2 в Китае), нефтеперерабатывающие заводы или химическая промышленность.

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

**1.2.5 Рекуперация тепла в двигателях внутреннего сгорания**

ДВС использует только треть энергии сгорания топлива для движения автомобиля. Для обычного 1,4-литрового ДВС, тепловая эффективность которого колеблется от 15 до 32%, через радиатор выделяется 1,7-45 кВт (при температуре, близкой к 80-100°С) и 4,6 - 120 кВт через выхлопные газы (400-900°с). Система рекуперации остаточного низкопотенциального тепла при помощи органического цикла Ренкина является перспективным методом (по сравнению с термоэлектрическим и абсорбционным циклическим кондиционированием воздуха). Решение использовать ОЦР с ДВС не является новаторским – первые технологические прототипы появились во время топливного кризиса 70-х годов. Компания Mack Trucks разработала и собрала экспериментальный прототип системы, работающей на выхлопных газах 288-сильного ДВС. Испытание на дороге протяженностью 450 км показали хорошие технические и экономические перспективы: расход топлива уменьшился на 12,5%. Нынешние системы отличаются от систем того времени из-за научно-технического прогресса в области расширительных устройств и более широкого спектра рабочих жидкостей. Однако крупнотиражного коммерческого решения пока нет.

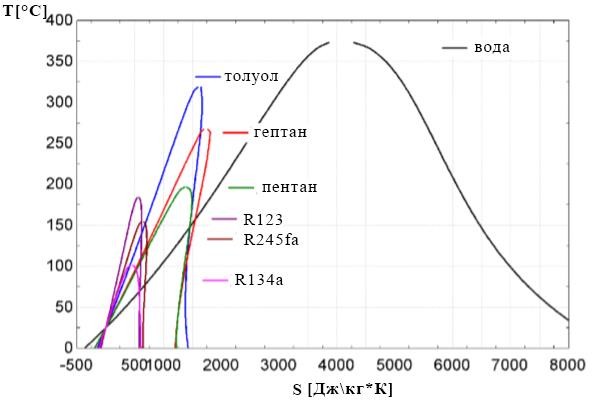
Большая часть известных на данный момент установок по рекуперации остаточного тепла ДВС используют тепловую энергию системы охлаждения или выхлопной системы автомобиля. Для рекуперации отработанного тепла двигателя могут быть предложены различные архитектуры: система рекуперации тепла может быть системой прямого испарения или системой контура теплопередачи. В первом случае испаритель ОЦР непосредственно соединяется с выхлопными газами. Преимуществом такой конфигурации является высокая температура рекуперации тепла, что позволяет повысить эффективность цикла. Во втором случае термальное масло используется для рекуперации тепла выхлопных газов и затем направляется в испаритель. Эта система действует как буфер и уменьшает переходный характер источника тепла ОЦР, что упрощает управление им. Выход детандера может быть механическим или электрическим. При механической системе вал детандера непосредственно соединен с приводным ремнем двигателя с помощью муфты, чтобы избежать потерь мощности при слишком низкой выходной мощности цикла ОЦР. Основным недостатком такой конфигурации является навязанная скорость детандера: эта скорость является фиксированным соотношением оборотов двигателя и не обязательно является оптимальной скоростью для максимизации эффективности цикла. В случае производства электроэнергии расширитель соединяется с генератором переменного тока, используемым для заправки батарей или подачи вспомогательного оборудования, такого как кондиционер. Следует отметить, что нынешние автомобильные генераторы переменного тока демонстрируют довольно низкий КПД (примерно от 50 до 60%), что снижает выходную мощность ОЦР. Что касается расширителя, то насос может быть непосредственно подключен к приводному ремню, к валу расширителя или к электрическому двигателю. В последнем случае расход рабочей жидкости можно регулировать независимо, что значительно облегчает регулирование такой системы.

Управление системой является особенно сложным из-за переменного режима источника тепла. Однако оптимизация управления имеет решающее значение для повышения производительности системы. Как правило, необходимо контролировать как скорость насоса, так и скорость детандера, чтобы поддерживать необходимые условия (температуру, давление) на входе в детандер. Существует несколько перспективных разработок. Например, система, разработанная компанией Honda показала максимальную тепловую эффективность цикла в 13%. При скорости 100 км / ч это дает циклическую мощность 2,5 кВт (для двигателя мощностью 19,2 кВт) и представляет собой увеличение теплового КПД двигателя с 28,9% до 32,7%. Конкурирующей технологией, находящейся в стадии исследований и разработок, является термоэлектрический генератор (тэг), в основе которого лежит эффект Зеебека: его основными преимуществами являются существенно меньший вес, чем у системы OЦР, и отсутствие движущихся частей. Основными недостатками являются стоимость материалов (они содержат редкоземельные элементы) и низкая достигнутая эффективность.

**1.3 Сравнение с классическим циклом Ренкина**

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

1. Наклон кривой насыщенного пара отрицателен для воды, в то время как гораздо более вертикален для органических жидкостей. Как следствие, ограничение качества пара в конце процесса расширения исчезает в цикле ОЦР, и нет необходимости перегревать пар перед входом в турбину.

Рис.6 Кривые насыщения некоторых органических жидкостей и воды

2. Разница в энтропии между насыщенной жидкостью и насыщенным паром гораздо меньше для органических жидкостей. Это также подразумевает, что энтальпия испарения меньше. Поэтому при одинаковой тепловой мощности массовый расход органической рабочей жидкости должен быть значительно выше, чем у воды, что приводит к более высокому расходу ресурса насоса.

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

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

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

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

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

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

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

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

1. Экономическая эффективность и доступность

2. Нетоксичность

3. Невоспламеняемость

4. Невредна окружающей среде: низкий потенциал глобального потепления (GWP), нулевой озоноистощающий потенциал (ODP).

5. Химическая стойкость: отсутствие ухудшения качества рабочей жидкости

6. Низкая вязкость: более низкие потери на трение, более высокие коэффициенты теплообмена

Однако паровые циклы, как правило, не являются полностью герметичными: вода теряется в результате утечек, дренажа или продувки котла. Поэтому система водоподготовки должна быть интегрирована в силовую установку для подачи в цикл высокочистой деионизированной воды.

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

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

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

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

Таблица 2. Сравнение органического и классического циклов Ренкина

# ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

## 2.1 Использование Python для моделирования органического цикла Ренкина

В данной работе платформой для моделирования цикла был выбран язык программирования Python - высокоуровневый язык программирования, ключевыми особенностями которого являются удобство использования и простота чтения кода. Python - это открытая и растущая альтернатива MATLAB.

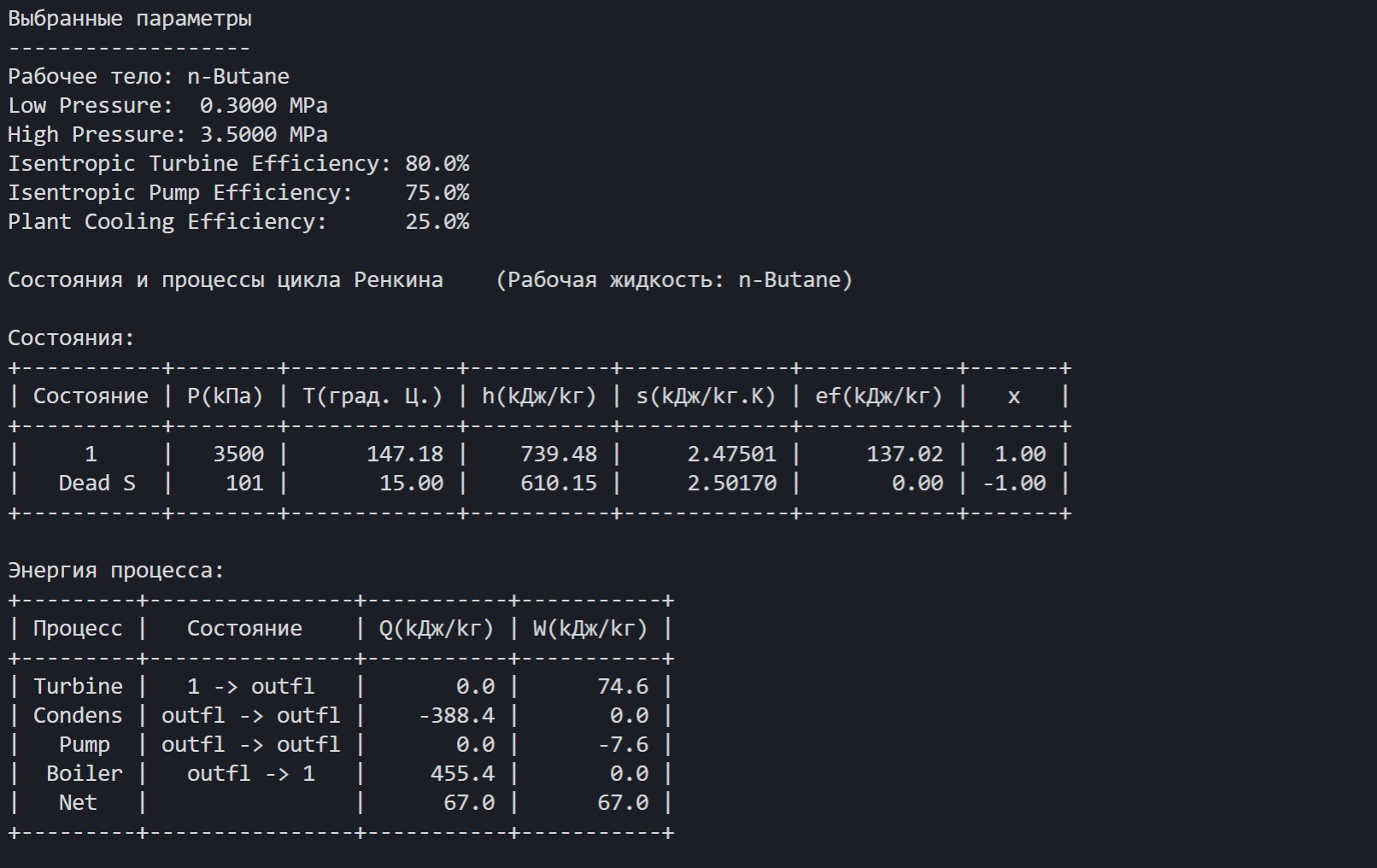


Рис.7 Интерфейс программы для моделирования ОЦР

Это объектноориентированный язык программирования с открытым исходным кодом, и он предлагает аналогичные функциональные возможности и характеристики, как и MATLAB. Модели на основе Python, включенные в python-пакет ORCmKit, являются производными от инструментов моделирования ORCSim. Архитектура моделей и схема решения были первоначально вдохновлены другим программным обеспечением с открытым исходным кодом, ACHP, посвященным моделированию кондиционеров и тепловых насосов. Модели на основе Python используют преимущества объектно-ориентированной среды для достижения высокой модульности. Поэтому довольно легко интегрировать дополнительные компоненты или модели в общий цикл, не влияя на структуру ядра кода. Библиотека на основе Python также предоставляет графический интерфейс для удобства использования. Для моделирования были использованы специально разработанные узкоспециализированные пакеты находящиеся в открытом доступе.

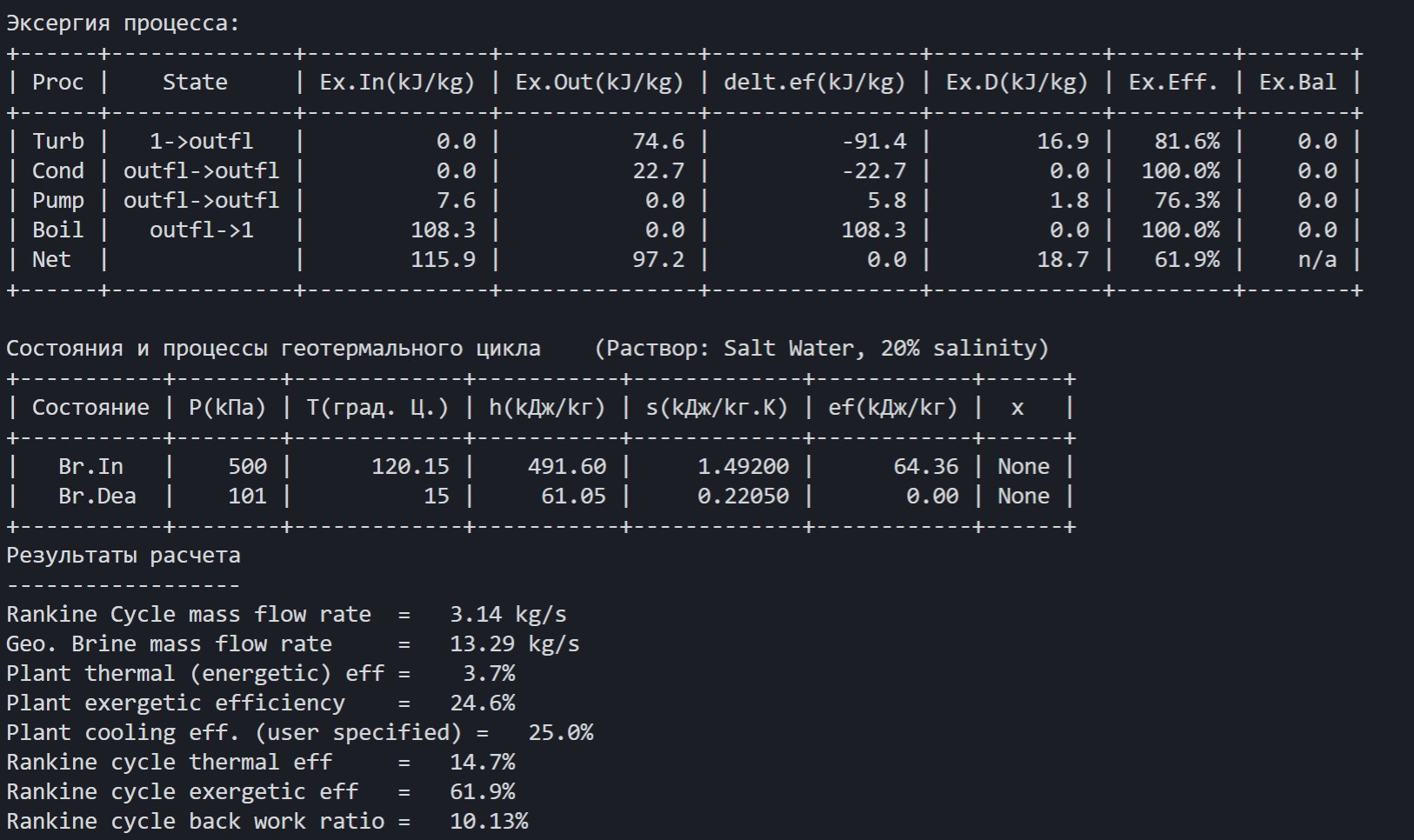


Рис.8 Вывод характеристик моделирования

В общем, говоря о целях выбора данной платформы, стоит отметь ряд преимуществ Python перед аналогичными инструментами, в частности MATLAB. В том числе:

1. Доступность – бесплатное распространение и поддержка на всех популярных ОС.

2. Открытый исходный код – абсолютно все элементы программного обеспечения доступны для изменения и модификации.

3. Развитая пользовательская поддержка – большое количество ресурсов для обсуждения и решения проблем, возникающих в процессе работы.

4. Заметно меньшая ресурсоемкость – размер всего инструментария на Python для данной работы занял не более 1Гб на жестком диске.

5. Свобода выбора среды работы – язык поддерживается всеми существующими редакторами кода.

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

**2.2 Моделирование цикла с заданными параметрами**

Для построения программы моделирования органического цикла Ренкина с заданными параметрами был использован язык Python со специализированными пакетами:

1. CoolProp(6.2.1)

2. Cycler (0.10.0)

3. Kiwisolver(1.0.1)

4. Matplotlib(3.0.2)

5. Numpy(1.16.0)

6. Prettytable(0.7.2)

7. Pyparsing(2.3.1)

8. python-dateutil(2.7.5)

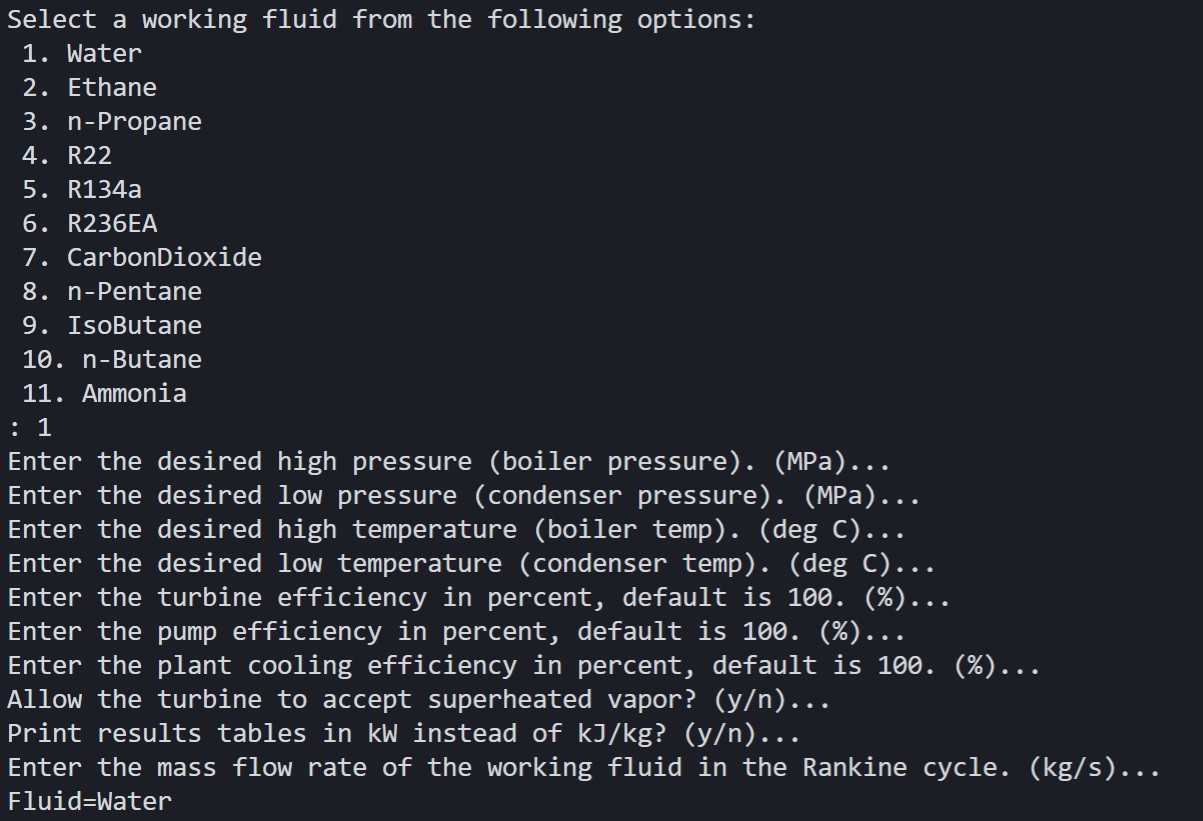
9. six(1.12.)0

Рис.9 Пример интерфейса ввода начальных параметров цикла

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



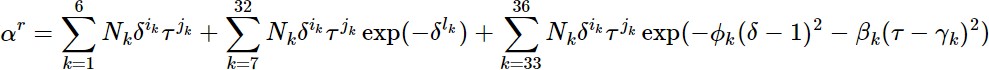
где ρc и Tc - критическая плотность жидкости, если она является чистой жидкостью. Для псевдочищенных смесей критическая точка обычно не используется в качестве точки восстановления состояния, и часто вместо нее используется максимальная температура конденсации на кривой насыщения. Безразмерная энергия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



где α0-вклад идеального газа в энергию Гельмгольца, а ar-остаточный вклад в энергию Гельмгольца, который объясняется неидеальным поведением. Для заданного множества δ и τ известны все члены α0 и ar. Точная форма энергетических величин Гельмгольца зависит от жидкости.



и безразмерная остаточная энергия Гельмгольца:



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



Удельная внутренняя энергия:



Удельная энтальпия:



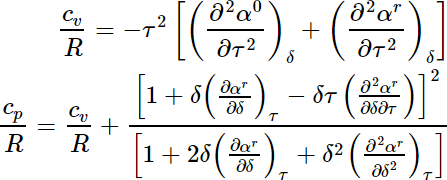
Которая также может быть записана как:



Удельная энтропия задается по формуле:



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



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

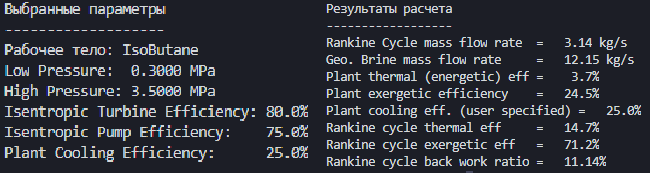
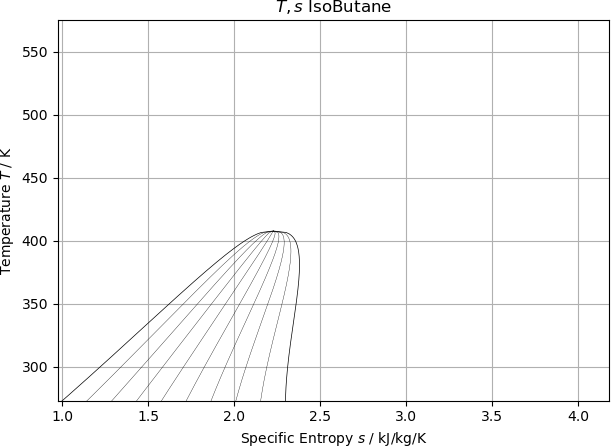


Рис.11 Результаты моделирования для изобутана

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

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

**2.3 Применение методов машинного обучения**

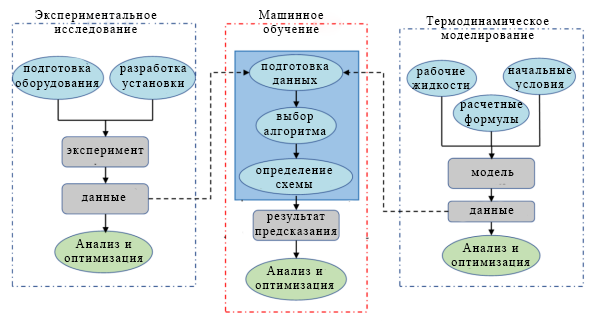
****На рис. 1 представлен общий обзор различий и связей между представленным в данной работе методом исследования и традиционными методами.

Рис.12 Принцип внедрения машинного обучения

Прежде всего, это традиционные методы, включающие в себя метод экспериментальных исследований и метод термодинамического моделирования, а метод этой работы - метод машинного обучения. Связь между ними заключается в том, что они имеют один и тот же общий рабочий процесс. Они оба каким-то образом получают результаты данных о производительности, а затем анализируют и оптимизируют их. А результаты машинного обучения предсказываются на основе экспериментальных или смоделированных данных. Разница между ними заключается в том, что оба экспериментальных или методы моделирования должны вычислять результаты производительности в соответствии с традиционной термодинамической теорией и уравнениями, в то время как машинное обучение должно получать результаты производительности путем прогнозирования, и его внутренняя работа не имеет ничего общего с термодинамикой. Одной из основных целей данной дипломной работы является изучение осуществимости и эффективности нового метода, поэтому данное исследование выбирает только термодинамическое моделирование, а не эксперимент в качестве источника данных машинного обучения, чтобы избежать дополнительных затрат.

Рис.13 Процесс работы с нейронной сетью

**2.4 Нейронная сеть обратного распространения ошибки**

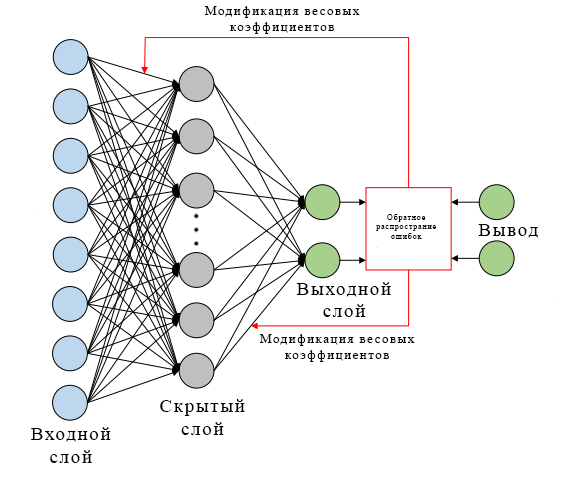
Нейронная сеть обратного распространения ошибки (англ. backpropagation neural network) считается одной из наиболее широко используемых и зрелых искусственных нейронных сетей. Это многослойная нейронная сеть прямой связи с алгоритмом обучения и обратного распространения ошибок, изображенная на рисунке.

Рис.14 Схема нейронной сети обратного распространения ошибки

Она состоит из входного слоя, скрытого слоя и выходного слоя.

Узлы в скрытом слое принимают значения из входного слоя и выполняют нелинейную обработку. Результаты скрытого слоя, наконец, доставляются на выходной слой. Процесс, упомянутый выше, называется “соединение с прямой передачей”. Затем ошибки между выходными значениями и ожидаемыми значениями будут вычислены с помощью уравнения расчёта ошибок. Если ошибки выходят за пределы указанного интервала, будет выполнен процесс распространения ошибок для изменения весовых коэффициентов нейронной сети. Этот процесс называется “подключением обратной связи по ошибке”. Ключевые параметры алгоритма BPNN заключаются в скорости обучения, количестве скрытых слоев, количестве скрытых нейронов и т.д.

Рассмотрим два математических уравнения для обратного распространения на рисунке 15. Верхнее уравнение определяет метрику ошибки суммы квадратов и является отправной точкой для обратного распространения. обозначает целевое значение, а - вычисленное выходное значение.

Цель обучения обратному распространению состоит в том, чтобы свести к минимуму квадратическую ошибку. Для этого необходимо вычислить градиент функции ошибки. Градиент представляет собой производную исчисления со значением, равным +1.23 или -0.33. Знак градиента указывает, следует ли увеличивать или уменьшать веса и смещения, чтобы уменьшить ошибку. Величина градиента используется вместе с коэффициентом обучения, чтобы определить, насколько увеличить или уменьшить веса и смещения.

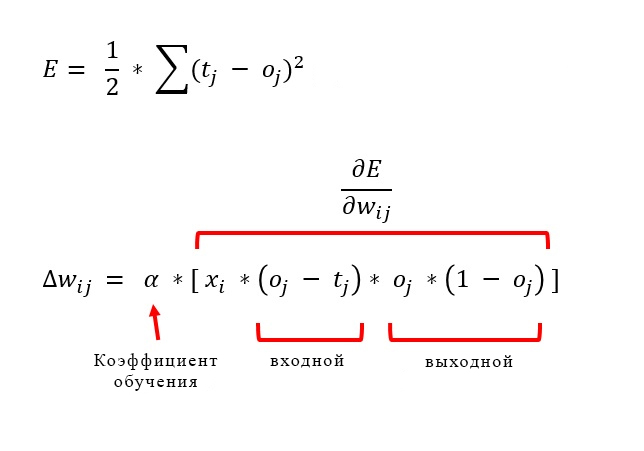


Рис.15 Уравнение весовых коэффициентов

Используя некоторые математические методы, вы можете вычислить градиент. Нижнее уравнение на рис. 15 - это правило обновления веса для одного выходного узла. Величина изменения определенного веса - это скорость обучения (альфа), умноженная на градиент. Градиент имеет четыре члена: - это входные данные, связанные с исследуемым весом, ( - ) является производной внешней части функции ошибки, показатель 2 падает на фронт, отменяя 1/2 (что является единственной причиной, по которой существует член 1/2), затем вы умножаете на производную внутренней части, которая в -1 раз больше производной функции, используемой для вычисления выходного узла.

Третий и четвертый члены градиента исходят из функции активации, используемой для выходных узлов. Подводя итог, можно сказать, что правило обновления веса обратного распространения зависит от производной функции ошибки и производной функции активации.

Есть некоторые важные дополнительные детали. Термин ошибки в квадрате может быть определен с помощью вместо и давать ту же ошибку из-за операции возведения в квадрат. Но изменение порядка приведет к изменению знака результирующего (целевого) члена в градиенте. Это, в свою очередь, влияет на то, следует ли добавлять член дельта-w или вычитать его при обновлении весов и смещений.

**2.5 Особенности реализации нейронной сети**

Опишем структуру класса нейронной сети Python. Определения функций и методов Python начинаются с ключевого слова def. Все методы класса и члены данных имеют по существу общедоступную область видимости, в отличие от таких языков, как Java и C #, которые могут накладывать частную область видимости. Встроенный метод \_\_init\_\_ (с двумя ведущими и двумя завершающими символами подчеркивания) можно условно рассматривать как конструктор. Все определения методов класса должны включать ключевое слово self в качестве первого параметра, за исключением методов, которые украшены атрибутом @staticmethod.

Метод NeuralNetwork.train реализует алгоритм обратного распространения. Каждому весу и смещению соответствует градиент. Префикс «ho» означает «скрытый для вывода». Точно так же «ob» означает «выходное смещение», «ih» означает «вход-скрытый» и «hb» означает «скрытое смещение». Члены класса ni, nh и no - это количество входных, скрытых и выходных узлов соответственно. При работе с нейронными сетями обычно, но не обязательно, работать с типом данных float32, а не float64.

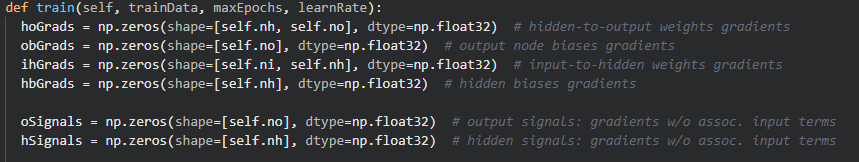


Рис.16 Инициализация нейронов

Каждый скрытый и выходной узел имеет связанный сигнал, который по сути является градиентом без входного члена. Эти массивы в основном предназначены для удобства программирования.

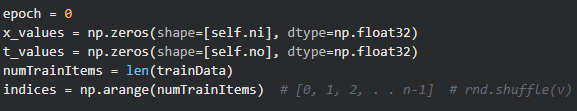
.

Рис.17 Подготовка основного цикла обучения

Встроенная функция перемешивания использует мини-алгоритм Фишера-Йейтса для шифрования порядка обучающих индексов. Следовательно, переменная idx указывает на текущий обрабатываемый элемент обучения. Внутри основного цикла входные и целевые значения отделяются от текущего обучающего элемента, а затем значения выходного узла вычисляются с использованием входных значений и текущих значений весов и смещения.

Сигналы скрытых узлов:

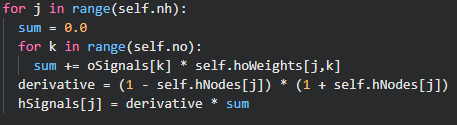


Рис.18 вычисление сигналов скрытых узлов

Это самая сложная часть обратного распространения. Переменная sum накапливает произведение сигналов выходных узлов и весов скрытых для вывода. Это совсем не очевидно. Следует напомнить, что класс NeuralNetwork имеет жестко запрограммированную функцию активации скрытого узла tanh. Переменная производной содержит производную исчисления от функции tanh.

Затем вычисляются градиенты веса от входных к скрытым и градиенты смещения скрытых узлов:

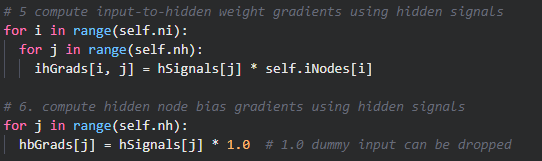


Рис.19 Градиенты веса и градиенты смещения скрытых узлов

Как и раньше, градиент состоит из сигнала и связанного с ним входного члена, и фиктивное входное значение 1.0 для скрытых смещений может быть опущено.

Если представить механизм ввода-вывода как идущий слева направо (от ввода к выводу до скрытого), то градиенты должны вычисляться справа налево (градиенты от скрытого к выходному, затем градиенты от ввода к скрытому). После того, как все градиенты были вычислены, можно обновить веса в любом порядке.

Дельта веса - это скорость обучения, умноженная на градиент. Здесь умножается на -1, а затем добавляется дельта, потому что предполагается, что ошибка использует , и поэтому градиент имеет член (выход - цель).

Затем обновляются смещения скрытых узлов:

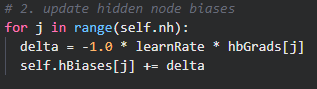


Рис.20 Смещения скрытых узлов.

Из структуры цикла следует, что вы можно комбинировать обновление весов от входных до скрытых и обновление скрытых смещений. Затем с помощью этих операторов обновляются веса скрытых для вывода и смещения выходных узлов.

Стоит обратить внимание, что все обновления используют одинаковую скорость обучения. Усовершенствованная версия обратного распространения, названная Адам ("adaptive moment estimation"),была разработана в 2015 году. Адам использует другую скорость обучения и несколько других приемов и считается передовой.

Основной цикл обучения завершается обновлением счетчика итераций и печатью сообщения о ходе выполнения, а затем метод NeuralNetwork.train завершается.

Здесь сообщение о ходе выполнения будет отображаться каждые 10 итераций. Окончательные значения весов и смещений выбираются методом класса getWeights и возвращаются методом train для удобства.

# ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

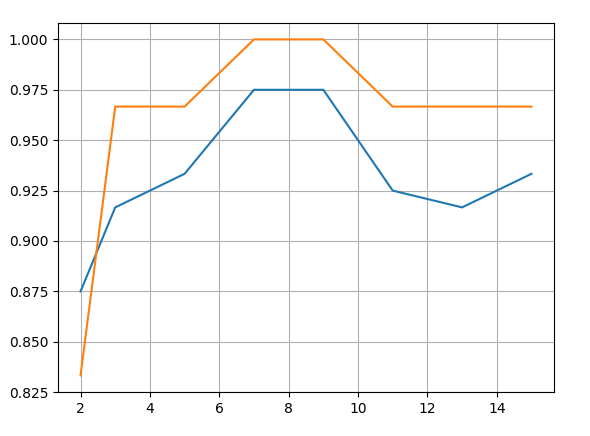
**3.1 Результаты определения параметров нейронной сети**

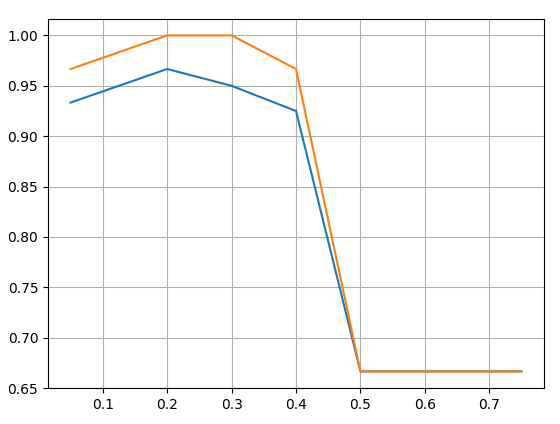
**3.1.1 Недостатки алгоритма**

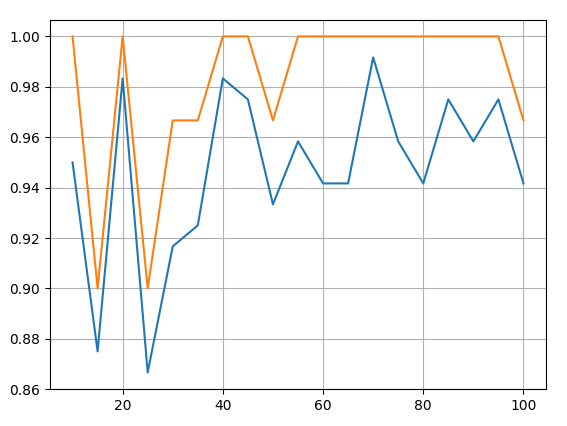
Алгоритм обратного распространения ошибки является довольно практичным и удобным решением, однако его использование может повлечь ряд проблем. Одним из самых критичных факторов является неопределённо долгий процесс обучения. При решении комплексных задач сеть может не обучиться, или потратить на это много часов или дней. Причиной этого может стать следующее:

1. Паралич сети - в процессе обучения сети значения весов могут превысить некоторые критические значения, при этом все или почти все нейроны будут работать при критических выходных значениях, в области, где производная сглаживающей функции очень мала. И так как распространяемая обратно ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически остановиться. Это обходят путем уменьшением размера шага η, но это увеличивает необходимые ресурсы и усложняет процесс обучения.
2. Локальные минимумы - метод градиентного спуска может не выйти из локального минимума. Обратное распространение основано на градиентном спуске, то есть спускается вниз по поверхности ошибок, постоянно корректируя веса в сторону минимума данной поверхности. Поверхность ошибки имеет сложную форму и образует комплексный рельеф в пространстве высокой размерности. Сеть может попасть в локальный минимум (неглубокую долину), когда рядом имеется гораздо более глубокий минимум. В точке локального минимума все направления ведут вверх, и сеть не способна из него выбраться. Основную трудность при обучении нейронных сетей составляют как раз методы выхода из локальных минимумов: каждый раз выходя из локального минимума снова ищется следующий локальный минимум тем же методом обратного распространения ошибки до тех пор, пока найти из него выход уже не удаётся.
3. Размер шага - если размер шага определен однозначно и достаточно мал, то сходимость будет слишком медленная, или же шаг слишком велик, то появляется риск возникновения паралича сети и неустойчивости. Оптимально изменять шаг до тех пор, пока не перестанет изменяться увеличение оценки в направлении антиградиента и уменьшать, если такого не происходит.

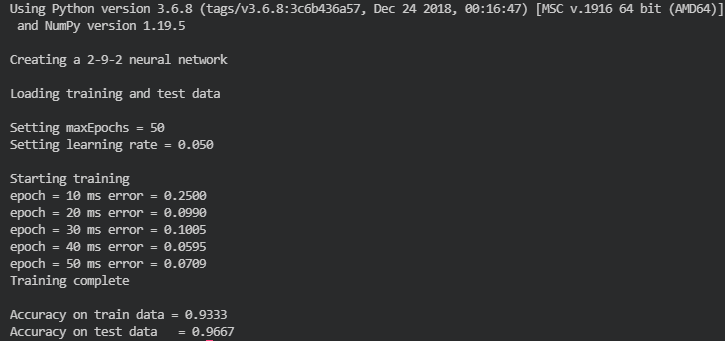
Следует также отметить возможность переобучения сети (overfitting), что является скорее результатом ошибочного проектирования её топологии и/или неправильным выбором критерия остановки обучения. При переобучении теряется свойство сети обобщать информацию. Весь набор образов, предоставленных к обучению, будет выучен сетью, но любые другие образы, даже очень похожие, могут быть распознаны неверно.



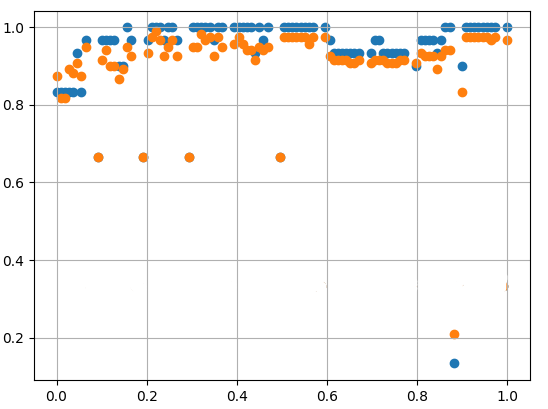




**3.2 Результаты предсказания эффективности органического цикла Ренкина**



**3.3 Степень внедрения**



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В ходе выполнения дипломного исследования разработана модельная лабораторная работа для аналитического изучения циклов Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара с учётом и без учёта потерь от необратимости, в результате выполнения которой студенты смогут:

2) Расчеты в рамках разработанной лабораторной работы показывают, что:

1. значение термического КПД цикла Ренкина с перегревом пара, полученное при начальных параметрах , , , составляет и совпадает с данными известных учебных литературных источников [3];
2. значения КПД цикла Ренкина с перегревом пара, рассчитанные при одних и тех же начальных параметрах цикла, выше по сравнению с циклом Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), как для идеального (в частности, ), так и для реального (в частности, ) циклов Ренкина, что полностью соответствует результатам термодинамического анализа энергетических установок данного типа;
3. значения КПД идеальных циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) не зависят от внутренних относительных КПД турбины (цилиндров высокого и низкого давления турбины) и насоса, а только от термодинамических параметров цикла, что в точности согласуется с теорией реализации циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с учётом потерь от необратимости;
4. увеличение значений температуры и давления на выходе из нагревателя (парогенератора), значений температуры на выходе из пароперегревателя увеличивает значения КПД как реального, так и идеального циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), что согласуется с известными результатами термодинамического анализа данных циклов [9].

Приведённые выше результаты моделирования показывают, что расчет КПД энергетических установок различного типа, выполненный с помощью разработанного для данной лабораторной работы программного обеспечения, приводит к верному результату, что доказывает ее практическую корректность и методическую важность для студентов, обучающихся по специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии».

3) В результате выполнения дипломного исследования разработаны методические указания к лабораторной работе «Анализ цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара», которые приведены в приложении А.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2016 Executive Summary / International Energy Agency. – 2016.

2. R.K. Kapooria. An analysis of a thermal power plant working on a Rankine cycle: A theoretical investigation / R.K. Kapooria, S. Kumar, K.S. Kasana // J. Energy South. Afr. – 2008. – Т. 19, № 1. – С. 77-83.

3. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. – 495 с.

4. Чухин, И.М. Техническая термодинамика. Часть 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ispu.ru/files/u2/book2/TD2\_19-06/index.htm. – Дата доступа: 20.04.2019.

5. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие для вузов / А.А. Александров. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. – 157 с.

6. Расчет и графическая иллюстрация основных термодинамических циклов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/tdc.html. – Дата доступа: 19.04.2019.

7. Михайлов Е. MatLab. Руководство для начинающих [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/matlab.htm. – Дата доступа: 10.04.2019.

8. International Association for the Properties of Water and Steam. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam / International Association for the Properties of Water and Steam. – 2007.

9. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебное пособие для неэнергетических специальностей вузов / Нащокин В.В. – Москва : Высшая школа, 1975. – 496 с.

10. Ровненская АЭС в энергетике Украины. – ОП «Ровненская АЭС», 2014.

Приложение 1