



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ: ПАКЕТ SMATH И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Очков¹ В.Ф., Ахметова² И.Г.

¹Научно-исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

OchkovVF@mpei.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ настоящей работы заключается в создании сертифицированного программного комплекса (СПК), который ориентирован на решение задач, представляющих интерес для теплоэнергетики. Одна из задач, выбранных авторами, посвящена повышению эффективности известного газотурбинного цикла за счет модернизации теплосиловой схемы, которая относится к газотурбинной установке (ГТУ). Отметим, что для ТЭЦ и установок ГТУ проблема повышения/улучшения энергетических критериев (Z_1 -электрический КПД, Z_2 -термический КПД и др.) является приоритетной. В статье детально рассмотрен ряд объектов, среди них имеются: а) отечественный математический пакет (МП) SMath, б) пакет функций (ПФ) WaterSteamPro, в) сайты, г) компьютерная среда (КС) Linux. При создании СПК авторы решали вопросы, которые являются актуальными, во-первых, для генерирующих производств, включая ТЭЦ и парогазовые установки (ПГУ); во-вторых, авторы рассмотрели проблемы, которые играют важную роль при модернизации установки ГТУ, которая содержит котел-утилизатор. ЦЕЛИ. Авторами рассматривается несколько целей. Первая связана с разработкой метода I, который должен обеспечивать оптимизацию критериев, характеризующих исследуемую энергоустановку ПГУ-1. Указанная методика опирается, в частности, на Информационные технологии (ИТ); в ней используется ряд открытых интерактивных (OS) алгоритмов. Эти алгоритмы позволяют исследователю вести теплоэнергетические (ТЭ) расчеты, нацеленные на определение энергетических критериев, $Z = (Z_1, Z_2, \dots)$. На основе методики I решается ЗАДАЧА (А), которая связана с поиском оптимальных параметров, $Y_{opt} = (Y_1, Y_2, \dots)$, характеризующих термодинамический цикл ПГУ-1, здесь Y_1 - температура на входе в компрессор, Y_2 - давление на входе в газовую турбину. Вторая цель связана с созданием «Многофакторной технологии формирования OS алгоритмов». Эта технология дает возможность исследователю, который выполняет ТЭ расчеты, привлечь такие инструменты, которые соответствуют мировому уровню ИТ (МП SMath, МП Linux, инструмент «Mathcad Calculation Server» и др.). В соответствии со второй целью решается ряд ЗАДАЧ; среди них задача, нацеленная на комплекс СПК, а также задача по созданию OS алгоритма для ТЭ расчетов, которые ориентированы на ПГУ и МП Linux. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описывается, во-первых, комплекс СПК. Во-вторых, выполнены ТЭ расчеты, в соответствии с поставленными задачами. Так, в задаче (А) анализируется ПГУ-1, содержащая ряд блоков (паровая турбина; часть, нацеленная на внутреннюю теплофикацию ПТУ, котел - утилизатор и др.). В итоге получены численные данные и графические иллюстрации, в том числе сделана оценка критерия $Z_2 = 48.68 \%$ для блока ПТУ при условиях Y_{opt} и выбрана теплосиловая схема для ПГУ-1. ВЫВОДЫ. В настоящее время по известным причинам отечественные исследователи переходят от зарубежных программных средств к отечественным разработкам. Анализ результатов, полученных в указанных ТЭ расчетах, позволяет заключить: МП SMath и комплекс СПК дали возможность исследователям успешно отказаться от программного обеспечения, которое опирается на МП Mathcad, МП Maple, МП Mathematica и МП MATLAB.

Ключевые слова: паротурбинные установки; парогазовые установки; теплофикация; парогенератор; математический пакет SMath.

Для цитирования: Очков В. Ф., Ахметова И.Г. Современные информационные технологии

в теплоэнергетических расчетах: пакет Smath и оптимизация термодинамических циклов энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 195-213. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-195-213.

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THERMAL POWER CALCULATIONS: SMATH PACKAGE AND OPTIMIZATION OF THERMODYNAMIC CYCLES OF POWER PLANTS

Ochkov V.F., Akhmetova I.G.

¹Scientific Research University "MPEI", Moscow, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

OchkovVF@mpei.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The relevance of this work lies in the creation of a certified software package (SEC), which is focused on solving problems of interest to the thermal power industry. One of the tasks chosen by the authors is devoted to improving the efficiency of the well-known gas turbine cycle by modernizing the thermal power circuit, which refers to a gas turbine plant (GTP). It should be noted that for CHP and GTP, the problem of increasing/improving energy criteria (Z1 - electrical efficiency, Z2-thermal efficiency, etc.) is a priority. The article considers in detail a number of objects, among them there are: a) the domestic mathematical package (MP) SMath, b) the package of functions (PF) WaterSteamPro, c) websites, d) the computer environment (CS) Linux. When creating the SEC, the authors solved issues those are relevant, firstly, for generating plants, including thermal power plants and combined cycle gas plants (CCGP); secondly, the authors considered the problems that play an important role in the modernization of the GTP, which includes a recovery boiler. *Purposes.* The authors consider several goals. The first is related to the development of method I, which should ensure the optimization of criteria characterizing the PGU-1 power plant under study. This technique is based, in particular, on Information Technology (IT); it uses a number of open interactive (OS) algorithms. These algorithms allow the researcher to conduct thermal energy (TE) calculations aimed at determining energy criteria, $Z = (Z1, Z2, \dots)$. Based on method I, the PROBLEM (A) is solved, which is related to the search for optimal parameters, $Y_{opt} = (Y1, Y2, \dots)$, characterizing the thermodynamic cycle of PGU-1, here Y1 is the temperature at the inlet to the compressor, Y2 is the pressure at the inlet to the gas turbine. The second goal is related to the creation of a "Multifactor technology for the formation of OS algorithms." This technology makes it possible for a researcher who performs TE calculations to attract such tools that correspond to the world level of IT (SMath MP, Linux MP, Mathcad Calculation Server tool, etc.). In accordance with the second goal, a number of TASKS are being solved; among them is a task aimed at the SEC complex, as well as the task of creating an OS algorithm for TE calculations that are focused on PSU and MP Linux. *Results.* The article describes, firstly, the SEC complex. Secondly, the TE calculations were performed in accordance with the tasks set. So, in task (A), the PGU-1 is analyzed, which contains a number of blocks (a steam turbine; a part aimed at the internal heating of a vocational school, a heat recovery boiler, etc.). As a result, numerical data and graphical illustrations were obtained, including an assessment of the criterion $Z2 = 48.68\%$ for the vocational training unit under Y_{opt} conditions and a thermal power scheme for PGU-1 was selected. *Conclusions.* Currently, for well-known reasons, domestic researchers are switching from foreign software to domestic developments. An analysis of the results obtained in these TE calculations allows us to conclude: SMath MP and the SEC complex have enabled researchers to successfully abandon software that relies on Mathcad MP, Maple MP, Mathematica MP and MATLAB MP.

Keywords: steam turbine plants; combined cycle gas plants; heating; steam generator; mathematical package SMath.

For citation: Ochkov V. F., Akhmetova I.G. Modern information technologies in thermal power calculations: Smath package and optimization of thermodynamic cycles of power plants. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (6): 195-213. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-195-213.

Введение (Introduction)

Рекомендации руководящих документов («Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», закон ФЗ - 261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» и др.), а также наш анализ ряда работ показывают: повышение энергоэффективности генерирующих производств является приоритетным направлением развития энергетики. В соответствии с этими документами проектируемые установки (ПТУ, ПГУ и др.) должны иметь, во-первых, высокие параметры энергоэффективности. Во-вторых, эти установки должны отвечать современным критериям надежности и условиям экологичности. В-третьих, показано, что необходимо осуществлять мероприятия по модернизации теплосиловых схем, которые действуют как базовые теплосиловые схемы (БТС); так, рекомендуется внедрять технологии, которые отвечают «отвечают договору о присоединении мощности». В соответствии с этим документом сделаны практические шаги и прогнозы:

а) в рамках перехода от ПТУ к установкам ПГУ, в которых используется газотурбинная технология, обеспечение (ПО), которое предназначено для выполнения ряда теплоэнергетических (ТЭ) расчетов; некоторые из этих расчетов нацелены на вычисление критериев $Z(R, Y)$, теплоэнергетику РФ введено около 30 ГВт новых мощностей к 2023 г.,

б) дополнительный ввод мощностей составит около 13 ГВт к 2025 г. и 44 ГВт к 2035 г. (указанные цифры относятся к блокам ГТУ, которые будут установлены на ТЭС).

Упомянутые мероприятия по модернизации БТС или когенерация дают существенный вклад в суммарную мощность теплоэлектростанций РФ. В литературе описан вариант действующей установки ПГУ [11], в которой применена газотурбинная технология и для которой получен электрический КПД $Z_1 \approx 60.0\%$, при этом мощность, $N_{ГТ}$, которая относится к блоку газовой турбины (ГТУ) (рис. 1), и мощность, $N_{ПТ}$, которая относится к блоку паровой турбины (ПТУ), достигли в сумме 220 МВт.

В качестве объектов нашего исследования выбираем теплосиловые схемы, которые можно использовать, во – первых, при модернизации действующих энергоустановок (ЭУ), и, во – вторых, при проектировании новых установок ЭУ (ПТУ, ГТУ и др.) с целью повышения энергетических критериев, $Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots)$, здесь Z_2 - внутренний КПД ЭУ, Z_3 – термический КПД ЭУ), а также для улучшения других критериев, включая экологические и экономические. Например, на рисунке 1 дается такой объект в виде блочной теплосиловой схемы для установки ПГУ-1.

В статье также рассматриваем другие объекты, в том числе:

1) отечественный математический пакет (МП) SMath [1] и пакет функций (ПФ) WaterSteamPro [2],

2) сайты и базы данных, которые размещены в Интернете и содержат актуальную информацию (данные о теплофизических свойствах воды и других рабочих телах, характеристики термодинамических циклов и др.) применительно к ГТУ и ПГУ [6], [10],

3) программное обеспечение (ПО), которое предназначено для выполнения ряда теплоэнергетических (ТЭ) расчетов; некоторые из этих расчетов нацелены на вычисление критериев $Z(R, Y)$, здесь $R = (v, h, s, \dots)$ - свойства, которые характеризуют рабочее тело в заданных точках исследуемого цикла ПГУ-1; $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$ - граничные условия, которые представляют собой типичные параметры, используемые в математических формулах (МФ). Указанные формулы МФ, описывают критерии Z . Например, Y_3 обозначает температуру T_2 (точка 4г, рис. 1), на входе в ГТ, а Y_2 представляет давление воздуха на входе в компрессор К (рис. 1),

4) открытый интерактивный (ОС) алгоритм [10] (рис. 2), который выступает как методическая основа для SMath - программы (рис. 2, позиция 7), используемой для вычисления критериев $Z(R, Y)$.

В данной работе формулируем несколько целей; первая связана с разработкой метода I, который рекомендуется для выбора теплосиловой схемы ПГУ-1. Этот метод состоит из нескольких этапов; среди них отметим: 1) разработку ОС алгоритма, ориентированного на вычисление критериев $Z(R, Y)$, 2) оптимизацию термодинамического цикла ПГУ-1.

Упомянутый ОС алгоритм (рис. 2) должен иметь ряд характеристик, в том числе:

1) он обеспечивает исследователю/пользователю выполнение ТЭ расчета применительно к ПГУ-1, включая вычисление критериев $Z(R, Y)$ при заданных условиях Y ,

2) он содержит некоторую часть, которая связана с МП SMath; так, к этой части относится SMath – код, который в рамках задачи (А) именуется как программа Code–CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7), здесь в имени кода:

а) CCGP – имя, указывающее на установку ПГУ-1 (combined cycle gas plant),

б) Z – критерии, которые относятся к циклу ПГУ-1 и вычисляются с помощью указанного кода;

в) Y - граничные условия, характеризующие указанный цикл.

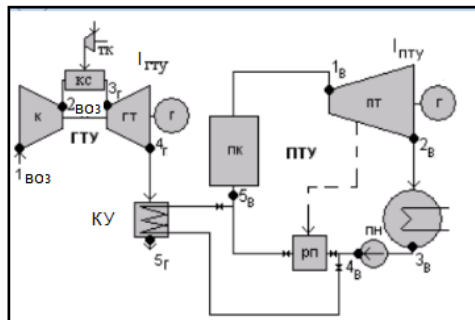


Рис. 1. Теплосиловая схема установки ПГУ-1: GTU - блок газовой турбины, PTU - блок паровой турбины, КУ - котел - утилизатор, ПК - энергетический котел, К - воздушный компрессор, ТК - топливный компрессор, КС - камера сгорания, ГТ - газовая турбина, Г - электрические генераторы

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

T_2 (точка 3_г) T_3 (точка 4_г, рис. 1) T_1 (точка 1_{воз}, рис. 1) и T_5 (точка 5_г, рис. 1) температуры T_6 (точка 5_в, рис. 1), температура T_{10} , температура T_9 (точка 4_в, рис. 1)

В статье ставится ряд задач; среди них рассматривается задача (А), которая связана с вычислением критериев $Z(R,Y)$ для ПГУ-1. При решении этой задачи намечено использовать ОС алгоритм и выполнить на его основе некоторые ТЭ расчеты, в том числе определить критерий $Z_1(R,Y_{opt})$, характеризующий цикл указанной установки, здесь Y_{opt} - оптимальные граничные условия для ПГУ-1.

Вторая цель нашей статьи связана с созданием «Многофакторной технологии формирования ОС алгоритмов». Указанная технология будет содержать несколько шагов. Среди них отметим шаги, на которых исследователь:

- 1) создает SMath - код; например, делает программу Code- CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7), которая применяется в задаче (А);
- 2) преобразует SMath - код в соответствующий ОС ресурс (рис. 2, позиция 5),
- 3) размещает это ПО на сервере BS (рис. 2, позиция 12), при этом используются: МП SMath, «Mathcad Calculation Server», а также некоторые инструменты информационной технологии (IT) (рис. 2).

Применительно к задаче (А) указанный ОС ресурс именуется как Res- OS- CCGP(Z,R,Y , (<http://klm>), key(def)), здесь в имени ресурса (<http://klm>) - URL адрес ОС ресурса, key(def) - ключ/пароль ОС ресурса (см. ниже).

Литературный обзор (Literature Review)

Высокая эффективность установок ПГУ, в которых используется газотурбинная технология, а также интерес теплоэнергетиков к обеспечению ПО, которое предназначено для выполнения ТЭ расчетов, связанных с вычислением критериев $Z(R,Y)$ для указанных установок, нашло отражение в ряде научных работ и публикаций.

В статьях (Е. Е. Ustjuzhanin и др. [17], Андриященко А.И. [18], В.А. Волощук [19], Е.В. Барочкин и др. [20], Александров А.А. и др. [11], Очков В.Ф. и др. [12]) приводятся актуальные результаты, в том числе:

- а) по анализу схемных решений, которые можно использовать для модернизации установок ПГУ,
- б) по формулам, которые следует использовать для оценки критериев $Z(R,Y)$ для ПГУ,

В статьях (Wagner, W. и др. [7], IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 [8], Очков В.Ф. и др. [2]) приводятся:

- а) современные табулированные термодинамические свойства воды и водяного пара в широком интервале давлений и температур,
- б) формулы для вычисления указанных свойств.

В статьях (В.Ф. Очков и др. [1], Очков В. Ф. и др. [9], В. Ф. Очков и др. [10], Александров А.А. [11], Очков В.Ф. и др. [12],) приводятся:

- а) некоторые методические решения, которые основываются на технологии IT и

МП SMath и которые можно использовать при разработке некоторого обеспечения ПО; последнее предназначено для ТЭ расчетов, выполняемых пользователями с помощью OS алгоритмов,

б) рекомендации для исследователей, которые адаптируют OS алгоритмы к удаленному серверу.

В статьях (<https://www.nist.gov/srd/refprop> [6], NIST Chemistry WebBook [13], В. Ю. Зицерман и др. [14], Jorrit Wronski и др. [15], Chirico R.D. и др. [16], <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/Aung/> [21]) приводятся описания баз данных и адреса сайтов, которые размещены в Интернете и содержат актуальную информацию (данные о теплофизических свойствах воды и других рабочих тел).

Материалы и методы (Materials and methods)

1 Формирование OS алгоритма

В данном разделе рассмотрим некоторые характеристики OS алгоритма, а также опишем некоторый подход, позволяющий создавать OS алгоритмы. На рис. 2 приведены источники информации, функциональные связи и инструменты, используемые для создания OS алгоритма, упомянутого во введении. Структура OS алгоритма содержит несколько компонентов (рис. 2), в том числе:

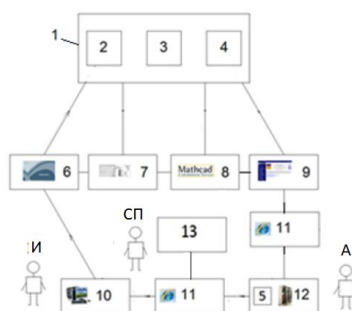


Рис. 2. Источники информации и инструменты, используемые для создания OS алгоритма, ориентированного на установку ПГУ-1: 1 – открытый интерактивный алгоритм; 2 – часть, связанная с Smath - формулами, или Smath - поле; 3 – текстовая часть или текстовое поле; 4 – часть, связанная с IT; 5 – ресурс Res – OS – CCGP(Z, R, Y, (<http://klm>),key(def)); 6 – Smath - инструменты; 7 – Smath - программа в виде Code – CCGP(Z, R, Y); 8 – технология «Mathcad Calculation Server»; 9 – пакет «Microsoft Expression Web 3», а также другие IT - инструменты; 10 – PC исследователя; 11 – Интернет; 12 – сервер BS и веб - сайт [2]; 13 – сторонний сервер, А - администратор сервера BS, СП -сторонний пользователь, И -исследователь

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 2. Information sources and tools used to create an OS algorithm focused on the installation of PGU-1: 1 – an open interactive algorithm; 2 is the part related to Smath formulas, or the Smath field; 3 – text part or text field; 4 – the IT-related part; 5 – the Res – OS – CCGP resource(Z, R, Y, (<http://klm>),key(def)); 6 – Smath tools; 7 – Smath program in the form of Code – CCGP(Z, R, Y), 8 – technology Mathcad Calculation Server; 9 – Microsoft Expression Web 3 package, as well as other IT tools; 10 – Researcher's PC; 11 – Internet; 12 – BS server and website [2]; 13 – third-party server, А – BS server administrator, СП –third-party user, И – researcher

1) часть, в которую включены формулы MF, записанные с помощью МП SMath; эта часть именуется как SMath - поле;

2) текстовую часть или текстовое поле;

3) часть, связанную с IT.

Формируя указанный алгоритм, исследователь (И) (рис. 2) должен выполнить ряд этапов, в том числе:

а) написать Smath - программу (рис. 2, позиция 7); последняя содержит формулы MF, необходимые для ТЭ расчета, включая, например, зависимости для вычисления критерия $Z_1(R, Y)$;

б) разместить Smath - программу на сервере BS (рис. 2, позиция 12) в виде OS ресурса (рис. 2, позиция 5).

OS алгоритм должен приобрести следующие характеристики.

1. С помощью OS алгоритма исследователь (И) может выполнить заданный ТЭ расчет на компьютере PC (рис. 2, позиция 10) с помощью Smath - программы.

2. Исследователь (И) имеет возможности:

а) обратиться к серверу BS по Интернету (рис. 2, позиция 11) и вызвать OS ресурс (рис. 2, позиция 5);

б) запустить программу Smath - программу и выполнить соответствующий ТЭ расчет на сервере BS;

в) передать по Интернету результат упомянутого ТЭ расчета от сервера BS на PC (рис. 2, позиция 10).

3. OS алгоритм позволяет подключить стороннего пользователя (СП) (рис. 2), работающего на компьютере PC (рис. 2, позиция 13), к серверу BS. В этом случае пользователь (СП) имеет возможность:

а) вызывать OS ресурс (рис. 2, позиция 11) с помощью Интернета (рис. 2, позиция 11),

б) знакомиться с формулами MF, входящими в Smath - программу, а также копировать указанные формулы.

Указанные опции («показ» формул MF, «копирование» формул MF, «копирование кода»), которые предоставляет OS алгоритм, объясняют используемый в статье термин «открытый интерактивный алгоритм/ресурс».

Рассмотрим этапы «Многофакторной технологии создания OS алгоритма», упомянутой во введении. Эта технология состоит из нескольких шагов; среди них следующие шаги были упомянуты выше:

1) написание Smath - программы (рис. 2, позиция 7);

2) размещение этого кода на сервере в виде OS ресурса (рис. 2, позиция 5).

Поясним этап (2) на примере программы Code- CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7). После создания этой Smath - программы исследователь (И) (рис. 2) привлекает дополнительные факторы (IT инструменты и др.) и выполняет следующие шаги:

а) редактирует Code- CCGP(Z, R, Y) с помощью IT инструментов (рис. 2, позиции 8 и 9), представляющие собой «Mathcad Calculation Server» и «WebControl» [1],

б) группирует формулы MF и выделяет в этом коде «область промежуточных результатов» и «область условного доступа»,

в) по электронной почте отправляет администратору (А) (рис. 2), который работает с сервером BS (рис. 2, позиция 12), модифицированную программу Code- CCGP(Z, R, Y).

Администратор (А) использует IT инструменты (рис. 2, позиции 8 и 9) и выполняет следующие действия:

1) выбирает URL- адрес (<http://klm>) и ключ (`key(def)`),

2) размещает указанную модифицированную программу на сервере BS и получает в итоге ресурс Res- OS-CCGP(Z,R,Y, (<http://klm>), `key(def)`) (рис. 2, позиция 5).

В литературе описано несколько форм OS алгоритмов; так, в [10] рассматривается OS алгоритм в виде «пользовательской функции» (см. ниже). Авторы данной статьи используют «Многофакторную технологию создания OS алгоритма» при разработке комплекса СПК.

2 Цикл ПГУ: способы модернизации и формулы для оценки критериев Z

Этот раздел посвящён вопросам, которые необходимо решать при разработке метода I, упомянутого во введении. Часть этих вопросов связана с построением цикла ПГУ и выбором формул MF, которые необходимо включить в Code- CCGP(Z, R, Y).

В метод I включаем нескольких этапов; среди них отметим:

1) разработку программы Code- CCGP(Z, R, Y) (см. раздел 1),

2) оптимизационные ТЭ расчеты применительно к циклу ПГУ-1.

С термодинамической точки зрения преимущество модернизированного цикла ПГУ перед циклом базовой ГТУ обусловлено тем, что критерий $Z_{1баз}$, реализуемый в цикле базовой ГТУ, является существенно меньшим, чем критерий Z_1 , относящийся к циклу ПГУ. Более высокая эффективность модернизированного цикла объясняется более высокой температурой $Y_3=T_2$ (точка 3г, рис. 1) подвода теплоты (q_1) в камере сгорания КС (рис. 1) по сравнению с температурой, при которой подводится теплота к рабочему телу в традиционной ПТУ [18]. Наряду с этим цикл базовой ГТУ имеет весьма высокую температуру T_3 (точка 4г, рис. 1), при которой отводится теплота из цикла ГТУ. Эта характеристика ГТУ рассматривается как негативная.

В литературе описано несколько методических приемов, посвященных модернизации ГТУ; среди них отметим следующие.

1. В [11] говорится о приеме (А), который включает конструктивное объединение установки ГТУ и блока ПТУ для реализации совместной технологии получения электроэнергии (рис. 1). Так, установки ПГУ с котлом - утилизатором (КУ), которые отвечают данному способу, рекомендуются как весьма перспективные и в других работах

[19], [20]; здесь приводятся численные данные о том, что указанное объединение позволяет существенно улучшить эффективность базовой установки ГТУ, то есть добиться для цикла ПГУ условия $Z_1 \gg Z_{1\text{баз}}$. В рамках способа (А) исследователь добивается уменьшения температуры T_3 (точка 4г, рис. 1).

Рассматривая теплосиловую схему (рис. 1), введем некоторые формулы, которые намечены для использования в программе Code-CCGP(Z, R, Y).

Блок ГТУ выполняет ряд функций, в том числе: генерирует теплоту q_1 и совершает удельную внутреннюю работу (l_i). Цикл ГТУ связан с рядом граничных условий, Y, в том числе Y температур, в том числе температура воздуха на входе в ГТУ T_1 (точка 1_{воз}, рис. 1) и температура воздуха на выходе из КУ T_5 (точка 5г, рис. 1). Используя характеристики (q_1 , l_i), записываем внутренний КПД, $Z_2^* = \eta_i$, для блока ГТУ в виде:

$$\eta_i = l_i / q_1. \quad (1)$$

Определяем работу l_i в форме [17], [12]:

$$l_i = l_{t_gt} \cdot \eta_{oi_gt} - \frac{l_{t_comp}}{\eta_{oi_comp}}, \quad (2)$$

где l_{t_gt} - удельная работа, которая относится к изоэнтропийному расширению газа в турбине ГТ (рис. 1), η_{oi_gt} - относительный внутренний КПД турбины ГТ (рис. 1); l_{t_comp} - удельная работа изоэнтропийного сжатия воздуха в компрессоре К (рис. 1); η_{os_comp} - КПД компрессора (К).

Вводим отношение ψ и рассматриваем уравнение:

$$q_1 = q_{t_1} \cdot \psi, \quad (3)$$

где функция q_{t_1} - теплота, подведенная извне в идеальном обратимом цикле, который реализуется в блоке ГТУ.

Используя указанные характеристики, записываем (1) в форме:

$$\eta_i = \frac{l_{t_gt} \cdot \eta_{oi_gt} - \frac{l_{t_comp}}{\eta_{oi_comp}}}{q_{t_1} \cdot \psi}. \quad (4)$$

Вводим термический КПД, $Z_3^* = \eta_t$, для блока ГТУ в виде [17], [12]:

$$\eta_t = (l_{t_gt} - l_{t_comp}) / q_{t_1}. \quad (5)$$

Используя указанные характеристики, записываем (4) в форме:

$$\eta_i = \frac{\eta_{oi_gt}}{\psi} \left[\eta_t - \varphi_{comp} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{oi_gt} \cdot \eta_{oi_comp}} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

где $\varphi_{comp} = l_{t_comp} / q_{t_1}$ - относительная работа сжатия компрессора (К).

Блок КУ выполняет некоторые функции, в том числе:

а) передает воде (рис. 1) утилизированную сбросовую теплоту, q_1' , от дымовых газов, при этом температура воды, находящейся в КУ, растет от температуры T_9 , относящейся ко входу КУ (точка 4в, рис. 1) до температуры T_{10} , при которой происходит фазовый переход вода-пар и отвечает неравенствам $T_9 < T_{10} < T_6$,

б) передает пару теплоту, q_1' , от дымовых газов, при этом температура пара, находящегося в КУ, растет от температуры T_{10} до температуры T_6 (точка 5в, рис. 1),

в) отводит теплоту, q_2' , с дымовыми газами (рис. 2).

Включаем эти характеристики в следующий энергетический баланс [17], [12]:

$$q_1'' = q_1 - l_{ГТУ} + q_1^{\text{ПК}} - q_2', \quad (7)$$

где $l_{ГТУ}$ - работа, полученная в генераторе (Г) (рис. 2), $q_1^{\text{ПК}}$ - теплота, которая передана воде в энергетическом котле ПК (рис. 1).

Теплота, $q_1^{\text{ПК}}$, генерируется в рассматриваемом цикле за счет сжигания дополнительного топлива в котле ПК (рис. 1), который конструктивно объединен с блоком КУ.

Определяем КПД, $\eta_{КУ}$, относящегося к блоку КУ, в виде [17], [12]:

$$\eta_{КУ} = q_1' / (q_1 - l_{ГТУ} + q_1^{\text{ПК}}). \quad (8)$$

Записываем термический КПД, $Z_3 = \eta_{ПГУ-1}$, относящийся к ПГУ - 1, в виде [17], [12]:

$$\eta_{ПГУ-1} = l_{ГТУ} / (q_1 - l_{ГТУ} + q_1^{\text{ПК}}). \quad (9)$$

Вводим характеристику, $\beta_{КУ}$, которая связана с блоком КУ и именуется как степень бинарности ПГУ - 1, в виде [17], [12]:

$$\beta_{КУ} = q_1' / (q_1 + q_1^{\text{ПК}}). \quad (10)$$

Блок ПТУ выполняет ряд функций, в том числе совершает удельную внутреннюю работу, $l_{ПТУ}$, которая относится к изоэнтропийному расширению пара в турбине ПТ (рис. 1).

Записываем термический КПД, $Z_3^{**} = \eta_{ПТУ}$, для блока ПТУ в форме:

$$\eta_{\text{ПТУ}} = l_{\text{ПТУ}} / q_1'. \quad (11)$$

Представляем $\eta_{\text{ПГУ-1}}$, используя уравнения (9), (10), в виде:

$$\eta_{\text{ПГУ-1}} = \beta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \beta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ГТУ}}) \eta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ПТУ}}. \quad (12)$$

Отметим, что установки ПГУ, в которых степень бинарности отвечает условиям ($q_1^{\text{ПК}} = 0$, $\beta_{\text{КУ}} = 1$), именуются как утилизационные энергоустановки. В этом случае режим работы установки ПГУ-1 именуется как утилизационный режим (РУ).

Наряду с функциями (а), (б), (в) отметим еще одну функцию блока КУ:

г) исследователь подбирает значение расхода, $G_{\text{Г}}$, относящегося к дымовым газам в блоке ГТУ, и расход, $G_{\text{в.п.}}$, пара, циркулирующего в блоке ПТУ, с помощью уравнения теплового баланса.

Это уравнение представляем в форме [17], [12]:

$$c_{\text{г}} G_{\text{Г}} (T_4 - T_{11}) = G_{\text{в.п.}} (h_6 - h_{10}), \quad (13)$$

где $c_{\text{г}}$ – теплоемкость дымовых газов, h_6 , h_{10} – энтальпии воды при температурах (T_6 , T_{10}).

Используя (13), записываем расход $G_{\text{в.п.}}$ в виде:

$$G_{\text{в.п.}} = c_{\text{г}} G_{\text{Г}} (T_4 - T_{11}) / (h_6 - h_{10}). \quad (14)$$

Расходы ($G_{\text{в.п.}}$, $G_{\text{Г}}$) (14) применяем в некоторых ТЭ расчетах, в том числе при оценке электрических мощностей $N_{\text{ГТ}}$ и $N_{\text{ПТ}}$, которые относятся к соответствующим блокам ГТУ и ПТУ (рис. 1).

Используя обозначения для электрических КПД ($\eta_{\text{ГТУ}} = Z_1^*$, $\eta_{\text{ПТУ}} = Z_1^{**}$ для блоков ГТУ и ПТУ), а также формулу (12) и известные характеристики генераторов Г (рис. 1), представляем критерий Z_1 для ПГУ-1 в виде:

Используя обозначения для электрических КПД ($\eta_{\text{ГТУ}} = Z_1^*$, $\eta_{\text{ПТУ}} = Z_1^{**}$ для блоков ГТУ и ПТУ), а также формулу (12) и известные характеристики генераторов Г (рис. 1), представляем критерий Z_1 для ПГУ-1 в виде:

$$Z_1 = \beta_{\text{КУ}} Z_1^* + (1 - \beta_{\text{КУ}} Z_1^*) \eta_{\text{КУ}} Z_1^{**}. \quad (15)$$

С помощью формул (1) ... (15), а также и других необходимых зависимостей авторы формируют Smath - программу в виде Code – CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7). Характеристики этой программы представлены на сайте [21].

2. В [11] описан прием (Б), который нацелен на повышение критерия Z_1 за счет существенного увеличения критерия Z_1^* , относящегося к блоку ГТУ (рис. 1), и входящего в формулу (15). Указанный способ связан с одним или несколькими мероприятиями, среди них:

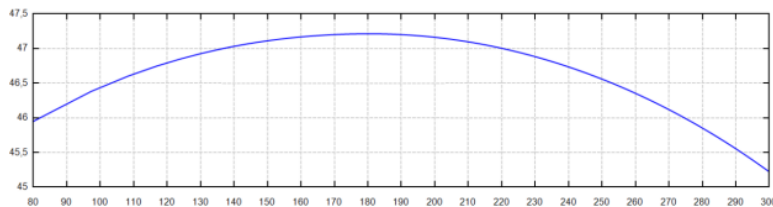


Рис. 3. Термический КПД, $Z_3^{**}(T_6)$ для блока ПТУ Fig. 3. Thermal efficiency, $Z_3^{**}(T_6)$ for the vocational training unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

- увеличение числа ступеней ГТ (рис. 1),
- увеличение степени повышения давления в компрессоре К (рис. 1),
- применение блоков промежуточного перегрева газа между ступенями ГТ,
- применение блоков промежуточного охлаждения циклового воздуха между ступенями компрессора К,
- повышение температуры T_2 на входе в ГТ (рис. 1, (точка $3_{\text{Г}}$)).

Если дополнить теплосиловую схему ПГУ-1 (рис. 1) блоками и узлами, которые должны обеспечить модернизацию этой установки с помощью шагов (а ... д), то упомянутый выше список условий $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$, следует существенно расширить. Приведенная информация говорит о том, что реализация приема (Б) приводит существенному усложнению критерия $Z_1(R, Y)$ для цикла ПГУ-1.

Завершая данный раздел, отметим следующее.

1. В метод I включаем дополнительно такие этапы, как:

- выбор базовой энергоустановки в виде ГТУ_{баз},
- создание Smath - программы в виде Code – GTP(Z, R, Y), ориентированной на ТЭ расчеты для установки ГТУ_{баз};

в) размещение соответствующего ресурса Res– OS–GTP(Z,R,Y, (<http://klm>), key(def)) на сервере BS,

г) размещение ресурса Res– OS–CCGP(Z,R,Y, (<http://klm>), key(def)) на сервере BS (см. раздел 1);

д) оптимизационные ТЭ расчеты применительно к циклу ГТУ_{баз}, которые выполняются на сервере BS,

е) оптимизационные ТЭ расчеты применительно к циклу ПГУ-1 и поиск оптимальных условий, Y_{opt} обеспечивающих равенство $Z_1(R, Y_{opt}) = Z_{1max}$; указанные ТЭ расчеты выполняются на сервере BS.

2. Анализируя результаты [11], а также формулы (12), (14), (15), делаем вывод о том, что граничные параметры, Y , существенно и неоднозначно влияют на критерии ($Z_1(R, Y)$, Z^*_{1k} , Z^{**}_{1k} , ...). Показано в [11], что для оптимизации цикла ПГУ-1 является нетривиальной задача, в которой требуется, во-первых, выбрать и построить некоторую целевую функцию, например, $Z_1(R, Y)$ для цикла ПГУ-1. Во-вторых, функция $Z_1(R, Y)$ является неаналитической, и ее можно получить в численном эксперименте в форме таблицы, которая будет содержать ($Z_1, Y_1, Y_2, \dots$) данные.

3. ($Z_1, Y_1, Y_2, \dots$) данные, которые можно получить на основе программы Code–CCGP(Z,R,Y), существенно зависят от различных режимов работы ПГУ-1. Так, в нашем исследовании рассматривается несколько вариантов ТЭ расчета:

1) ТЭ расчет, нацеленный на получение (Z_1, Y) данных, когда выполняется режим работы ПГУ-1, именуемый как базовый режим (РБ); в этом случае выполняются условия ($\beta_{KY}=1, Y_B=(Y_{1B}, Y_{2B} \dots)$);

2) ТЭ расчет, нацеленный на получение (Z_1, Y) данных для режима РУ;

3) ТЭ расчет, ориентированный на режим работы ПГУ-1, который именуется как режим ПТУ (РПТУ); в этом случае:

а) поддерживаются постоянными параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$, которые относятся к блоку ГТУ,

б) выполняются условия ($Z^*_1 = \text{const}, \eta_{KY} = \text{const}$),

в) пошагово уменьшается параметр β_{KY} от 1 до ($\beta_{KY}=1-\Delta\beta$), г) на каждом шаге применяет Code–CCGP(Z, R, Y) и вычисляются ($Z_1, Z^{**}_{1k}, Z^{**}_{3k}, Y$) данные, здесь $\Delta\beta$ – некоторый интервал.

4) ТЭ расчет, ориентированный на режим работы ПГУ-1, который именуется как режим ГТУ (РГТУ); в этом случае:

а) поддерживаются постоянными параметры $Y = (Y_2, Y_3 \dots)$, которые относятся к блоку ГТУ,

б) поддерживаются постоянными параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$, которые относятся к блоку ПТУ, выполняются условия ($Z^{**}_1 = \text{const}, \eta_{KY} = \text{const}, \beta_{KY}=1$),

в) пошагово уменьшается параметр Y_1 .

ТЭ расчет, ориентированный на режим РПТУ, дает возможность определить ($\beta_{KYk}, Z_{1k}, Z^{**}_{1k}, Z^{**}_{3k}, Y_k, k=1 \dots N$) данные в указанном численном эксперименте, включающем N шагов. Указанная численная информация позволяет исследователю построить ряд графиков, в том числе график функции $Z^{**}_3(Y=T_6)$ для блока ПТУ (рис. 3). На этом рисунке видны результаты ТЭ расчета, в том числе:

а) интервал, ΔT_6 , в котором варьируется условие $Y=T_6$,

б) диапазон ΔZ^{**}_3 , в котором варьируется критерий Z^{**}_3 и в котором находится оптимальное решение $Z^{**}_3(Y_{opt}) = Z^{**}_{3max}$.

3 Некоторые методы оптимизации цикла для установки ПГУ

Наш анализ литературных источников позволил сделать некоторую классификацию методов, которые связаны с расчетом критериев $Z(R, Y_{opt})$ для цикла, реализуемого в установке ПГУ-1. В разделе 2 упоминается метод I, в котором вычисляются критерии $Z(R, Y)$ применительно к ПГУ-1. Наряду с этим методом прокомментируем следующие подходы, в которых исследователь использует Интернет; в нашем анализе используем рис. 2.

1. В методе II исследователь реализует ряд шагов, в том числе:

а) исследователь создает программу Code–CCGP(Z, R, Y) (позиция 7)

б) по Интернету (позиция 11) исследователь подключается к некоторому сайту (позиция 12), выбирает свойства R , которые требуются как исходные данные (ИД) для указанного кода, и копирует свойства, R ;

в) исследователь вводит условия Y и свойства R в программу Code–CCGP(Z, R, Y), а также вычисляет критерии, Z , с помощью Code–CCGP(Z, R, Y) на компьютере PC (позиция 10).

Свойства R , находящиеся на сайте (позиция 12) имеют форму таблиц (текстовый файл или TS ресурс). Источниками табулированных данных служат известные веб - сайты организаций (НИУ «МЭИ» [2], НИСТ [6], ОИВТ РАН [14] и др.).

Отметим, что метод II включает, во – первых, шаг, на котором исследователь заходит на сайт, где размещен TS ресурс. Как правило, TS ресурс представляет собой таблицу, например, (h, P, T) данные для воды в формате txt. Термин «текстовый» показывает, что рассматриваемый TS ресурс не использует компьютерную программу или *exe – file*, по которым можно осуществить вычисление свойств R на сайте (позиция 12). Во - вторых, метод II содержит обязательный шаг (в), который связан с привлечением PC (позиция 10) для вычисления критериев Z .

2. В методе III исследователь привлекает ПО и инструменты, которые сходны с таковыми, применяемыми в методе II; однако в методе III наряду с шагом (а) исследователь делает следующие шаги:

б) используя компьютер PC (позиция 10) и Интернет (позиция 11), исследователь обращается к одному из веб – сайтов (позиция 12), где размещены программы типа «*exe – file*», именуемые как ES ресурс или закрытый Интернет ресурс [2], [6], [14], [15], вычисляет необходимые свойства, R , с помощью выбранного ES ресурса и копирует полученные свойства, R ;

в) вводит значения (Y, R) в Code – CCGP(Z, R, Y),

г) вычисляет критерии, Z , на компьютере PC (позиция 10).

Отметим, что ES – ресурс, находящийся на стороннем сайте, не предоставляет пользователю опции («показ» формул MF, используемых в данном ES – ресурсе, «копирование» формул MF, «копирование кода», используемого в данном ES – ресурсе). Приведенная характеристика ES – ресурса объясняет термин «закрытый».

Результаты (Results)

1 Функции сертифицированного программного комплекса

«Многофакторная технология создания OS алгоритма» дает возможность авторам статьи разработать комплекс СПК, ориентированный на ведение ТЭ расчетов при решении широкого круга задач теплоэнергетики. Используя этот комплекс исследователь/пользователь привлекает пакет WaterSteamPro, интегрированный в МП SMath [1], [2], в свои ТЭ расчеты.

В настоящее время по известным причинам происходит постепенный переход от зарубежных программных средств к отечественным разработкам. Если говорить о компьютерных инструментах для ведения научно-технических, в частности, теплотехнических расчетов, то российские пользователи вольно или невольно вынуждены отказываться от программ типа Mathcad, Maple, Mathematica, MATLAB и переходить на программу SMath [1] – к отечественному свободно распространяемому программному продукту, у которого есть ряд несомненных преимуществ, перечисленных на сайте <https://community.ptc.com/t5/Mathcad/Mathcad-vs-SMath/td-p/802499>.

Авторы данной статьи провели большую и кропотливую работу по интеграции в программу SMath пакета функций, возвращающих теплофизические свойства рабочих тел и теплоносителей энергетики WaterSteamPro [2], который также свободно распространяется. Получился открытый программный комплекс (ОПК), который по мнению авторов будет очень полезен специалистам-теплоэнергетикам, студентам и преподавателям вузов по направлению теплотехника и теплоэнергетика, ядерная энергетика и теплофизика, энергетическое машиностроение и др.

Когда речь заходит о свободно распространяемых программах, то на ум приходят две поговорки: «*Бесплатный сыр бывает только в мышеловке*» («*You get what you pay for*») и «*Дареному коню в зубы не смотрят*» («*Never look a gift horse in the mouth*»). Как писал А.С. Пушкин «*Нравственные поговорки бывают удивительно полезны в тех случаях, когда мы от себя мало что можем выдумать себе в оправдание*». Но авторы все-таки попытались «выдумать» что-то «себе в оправдание»!

Описываемый комплекс условно бесплатный. За него не надо платить, а необходимо только провести несложную регистрацию у разработчиков (www.smath.com и www.wsp.ru) в том случае, когда комплекс используется не для коммерческих целей, а для образования или самообразования. Или просто для более тщательного знакомства. В противном случае необходимо будет войти с разработчиками в не очень обременительные финансовые отношения, описываемые еще одной поговоркой «*Курочка по зернышку клюет и сыта бывает*» («*Little by little makes a mickle*»). Эти «зернышки» помимо прочего позволили разработчикам провести тщательное тестирование и «узаконивание» программ: программа WaterSteamPro сертифицирована в Госстандарте России (<http://www.wsp.ru/ru/>

certification.asp), а программа SMath зарегистрирована в Российском реестре программного обеспечения (https://reestr.digital.gov.ru/reestr/536108/?sphrase_id=3670903).

Математическая программа SMath свободно скачивается с сайта www.smath.com и устанавливается на компьютерах, работающих не только под Windows, но, что очень важно в наше санкционное время, и под Linux. А Linux – это опять же свободно распространяемая операционная система. Пакет программ WaterSteamPro по расчету теплофизических свойств воды и водяного пара, а также газов (основные рабочие тела теплоэнергетики) является дополнением (плагином), который прикрепляется к установленной на компьютере пользователю программе SMath через цепочку команд меню Сервис / Дополнения / Галерея онлайн – см. рис. 4.

После подключения и последующего лицензирования пакета WaterSteamPro к программе SMath (см. <http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/SMath-WSP.pdf>) в среде этого научно-технического калькулятора станут доступны 353 функции (рис. 5), возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара (префикс wsp), а также (дымовых) газов и парогазовых установок. Без лицензирования пакета WaterSteamPro окно Имя функции, показанное на рис. 5, будет пустым.

После описанного подключения и лицензирования можно подсчитать, например, значение удельной энтальпии (теплосодержания) воды или водяного пара в зависимости от давления и температуры. Для этого необходимо и достаточно в среде SMath набрать на клавиатуре символы wspH (см. верхний левый угол на рис. 6). После этого выпадет список функций пакета WaterSteamPro, имя которых начинается с этих четырех букв. Эти функции имеют разные аргументы — разные параметры воды и водяного пара, зафиксированные в последующих буквах. Буква S в имени функции будет означать, что ведется расчет на линии насыщения. При этом имеется ввиду либо вода (W), либо водяной пар (S), либо их смесь (X).

Вся эта информация размещена на сайте www.wsp.ru. Числа 1, 2, 3 и 5, прописываемые за буквами wspH, означают, что имеется ввиду вода (1), водяной пар (2), околоскритическая область (3) или пар при высокой температуре (5) формуляции 1997 года Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара – см. ниже.

На рисунке 6 показаны последующие этапы работы с выбранной функцией wspHPT: ввод значений двух аргументов с единицами давления и температуры, корректировка единиц измерения у выданного значения удельной энтальпии и, наконец, корректировка формата численного ответа. Пакет SMath по умолчанию выдает упрощенные до предела единицы удельной энтальпии (Gr — грей — единица поглощенной дозы ионизирующего излучения – джоуль, деленный на килограмм) и четыре знака после запятой.

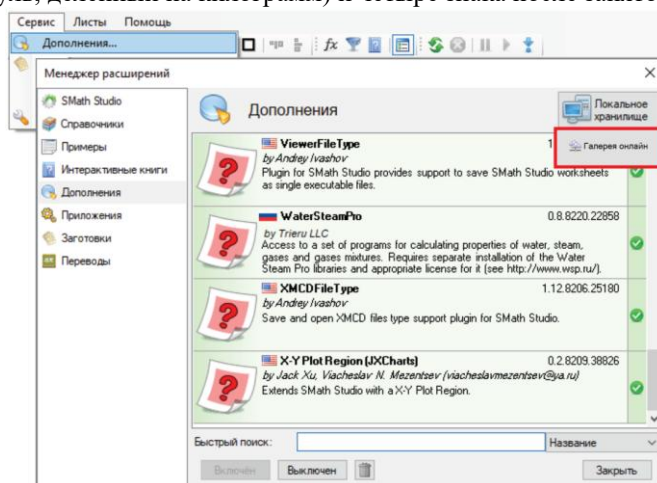


Рис. 4. Дополнение (плагин) WaterSteamPro, подключенное к среде SMath

Fig. 4. Add-on (plug-in) WaterSteamPro, connected to the SMath environment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Мы же отметили, что нужно выдавать четыре значащие цифры (галочка у позиции Режим значащих цифр) с единицей удельной энтальпии – килоджоуль на килограмм (джоуль на грамм).

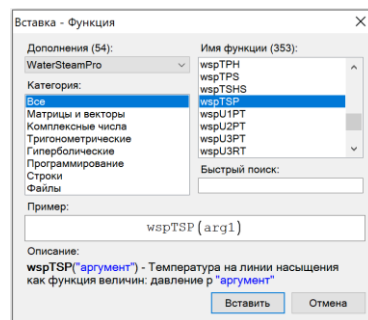


Рис. 5. Диалоговое окно

Fig. 5. The dialog box

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Отметим, что командами меню Сервис / Опции / Язык единиц измерения можно заменить русские имена единиц измерения на английские. Это и другая также полезная опция – замена запятой на точку в разделителе целой и дробной части в десятичных числах делает удобной подготовку расчетных документов для англоязычных и прочих изданий. При этом точку с запятой в списках аргументов функций следует заменить на запятую.

Особо подчеркнем, что пакет WaterSteamPro в среде SMath работает с единицами измерения [3, 4], что полностью соответствует современным стандартам компьютерных вычислений. С другой стороны, лицензируя пакет WaterSteamPro, пользователь получает возможность работать с ним и в других вычислителях – в табличном процессоре Excel, например, где нет поддержки единиц измерения.

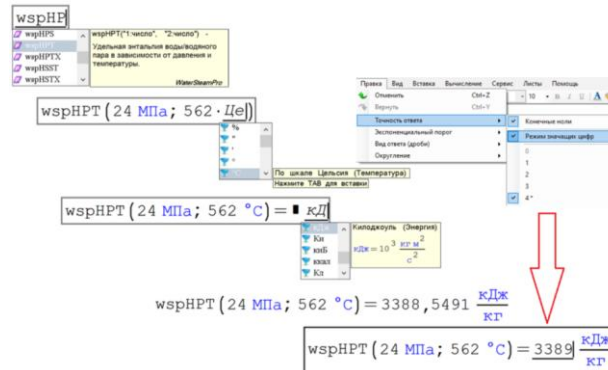


Рис. 6. Шаги ввода в расчет значения удельной энтальпии водяного пара

Fig. 6. Steps for calculating the specific enthalpy of water vapor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Мы не будем описывать все функции пакета WaterSteamPro – это все можно найти на вышеотмеченном сайте. Мы приведем конкретный несложный пример теплоэнергетического расчета в среде SMath с опорой на эти функции, который покажет читателю удобства такого комплекса.

На рисунке 7 приведен протокол расчета термического КПД паротурбинного цикла с двумя отборами пара на внутреннюю теплофикацию – на подогрев питательной воды в двух смешивающих регенеративных подогревателях. Вода на выходе из них (на входе в насосы) находится в состоянии насыщения. Описание расчета исчерпывающе дано в комментариях протокола. Сразу отметим, что реальный паротурбинный блок имеет до восьми отборов пара из турбины в регенеративные подогреватели. И не только смешивающего, но и поверхностного типа. Это, как надеются авторы, не умаляет ценность расчета, приведенного на рис. 7. Образовательную и не только ценность.

Комментарии к расчету, показанному на рисунке 7.

По традиции, принятой в технической термодинамике, переменная, хранящая значение температуры по относительной шкале Цельсия, должна быть прописана маленькой буквой t_0 , а не T_0 (абсолютная термодинамическая температура в кельвинах). Но пакет SMath делает эту традицию излишней. Дело в том, что в переменную допустимо вводить значение температуры по любой шкале (см. левый верхний угол на рис. 7), но в памяти компьютера она будет храниться в кельвинах – в основных единицах температуры СИ. Было бы логичней, если бы она хранилась в джоулях на моль, что отвечает теоретическому, а не эмпирическому подходу к понятию температуры [5]. Но в этом вопросе теплотехники и термодинамики пошли на некий компромисс и остановились на кельвинах, введя эту искусственную единицу температуры. Хотя физики часто измеряют

температуру электронвольтами (эВ) – единицами энергии. А с физиками не поспоришь: термодинамика является частью физики, а не наоборот. В нашем расчете температура пара, поступающего в турбину, равна примерно 70 миллиэлектронвольт (см. рис. 8). Комнатная же температура (примерно 17°C) – это опять же примерно одна сороковая электронвольта (0,025). Пакет SMath в ближайшем будущем позволит устранить эмпирику при работе с температурой, которую можно будет выражать и в электронвольтах, но в памяти компьютера будет храниться в джоулях, деленных на моль. При этом константа R_m перестанет быть универсальной газовой постоянной и перейдет в разряд переводного коэффициента значений температуры.

Давления задаются в атмосферах физических и в миллиметрах ртутного столба, которые более понятны для восприятия, чем мега- или килопаскали. Пакет SMath позволяет работать с любыми единицами измерения, а не только с теми, какие рекомендованы ГОСТами, но не вполне удобны в научно-техническом обиходе. Вернее так – вводить и выводить значения именованных величин (физических, экономических, информационных и др.) можно с любыми единицами, но в памяти компьютера они будут храниться в значениях, отвечающих базовым единицам СИ. В давлении, выраженном в атмосферах (физических или технических), ясно просматривается физический смысл – давление во столько-то раз выше атмосферного. Чего не скажешь о паскалях. Поучительный исторический пример. В прогнозах погоды у нас одно время пытались прописывать атмосферное давление в гектопаскалях, но вернулись к более понятным и привычным мм ртутного столба. Кстати, скорость ветра в метеоисводках тоже желательно выражать в километрах в час (kph), а не в метрах в секунду.

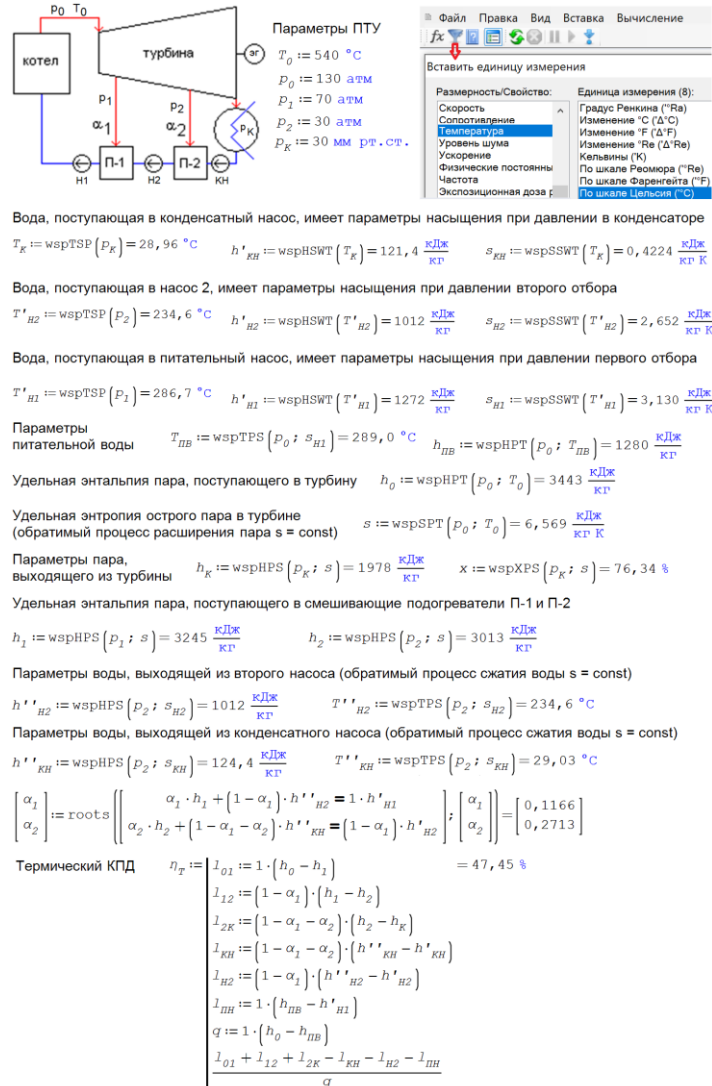


Рис. 7. Расчет термического КПД для модифицированного блока ПТУ, содержащего два регенеративных смешивающих подогревателя

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Что и делается в европейских странах, но не в России.

Пять kph – это скорость пешехода, 20 kph – велосипедиста, а 60 kph –автомобиля в городе. Есть с чем сравнивать скорость ветра выраженную в kph, чего не скажешь о метрах в секунду. Расчет значений долей отбора пара α_1 и α_2 в подогреватели можно вести по формулам, полученным в результате аналитического решения уравнений баланса тепловой энергии в процессе смешивания воды с водяным паром в подогревателях.

Но в расчете оставлены сами эти два уравнения, у которых численно ищется корень через встроенную в SMath функцию roots. Это также повышает «читабельность» расчета – в системе уравнений четко виден их физический смысл, чего не скажешь о выражениях, полученных в результате решения уравнений.

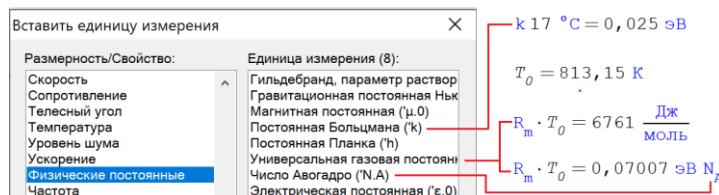


Рис. 8. Правильные единицы температуры

Fig. 8. Correct temperature units

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Возвращаясь к предыдущему комментарию, отметим, что и доли отбора пара, и КПД в памяти компьютера хранятся в абсолютных значениях. Но выводить их на печать можно в процентах. Или в промилле.

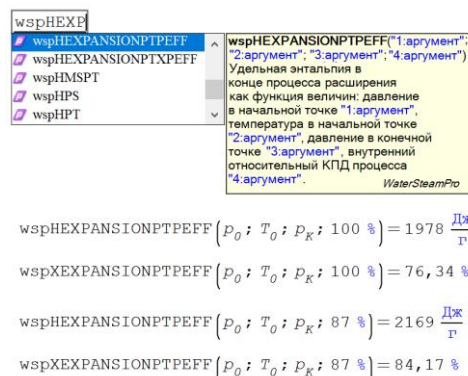


Рис. 9. Расчет процесса расширения пара в турбине

Fig. 9. Calculation of the steam expansion process in a turbine

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет термического КПД для блока ПТУ ведется через программный блок, начало и конец которого отмечен вертикальной чертой. В этом блоке отдельно расписаны удельные работы (переменные, начинающиеся с латинской буквы эль) турбины 1 (часть высокого давления), турбины 2 и турбины 3, а также представлены удельные работы трех насосов: конденсатного (КН), промежуточного (Н-2) и питательного (Н-1).

Расчеты, показанные на рис. 6 и 7, охватывают идеальные процессы расширения пара в турбине и сжатия воды в насосах – удельная энтропия в этих устройствах не меняется. Вследствие этого рассчитанная влажность пара, выходящего из турбины, оказалась недопустимо высокой – 23.7%. В пакете WaterSteamPro есть функции, возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара в зависимости не только от параметров рабочей среды, но и от неких технологических условий. На рисунке 9 показана работа двух таких функций, возвращающих удельную энтальпию и степень сухости водяного пара, расширяющегося в турбине с определенным внутренним относительным КПД. Расчеты, показанные на рисунках 6 и 7, несложно подправить так, чтобы были учтены реальные, а не идеальные условия.

И последний комментарий.

При расчете КПД паротурбинного блока на рисунке 7 использовалась дробь, числитель которой это сумма удельных работ трех частей паровой турбины за вычетом удельных работ насосов, а знаменатель – удельная теплота, подведенная к паровому котлу. Но КПД можно «повысить», если удельные работы перенести со сменой знака из числителя в знаменатель (рис. 10).

$$\eta_T := \frac{l_{01} + l_{12} + l_{2K}}{q + l_{KH} + l_{H2} + l_{HH}} = 47,70 \%$$

Рис. 10. Альтернативный подсчет термического КПД для блока ПТУ

Fig. 10. Alternative calculation of thermal efficiency for a vocational training unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Операторы, показанные на рисунке 4, несложно сгруппировать в функцию пользователя (рис. 11), что позволяет, к примеру, строить графические зависимости (рис. 12). Отдельные операторы в программе, показанной на рисунке 11, стали элементами матрицы с одной строкой и с двумя-тремя столбцами. Это сделано для того, чтобы созданная функция помещалась целиком на экране компьютера. Это облегчает ее отладку и возможное усложнение в будущем. Встроенная в SMath функция augment объединяет два отдельных вектора в матрицу с двумя столбцами – с дискретными значениями аргумента и функции. Деление этих значений на единицу атмосферы физические (atm) и проценты (%) позволяет на осях графика иметь нужные единицы измерения.

$$\eta_T(P_0; T_0; P_1; P_2; P_K) := \frac{l_{01} + l_{12} + l_{2K} - l_{KH} - l_{H2} - l_{HH}}{q}$$

$\eta_T(P_0; T_0; P_0; P_0; P_K) = 43,88 \%$ $\eta_T(P_0; T_0; P_K; P_K; P_K) = 43,88 \%$
 $\eta_T(P_0; T_0; 30 \text{ atm}; 30 \text{ atm}; P_K) = 46,82 \%$ $\eta_T(P_0; T_0; 70 \text{ atm}; 30 \text{ atm}; P_K) = 47,45 \%$

Рис. 11. Создание функции, рассчитывающей термический КПД для модифицированного блока ПТУ

Fig. 11. Creation of a function that calculates the thermal efficiency of thermal efficiency for a modified vocational school unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Построение не отдельных кривых, а поверхности с максимумом значения термического КПД, отображающей влияние давлений двух отборов на термический КПД паротурбинного цикла, приведено на форуме пользователей пакета SMath по адресу https://en.smath.com/forum/yaf_postsm82946_f-x-y---3D-plot-and-optimal-point.aspx. Для этого был задействован еще один плагин пакета SMath – программа Maxima (<https://maxima.sourceforge.io/tu/>) – свободно распространяемая система компьютерной алгебры, существенно расширяющая возможности пакета SMath. На этом форуме также решена задача по поиску оптимальных значений давлений отборов, при которых КПД будет максимальным. К пакету SMath можно также подключить и другие популярные математические программы: Mathcad и Maple. Но правомерность этого действия сомнительна, так как пакеты Mathcad и Maple являются коммерческими программными продуктами. С другой стороны, как отмечают многие исследователи и создатели расчетов, мы в настоящее время можем использовать данные пакеты в виде некоего трофея.

Справедливости ради следует отметить, что к расчетной программе SMath можно прикрепить еще одно «теплофизическое» дополнение (плагин) с функциями, возвращающими свойства рабочих тел и теплоносителей энергетики – пакет CoolProp (www.coolprop.org), представляющий собой свободно распространяемую версию коммерческого пакета RefProp [6].

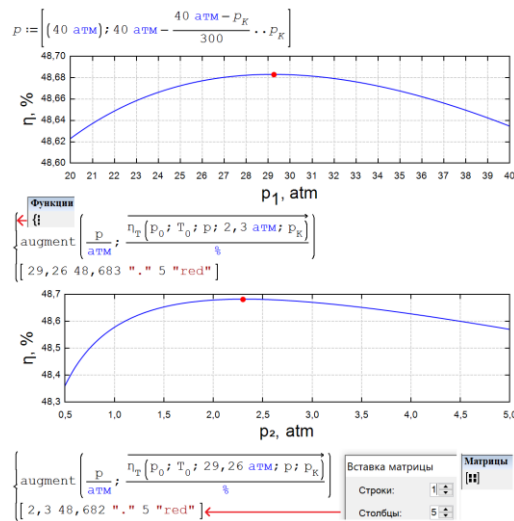


Рис. 12. Графики зависимости термического КПД блока ПТУ от давлений (p_1 , p_2) в отборе 1 и отборе 2

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 13 даны примеры вызова двух функций пакета CoolProp в среде SMath. В переменной wf (working fluid) записана строковая величина "IF97::H2O", означающая, что расчеты ведутся по формуляции Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) 1997 года [7] для промышленного использования.

$$wf := \text{"IF97::H2O"}$$

$$T_K := \text{CoolProp_Props}("T"; "P"; p_K; "Q"; 0,5; wf) = 28,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h'_{KH} := \text{CoolProp_Props}("H"; "T"; T_K; "Q"; 0; wf) = 121,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Рис. 13. Примеры вызова функций из пакета Cool Prop

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Если в переменную wf записать укороченную строку "H2O", то расчеты будут вестись по формуляции IAPWS 1995 года [8]. В России стандартом (ГОСТ) является формуляция IAPWS 1997 года, а не формуляция 1995 года. Такой же уровень имеет формуляция 1997 года и во многих других странах мира.

Тестирование показало, что программу CoolProp по формуляции 1997 года нельзя использовать в теплоэнергетических расчетах (рис. 14), где функция, показанная на рис. 8, отображается в виде параметрического графика на примере паротурбинной установки с одним отбором (давление p_1 равно давлению p_2). Не сертифицированный и не протестированный пакет CoolProp дает сбой. Чего не скажешь о пакете WaterSteamPro.

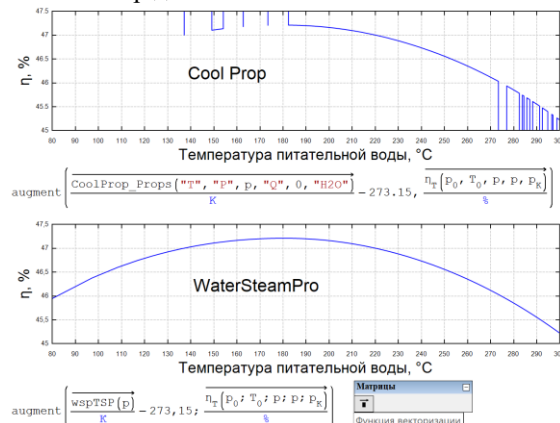


Рис. 14. Расчет зависимости термического КПД для блока ПТУ от температуры питательной воды. Использование двух пакетов, содержащих свойства воды

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Пакет CoolProp может работать не только с водой и водяным паром, но и с другими теплоносителями и рабочими телами промтеплоэнергетики – с хладагентами, например. Но это также требует тщательного тестирования и сертификации. Один из примеров такой проверки описан в главе 8 учебного пособия [9].

Заключение (Conclusions)

Авторам удалось в рамках импортозамещения создать сертифицированный свободно распространяемый программный комплекс для теплоэнергетических расчетов, позволяющий работать с теплофизическими величинами с численной и символьной (аналитической) математикой, строить графики, проводить оптимизацию и делать многое другое. Использование комплекса на порядок ускоряет расчеты, резко снижает риск ошибок в них и улучшает «читабельность» расчетов и их открытость для дальнейшего расширения и снятия ограничений.

Литература

1. Информационные технологии в инженерных расчетах: SMath и Python: учебное пособие для вузов // В.Ф. Очков, К.А. Орлов, Ю.В. Чудова [и др.]. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 212 с. (<http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/EC-SMath.pdf>)
2. Очков В.Ф., Орлов К.А., Александров А.А., Очков А.В. Свойства воды и водяного пара: сетевые, открытые, интерактивные IT-ресурсы // Теплоэнергетика. № 5. 2015 г. С. 71-80 (<http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/IAPWS-TE.pdf>)
3. Очков В.Ф. Физические и экономические величины в Mathcad и Maple (Серия «Диалог с компьютером»). М.: Финансы и статистика, 2002 (<http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/Fis-Eco-Units-Mathcad-Maple.pdf>)
4. Steve McKeever, Oscar Bennich-Björkman, Omar-Alfred Salah. Unit of measurement libraries, their popularity and suitability // Software: Practice and Experience. Volume 51, Issue 4, April 2021, Pages 711-734, <https://doi.org/10.1002/spe.2926>
5. Очков В.Ф., Орлов К.А. Когда $p = T$ // Законодательная и прикладная метрология. № 2. 2022. С. 38-44 (<http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>)
6. <https://www.nist.gov/srd/refprop> (Дата обращения 01.11.2024).
7. Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, J. Eng. Gas Turbines & Power 122, 150-182 (2000) (<http://iapws.org/relguide/IF97-Rev.html>)
8. IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (<http://iapws.org/relguide/IAPWS-95.html>)
9. Очков В. Ф., Тихонов А. И. Math CAD и Python: обучение по технологии STEM, Издательство Лань, 2023 (<https://lanbook.com/catalog/informatika/math-cad-i-python-obuchenie-po-tehnologii-stem>)
10. В. Ф. Очков, Е. Е. Устюжанин, Чжо Ко Ко, В.В. Шишаков. Теплофизические базы данных: от таблицы к интерактивным Интернет- ресурсам и «облачным» шаблонам. Теплофизика высоких температур. 2015. №4 С. 41– 46.
11. Александров А.А., Очков В.Ф., Устюжанин Е.Е. [и др.] Теплотехнические расчеты на компьютере // Учебное Пособие. Издательство МЭИ. -2019.-250 с.
12. Очков В.Ф., Александров А.А., Знаменский В.Е. [и др.] Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет: учеб. пособие /, Г. Ю. Кондакова, А. Лук, К. А. Орлов, А. В. Очков, А. А. Пантелеев, Чжо Ко Ко.— СПб.: БХВ-Петербург, 2014.—336с.: ил. ISBN 978-9775-3352-2
13. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. Linstrom P.J., Mallard W.G. National Institute of Standards and Technology// 2005. <http://webbook.nist.gov>
14. В. Ю. Зицерман, Г. А. Кобзев, Л. Р. Фокин и др. Информационный триптих теплофизических свойств веществ // 2007, <http://www.thermophysics.ru/triptych>
15. Jorrit Wronski a. o. CoolProp library. Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2014, <http://www.coolprop.org/index.html>
16. Chirico R.D., Frenkel M. a. o. Refprop - 8 data base, 2006, <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>
17. Е. Е. Устюжанин, В. Ф. Очков, В. Е. Знаменский. Development of Internet algorithms and some calculations of power plant COP. Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012348
18. Андриященко А.И. О термодинамической эффективности сложных циклов ГТУ в парогазовых установках // Теплоэнергетика. – 1998. – №3. – С. 68-71.
19. В.А. Волощук, В.Ф. Очков, К.А. Орлов. Термодинамическая оптимизация циклов некоторых ГТУ и ПГУ при помощи современных информационных технологий (Часть 2) // Новое в российской электроэнергетике, № 8, 2011. С. 15-25.

20. Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, А.Е. Барочкин. Схемы, оборудование и эксплуатация ТЭС и АЭС: Учеб. пособие / Под ред. Е.В. Барочкина / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014.–208С.

21. <http://twi.mpei.ac.ru/ТТНВ/Aung/> (Дата обращения 02.10.2024).

Авторы публикации

Очков Валерий Федорович – д-р. техн. наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, OchkovVF@mpei.ru

Ахметова Ирина Гареевна – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Экономика и организация производства Казанского государственного энергетического университета, <https://orcid.org/0000-0002-7082-2005>.

References

1. Information technologies in engineering calculations: SMath and Python: a textbook for universities // V.F. Ochkov, K.A. Orlov, Yu.V. Chudova [et al.]. – St. Petersburg: Lan, 2023. – 212 p. (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/EC-SMath.pdf>)
2. Points V.F., Orlov K.A., Alexandrov A.A., Ochkov A.V. Properties of water and water vapor: network, open, interactive IT resources // Heat power engineering. No. 5. 2015, pp. 71-80 (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/IAPWS-TE.pdf>)
3. Points V.F. Physical and economic quantities in Mathcad and Maple (Series "Dialogue with a computer"). Moscow: Finance and Statistics, 2002 (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/Fis-Eco-Units-Mathcad-Maple.pdf>)
4. Steve McKeever, Oscar Bennich-Björkman, Omar-Alfred Salah. Unit of measurement libraries, their popularity and suitability // Software: Practice and Experience. Volume 51, Issue 4, April 2021, Pages 711-734, <https://doi.org/10.1002/spe.2926>
5. Points V.F., Orlov K.A. When $p \cdot v = T$ // Legislative and applied metrology. No. 2. 2022. pp. 38-44 (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>)
6. <https://www.nist.gov/srd/refprop>
7. Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, J. Eng. Gas Turbines & Power 122, 150-182 (2000) (<http://iapws.org/relguide/IF97-Rev.html>)
8. IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (<http://iapws.org/relguide/IAPWS-95.html>)
9. Points V. F., Tikhonov A. I. Math CAD and Python: STEM technology education, Lan Publishing House, 2023 (<https://lanbook.com/catalog/informatika/math-cad-i-python-obuchenie-po-tekhnologii-stem>)
10. V. F. Points, E. E. Ustyuzhanin, Zhuo Ko Ko, V.V. Shishakov. Thermophysical databases: from tables to interactive Internet resources and "cloud" templates. Thermophysics of high temperatures. 2015. No. 4 pp. 41-46.
11. Alexandrov A.A., Ochkov V.F., Ustyuzhanin E.E. [et al.] Thermal engineering calculations on a computer // Textbook. MEI Publishing House. -2019.-250 p.
12. Points V.F., Alexandrov A.A., Znamensky V.E. [et al.] Thermal engineering studies with Excel, Mathcad and the Internet: textbook. handbook /, G. Y. Kondakova, A. Luk, K. A. Orlov, A.V. Ochkov, A. A. Panteleev, Zho Ko Co.— St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2014.— 336c.: ill. ISBN 978-9775-3352-2
13. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. Linstrom P.J., Mallard W.G. National Institute of Standards and Technology// 2005. <http://webbook.nist.gov>
14. V. Y. Zitserman, G. A. Kobzev, L. R. Fokin, etc. Informational triptych of thermophysical properties of substances // 2007, <http://www.thermophysics.ru/triptych>
15. Jorrit Wronski A. O. CoolProp library. Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2014, <http://www.coolprop.org/index.html>
16. Chirico R.D., Frenkel M. A. O. Refprop - 8 data base, 2006, <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>

17. E. E. Ustjuzhanin, V. F. Ochkov, V. E. Znamensky. Development of Internet algorithms and some calculations of power plant COP. Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012348

18. Andryushchenko A.I. On the thermodynamic efficiency of complex GTU cycles in combined cycle gas plants // Thermal power engineering. – 1998. – №3. – С. 68-71.

19. V.A. Voloshchuk, V.F. Ochkov, K.A. Orlov. Thermodynamic optimization of cycles of some GTU and CCGT with the help of modern information technologies (Part 2) // New in the Russian electric power industry, No. 8, 2011. pp. 15-25.

20. E.V. Barochkin, G.V. Ledukhovskiy, A.E. Barochkin. Schemes, equipment and operation of thermal power plants and nuclear power plants: Textbook / Edited by E.V. Barochkin / Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. – Ivanovo, 2014.–208S

21. <http://twi.mpei.ac.ru/TTHB/Aung/>

Authors of the publication

Valery F. Ochkov – National Research University "MPEI", <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, OchkovVF@mpei.ru.

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 28.10.2024 г.

Отредактировано 15.11.2024 г.

Принято 19.11.2024 г.