



Дипломная работа:

*Применение методов машинного обучения
для анализа эффективности
органического цикла Ренкина.*

Студента 4 курса
Нилова Ильи Витальевича

Научный руководитель:
ст. пр. кафедры энергофизики
Ларькин Андрей Викторович



Разработать методику применения методов машинного обучения для анализа эффективности органического цикла Ренкина.



Данная работа является актуальной и перспективной, поскольку ситуация загрязнения окружающей среды остаточным теплом все больше влияет на экологию, а исследований по данной теме недостаточно, из-за дороговизны и трудоемкости процессов, а также тематика работы соответствует основным принципам Государственной программы «Энергосбережение» на 2016 – 2020 годы (Раздел II, подпрограмма 1 «повышение энергоэффективности»).



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.



Рис.1 Схема
ОЦР без регенератора
(слева), схема ОЦР с
регенератором
(справа).



Органический цикл Ренкина

ОЦР состоит из следующих процессов:

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

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

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

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

5-6 - рабочее тело поступает в экспандер (турбину), где путем

Адиабатического расширения приводит в действие генератор, который преобразует механическую работу в электрическую энергию;

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

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

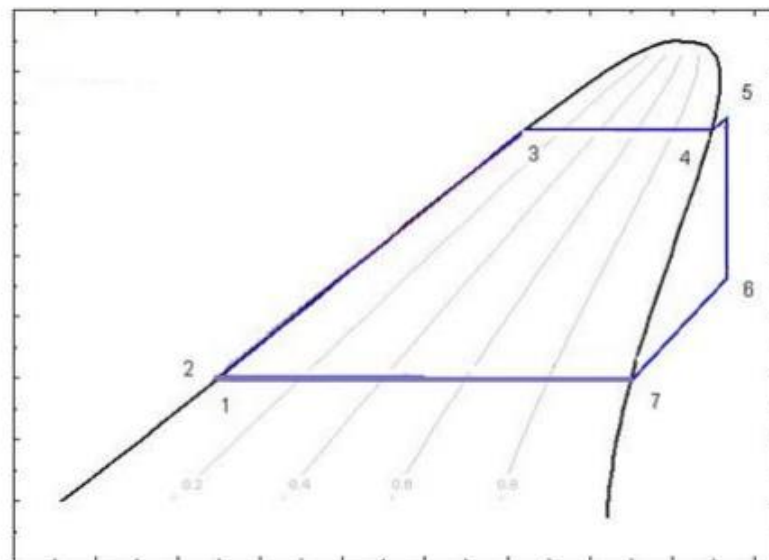


Рис.2 Температурно-энтальпийная диаграмма цикла ОЦР



Применение органического цикла Ренкина:

1. Биомасса и комбинированная теплоэнергетика
2. Геотермальная энергия
3. Солнечная энергетическая установка
4. Утилизация тепла на механическом оборудовании и промышленных процессах
5. процессах
6. Утилизация тепла в двигателях внутреннего сгорания

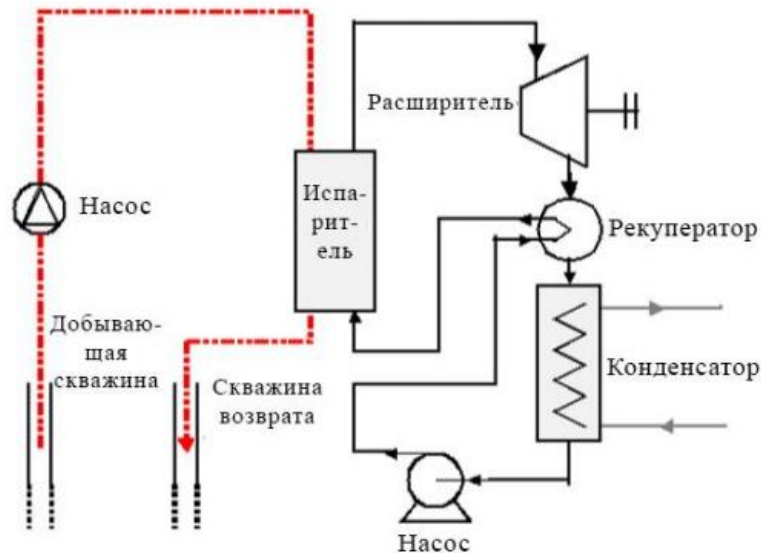


Рис. 3 Схема ОРЦ для геотермальной установки



На диаграмме T-s на рис. 4 показаны кривые насыщения воды и нескольких типичных органических жидкостей в системах ОЦР.

| 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. 1 Сравнение парового и органического циклов Ренкина

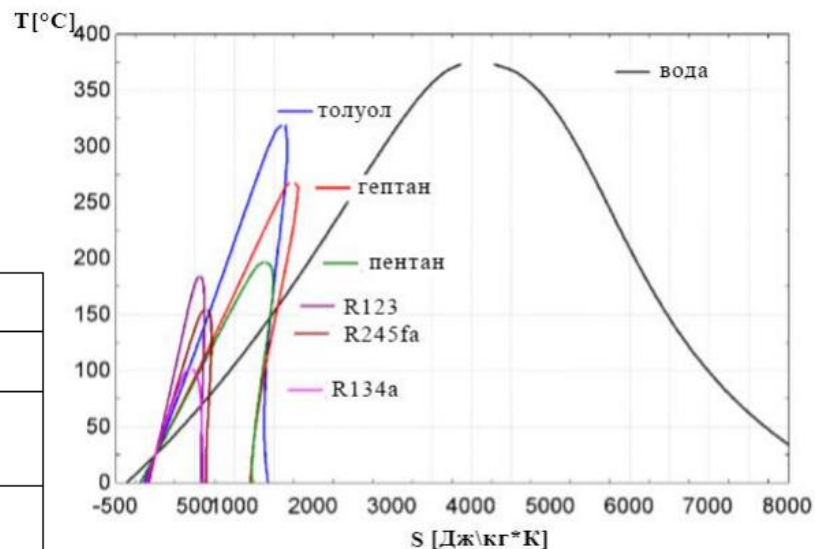


Рис. 4 Некоторые кривые насыщения



Эксергия процесса:

| Proc | State | Ex.In(kJ/kg) | Ex.Out(kJ/kg) | delt.ef(kJ/kg) | Ex.D(kJ/kg) | Ex.Eff. | Ex.Bal |
|------|--------------|--------------|---------------|----------------|-------------|---------|--------|
| Turb | 1->outfl | 0.0 | 74.6 | -91.4 | 16.9 | 81.6% | 0.0 |
| Cond | outfl->outfl | 0.0 | 22.7 | -22.7 | 0.0 | 100.0% | 0.0 |
| Pump | outfl->outfl | 7.6 | 0.0 | 5.8 | 1.8 | 76.3% | 0.0 |
| Boil | outfl->1 | 108.3 | 0.0 | 108.3 | 0.0 | 100.0% | 0.0 |
| Net | | 115.9 | 97.2 | 0.0 | 18.7 | 61.9% | n/a |

Состояния и процессы геотермального цикла (Раствор: Salt Water, 20% salinity)

| Состояние | P(kПа) | T(град. Ц.) | h(кДж/кг) | s(кДж/кг.К) | ef(кДж/кг) | x |
|-----------|--------|-------------|-----------|-------------|------------|------|
| Br.In | 500 | 120.15 | 491.60 | 1.49200 | 64.36 | None |
| Br.Dea | 101 | 15 | 61.05 | 0.22050 | 0.00 | None |

Результаты расчета

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

Рис. 5 Пример работы программы



Большинство исследований последних десятилетий 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. Мы пытаемся найти экономичный и эффективный метод, который мог бы быстро решить задачу расчета различных показателей эффективности системы ОЦР. С появлением и развитием искусственного интеллекта в последние годы появился новый способ решения этой проблемы. Поэтому в данной работе предложен метод прогноза производительности, анализа параметров и оптимизации на основе машинного обучения.

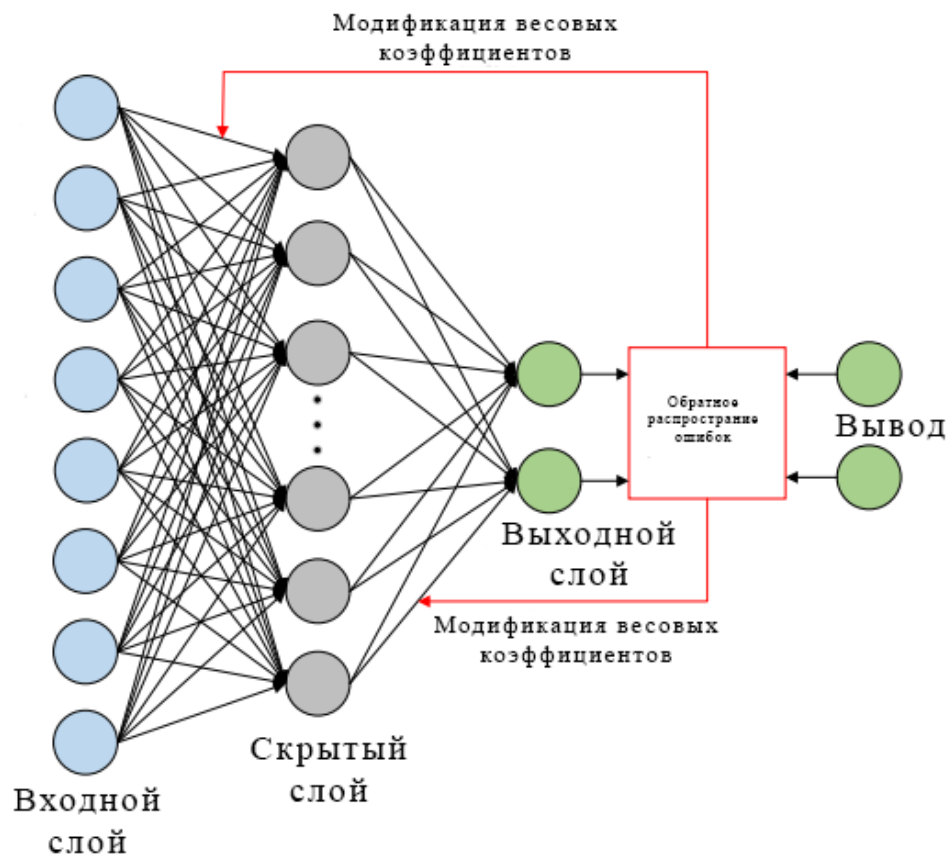


Рис. 6 Принципиальная схема простой нейронной сети обратного распространения

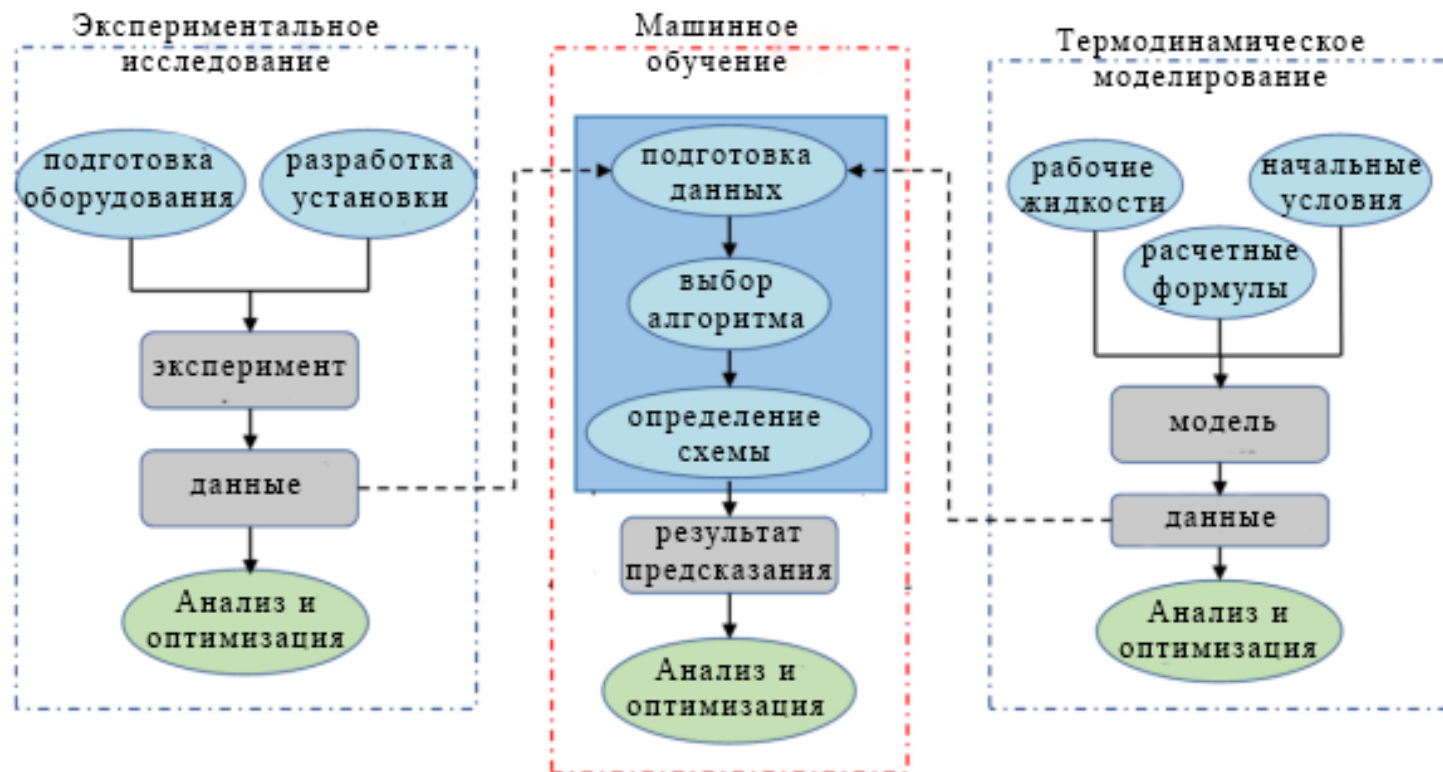


Рис. 7 Принципиальная схема подходов к различным видам исследований



| T_eva / kPa | T_h / K | T_pp / k | T_sh / k | T_sc / k | T_con / K | E_th | E_ex |
|-------------|---------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 500 | 400 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,380412 |
| 500 | 410 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,356552 |
| 500 | 420 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,336455 |
| 500 | 430 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,319295 |
| 500 | 440 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,304472 |
| 500 | 450 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,291539 |
| 500 | 460 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,280156 |
| 500 | 470 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,270061 |
| 500 | 480 | 5 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,261046 |
| 500 | 400 | 7 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,380412 |
| 500 | 410 | 7 | 0 | 0 | 308,15 | 0,101617 | 0,356552 |

Таблица 2. Исходный датасет



В целях уменьшения времени вычислений и меньшей загрузки вычислительных мощностей можно выполнить преобразование задачи регрессии к задаче классификации.

| E_th | E_ex | E_th eff | E_ex eff |
|----------|----------|----------|----------|
| 0,135006 | 0,505404 | 1 | 1 |
| 0,135006 | 0,473705 | 1 | 0 |
| 0,135006 | 0,447004 | 1 | 0 |
| 0,135006 | 0,424206 | 1 | 0 |

Таблица 3. Преобразованные данные



TERMINAL PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE

Creating a 2-10-2 neural network

Loading training and test data

Test data:

```
[ 0] 0.1 0.5 1.0 1.0
[ 1] 0.1 0.5 1.0 0.0
[ 2] 0.1 0.4 1.0 0.0
[ 3] 0.1 0.4 1.0 0.0
. . .
[200] 0.1 0.3 0.0 0.0
```

Setting maxEpochs = 50

Setting learning rate = 0.050

Starting training

epoch = 10 ms error = 0.3976

epoch = 20 ms error = 0.4002

epoch = 30 ms error = 0.3994

epoch = 40 ms error = 0.4008

epoch = 50 ms error = 0.3975

Training complete

Accuracy on 120-item train data = 0.4975

Accuracy on 30-item test data = 1.0000

End demo

Рис. 8 Результат тестового обучения нейронной сети обратного распространения



В результате работы проведено прогнозирование эффективности органического цикла Ренкина для рабочего тела R141b на основе разработанной нейронной сети обратного распространения и соответствующей модели. При этом

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

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

3) создан интерфейс программы, позволяющей произвести варьирование параметров нейронной сети для достижения оптимальных значений весовых коэффициентов и более эффективного ее обучения, что позволяет достичь точности обучения порядка 93%



Спасибо за внимание