

УДК 621.311.22

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

Ильичев В.Ю., Юрик Е.А.

*Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Целью работы, описанной в данной статье, являлась разработка программы расчёта и построения термодинамического цикла Ренкина (цикла паротурбинной установки) по его заданным начальным и конечным параметрам, а также по КПД используемых в нём агрегатов. Для расчёта цикла использован известный из литературы алгоритм. При создании программы также ставилась цель автоматизации расчётов для существенного уменьшения их трудоёмкости. При этом представляется возможным решить актуальную на данный момент проблему повышения качества проектирования и улучшения технико-экономических показателей паротурбинных установок. В качестве среды разработки программного продукта использован один из самых современных языков программирования Python с подключением модуля для создания графического интерфейса tkinter и библиотеки для вывода графиков matplotlib. Ключевой особенностью программы является использование специального модуля CoolProp, позволяющего получать физические и, в частности, термодинамические свойства рабочих тел (в данной работе использовались свойства воды). При отработке программы произведён расчёт характеристик цикла Ренкина для конкретной паросиловой установки, доказавший удобство использования языка Python для создания научных приложений. В программе реализован также алгоритм, позволяющий рассчитывать и строить графические зависимости термического КПД цикла от изменяющихся его начальных либо конечных термодинамических параметров. Дано заключение о проделанной работе и рекомендации по сферам применения её результатов.

**Ключевые слова:** термодинамика, термодинамический цикл, цикл Ренкина, паротурбинная установка, язык Python, библиотеки Python, модуль CoolProp

## DEVELOPMENT OF PROGRAM FOR RESEARCH OF THERMODYNAMIC RANKINE CYCLE

Ilichev V.Yu., Yurik E.A.

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

The purpose of the work described in this article was to develop a program of calculation and construction of a thermodynamic Rankine cycle (steam turbine plant cycle) according to its specified initial and final parameters, as well as according to the efficiency of the units used in it. An algorithm known from literature has been used to calculate the cycle. The purpose of the program creation was also to automate calculations to significantly reduce their labour consumption. At the same time, it is possible to solve the current problem of increasing the quality of design and improving the technical and economic indicators of steam turbine plants. The software development environment is one of the most modern Python programming languages, with a module connected to create graphical interface (tkinter) and a library to output graphs (matplotlib). The key feature of the program is the use of a special module CoolProp, which allows to obtain physical and in particular thermodynamic properties of working bodies (in this work water properties were used). During the program development, the Rankine cycle characteristics were calculated for a specific steam power plant, which proved the convenience of using the Python language to create scientific applications. The program also implements an algorithm that allows to calculate and build graphical dependencies of thermal efficiency of the cycle on changing initial or final thermodynamic parameters of the cycle. An opinion on the work done and recommendations on the application of its results were given.

**Keywords:** thermodynamics, thermodynamic cycle, Rankine cycle, steam turbine plant, Python language, Python libraries, CoolProp module

Цикл Ренкина – термодинамический цикл, по которому работают паросиловые или паротурбинные установки (ПТУ), являющиеся в настоящее время основными тепловыми агрегатами, производящими электрическую энергию в мире [1]. Соответственно, разработка любой паротурбинной установки начинается с нахождения расположения основных (характерных) точек цикла.

Чаще всего построение цикла Ренкина производится в так называемой i-s диаграмме, по оси абсцисс которой откладывается энтропия системы, а по оси ординат – энтальпия (рис. 1).

Цикл состоит из нескольких термодинамических процессов, протекающих последовательно и отделяемых точками их начала и окончания [2]:

1–2 – адиабатное расширение пара в турбине (изменение при этом энтальпии в турбине  $H_0$  называют располагаемым теплоперепадом);

1–2д – действительное расширение пара в турбине (изменение энтальпии при этом в турбине  $H_d$  называют использованным или действительным теплоперепадом);

2–3 – изобарный (и изотермический, если он происходит в области влажного пара) отвод теплоты в конденсаторе;

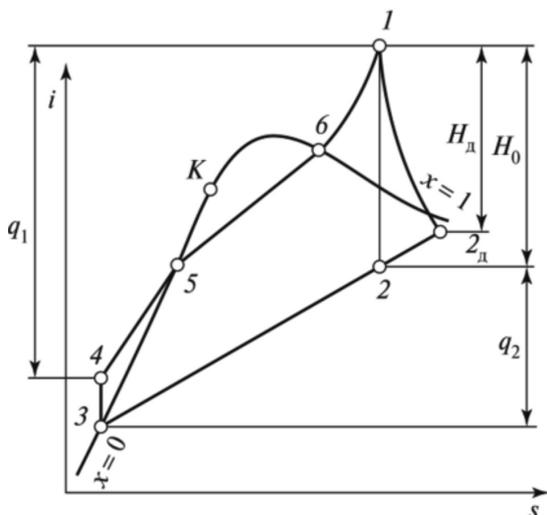


Рис. 1. Цикл Ренкина с характерными точками

- 3–4 – адиабатное повышение давления в питательном насосе;
- 4–1 – изобарный подвод теплоты в паровом котле, который состоит из трёх участков:
- 4–5 – нагрев воды до кипения;
- 5–6 – парообразование;
- 6–1 – перегрев пара.

Буквой К обозначена критическая точка, выше которой водяная фаза не может существовать и водяной пар ведёт себя как газ – заполняет весь выделенный объём [3]. Такой пар называют перегретым.

Левая пограничная линия (левее точки К) разделяет области воды и пара со степенью сухости  $x = 0$ . Правая пограничная линия (правее точки К) разделяет области перегретого пара и пара со степенью сухости  $x = 1$ .

С помощью  $q_1$  обозначена теплота, подведённая к рабочему телу (воде) в котле,  $q_2$  – теплота, отведённая в конденсаторе.

Изображение цикла Ренкина в  $i$ - $s$  диаграмме позволяет не только наглядно показать протекание основных процессов в паросиловой установке, но и найти параметры, характеризующие эффективность цикла. Вычислив влияние координат характерных точек цикла на эффективность, можно целенаправленно оптимизировать параметры цикла.

Таким образом, для повышения качества проектирования паросиловых установок, работающих по циклу Ренкина, необходим быстрый и малозатратный способ нахождения характерных точек данного цикла [4]. В связи с этим целью данной работы является автоматизация построения необходимых зависимостей и характерных точек с помощью специально разработанной компьютерной программы.

## Материалы и методы исследования

Для создания расчётной программы использовался алгоритм определения положения точек начала и окончания термодинамических процессов ПТУ, а также различных типов коэффициентов полезного действия (КПД) установки, приведённый в работе [5].

Средством разработки программного продукта являлся получивший широкое распространение в настоящее время язык программирования Python. В данном случае он был выбран благодаря своим неоспоримым достоинствам:

- лёгкость написания программ научной направленности;
- большой набор средств для создания графического интерфейса пользователя (GUI);
- возможность вывода графиков, обладающих высоким качеством, а также автоматическое их сохранение в виде файлов распространённых графических форматов во время выполнения программы;
- возможность создания программы в виде одного исполняемого файла.

Но главным критерием выбора языка Python являлось то, что для него существует мощный программный модуль CoolProp, позволяющий получать физические и, в частности, термодинамические свойства многих веществ. Текущая версия содержит свойства 122 веществ, среди которых в данном исследовании было использовано вещество вода-пар. Для аппроксимации свойств воды и водяного пара в модуле CoolProp используется новейшая на данный момент методика IF97 [6].

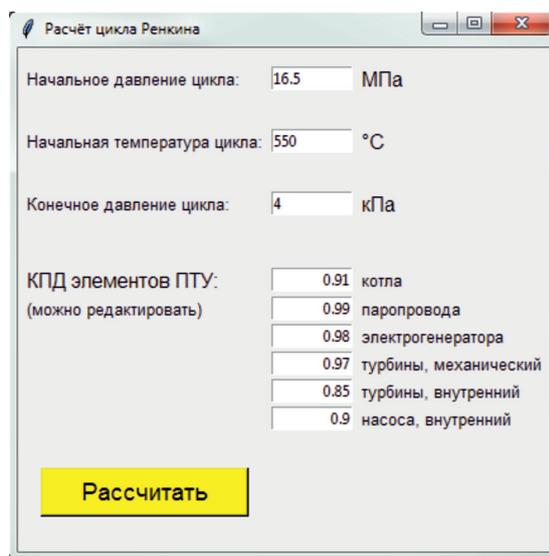


Рис. 2. Интерфейс программы для расчёта цикла Ренкина

Основное окно программы для расчёта цикла Ренкина было создано с помощью

подключённого модуля – библиотеки tkinter языка Python. Командами данного модуля созданы пояснительные надписи, поля для ввода исходных данных, кнопка запуска расчёта, [7]. Вывод результатов расчёта цикла реализован в виде графиков с использованием модуля matplotlib [8].

Созданный интерфейс программы показан на рис. 2.

Как видно из рисунка, для расчёта цикла необходимо ввести лишь начальные и конечные параметры водяного пара, а также КПД элементов паротурбинной установки.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для отработки функций программы использовался приведённый в [5] пример расчёта основных точек и характеристик цикла Ренкина. Исходные данные согласно данному примеру введены в главное окно программы и запущен расчёт.

На рис. 3 приведён построенный в *i-s* диаграмме с помощью программы цикл.

В верхней части изображения также выводятся два КПД: термический КПД цикла, определяющий его термодинамическое совершенство, и эффективный КПД действительного цикла, полученный с учётом дополнительных потерь в котле, паропроводах, в электрогенераторе, в насосе, механических потерь в турбине.

Первый, термический, КПД цикла зависит в большой степени от выбора положения основных точек цикла, которое

в некоторых пределах можно изменять. Для демонстрации этого влияния написан ещё один вариант рассматриваемой программы. В нём осуществляется вывод графика зависимости термического КПД от начального давления (в точке 1 – перед турбиной).

На рис. 4 показана данная зависимость при начальной температуре  $t_1 = 550^\circ\text{C}$  (такой же, как и при построении цикла в вышеприведённом примере). Давление  $p_1$  изменялось от 5 до 50 МПа. Остальные исходные данные те же, что и на рис. 1.

Рисунок демонстрирует, что максимального значения термический КПД цикла Ренкина в данном случае достигает при давлении  $p_1$ , примерно равном 38 МПа.

Подобный график можно вывести и для любых других исходных данных. Если снизить начальную температуру  $t_1$  до  $450^\circ\text{C}$ , то программа выдаст картину, изображённую на рис. 5.

Из рисунка видно, что при снижении начальной температуры максимальный термический КПД цикла получается при меньшем значении начального давления, равном примерно 24 МПа. Максимально достижимый термический КПД цикла при этом снижается на 2,5%.

Данное явление влияния начальных параметров цикла на КПД описано в литературе по термодинамике, например в [9].

Подобным образом с помощью программы на языке Python с подключением описанных выше модулей-библиотек можно рассчитать и построить любые другие характеристики цикла Ренкина.

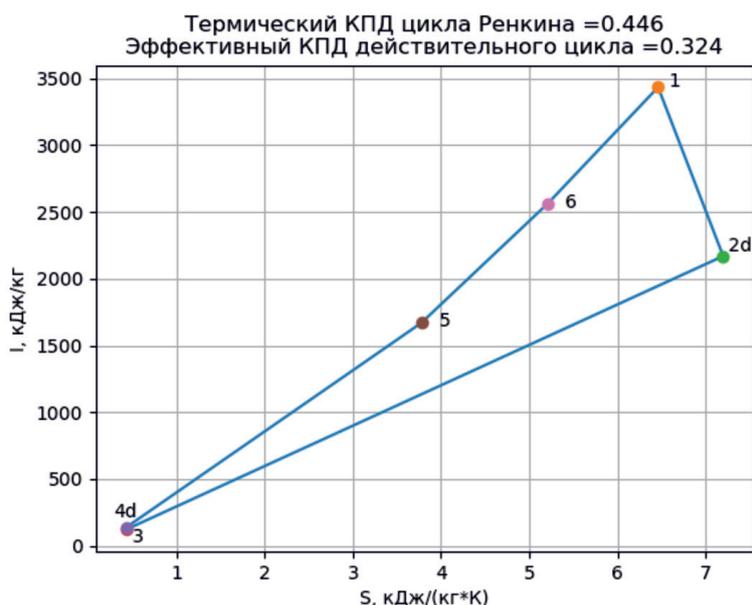


Рис. 3. Точки цикла Ренкина и КПД, полученные в программе

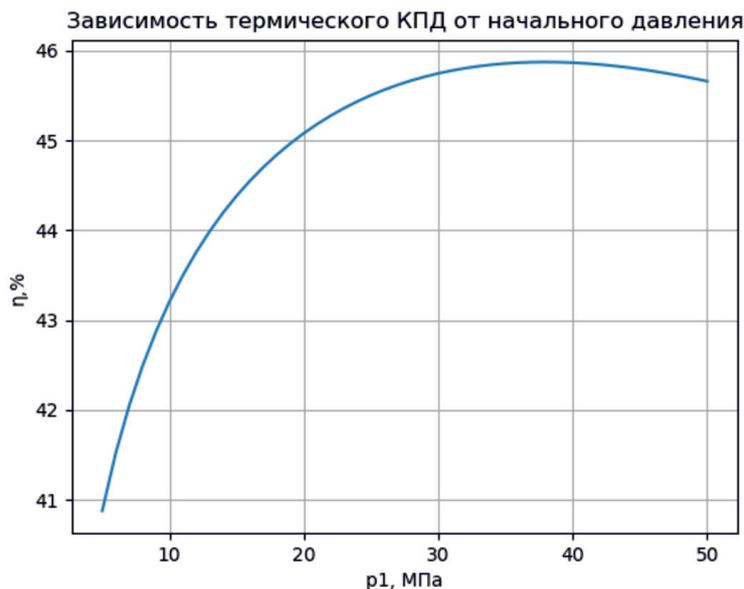


Рис. 4. Зависимость термического КПД цикла от давления пара перед турбиной при начальной температуре 550 °С

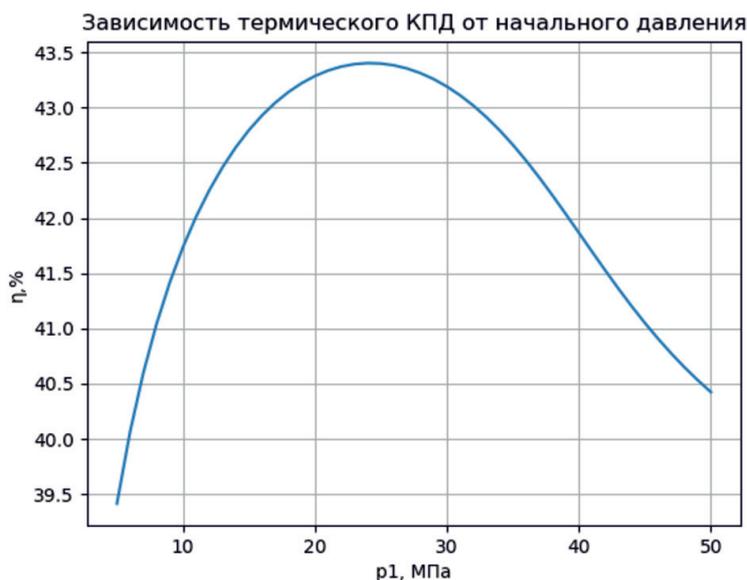


Рис. 5. Зависимость термического КПД цикла от давления пара перед турбиной при начальной температуре 450 °С

Процесс написания и использования компьютерного приложения доказал удобство применения языка Python для реализации алгоритмов научных расчётов. Расчёт точек и характеристик цикла Ренкина, выполненный с помощью программы в сравнении с примером, описанным в статье [5], показал полное соответствие полученных результатов.

Следует отметить уникальную возможность использования модуля CoolProp при

нахождении физических и термодинамических свойств веществ, и, пожалуй, нет больше ни одного свободно распространяемого программного обеспечения, реализующего в полной мере эту возможность.

Основное предназначение разработанной программы видится в оптимизации цикла паротурбинной установки с целью получения наибольшей её эффективности при дальнейшей детальной разработке.

### Заключение

Таким образом, в рамках описанной работы с использованием приведённого в литературе алгоритма расчёта цикла Ренкина разработана программа на языке Python с использованием дополнительных программных модулей, позволяющая решить следующие задачи:

– построить цикл существующей паротурбинной установки с указанием точек начала и окончания протекания всех термодинамических процессов;

– подобрать характеристики разрабатываемого цикла Ренкина с целью получения наивысшей экономичности паросиловой установки;

– использовать программу для наглядной демонстрации взаимного влияния исходных факторов и результирующих характеристик цикла.

С использованием разработанной программы можно производить как проверку характеристик уже используемой установки при каком-либо изменении исходных параметров, так и проектировать новые паротурбинные установки, работающие по циклу Ренкина. Такая автоматизация процесса проектирования приведёт к повышению надёжности и эффективности работы ПТУ [10]. Также данную программу можно рекомендовать использовать для обучения студентов, персонала тепловых станций основам протекания термодинамических процессов и как иллюстрацию применения

языка Python в создании научно ориентированных приложений.

### Список литературы

1. Полина И.Н., Ефимова С.Г. Техническая термодинамика: учебное пособие для студентов направления бакалавриата «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения. Сыктывкар: СЛИ, 2014. 186 с.

2. Семенов Ю.П. Теплотехника: учебник. 2-е изд. М.: ИНФРА-М, 2019. 400 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1014755> (дата обращения: 29.04.2020).

3. Кочетков А.В., Федотов П.В. Фазовая диаграмма воды // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN416.pdf> (дата обращения: 29.04.2020).

4. Константинов Г.Г., Ахмедов С.Б. Автоматизация проектирования турбогенераторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6 (149). С. 1126–1135.

5. Смирнов Ю.А. Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь: Метод. указания. СПб.: Гос. техн. ун-т, 1999. 18 с.

6. Coolprop. IF97 Steam/Water Properties. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.coolprop.org/fluid\\_properties/IF97.html](http://www.coolprop.org/fluid_properties/IF97.html) (дата обращения: 29.04.2020).

7. Хайбрахманов С.А. Основы научных расчётов на языке программирования Python: учебное пособие. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2019. 96 с.

8. Сысоева М.В., Сысоев И.В. Программирование для «нормальных» с нуля на языке Python. Учебник. В 2 ч. Ч. 1. М.: ООО «МАКС Пресс», 2018. 176 с.

9. Ромашова О.Ю. Методы оптимизации и расчеты на ЭВМ технико-экономических задач: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 210 с.

10. Константинов Г.Г., Ахмедов С.Б. Автоматизация проектирования турбогенераторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6 (149). С. 1126–1135.