

ISSN 1998-9903

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

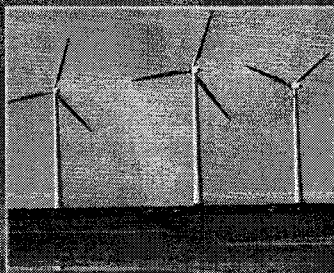
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

11-12

2013



НОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.1.36.7(035.5)

ОБЛАЧНЫЕ СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ ЭНЕРГЕТИКИ

В.Ф. ОЧКОВ, С.А. ПИСКОТИН

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

В статье на примере построения плоской и объемной диаграммы паротурбинного энергетического цикла описана новая информационная технология теплотехнических расчетов с использованием “облачных” функций, возвращающих теплофизические свойства рабочих тел и теплоносителей энергетики. Данные функции хранятся на внешних серверах Интернета – «в облаках».

Ключевые слова: свойства веществ, облачные функции.

Теплотехнические расчеты требуют знания теплофизических свойств рабочих тел и теплоносителей. Эти данные обычно берутся из справочников, где они хранятся в виде таблиц, графиков или набора формул [1]. С развитием информационных технологий появились специальные программы, которые можно запускать на компьютерах, затем вводить исходные данные (температуру и давление, например) и получать нужный ответ – плотность, теплоемкость, теплопроводность и т.д. нужного рабочего тела, теплоносителя или конструкционного материала. Некоторые такие программы по свойствам веществ встроены в компьютерные пакеты программ для теплотехнических расчетов.

В настоящее время почти все компьютеры, на которых работают студенты, аспиранты, инженеры и научные работники, имеют скоростной и бесперебойный выход в Интернет. В связи с этим и по ряду других причин, которые будут раскрыты ниже, в НИУ «МЭИ» (www.mpei.ru) совместно со специалистами ОИВТ РАН (www.jiht.ru) и ООО «Триеру» (www.trie.ru) была разработана и внедрена в практику компьютерных расчетов новая информационная технология работы с электронными базами данных по свойствам рабочих тел, теплоносителей и материалов тепловой и атомной энергетики. Данная технология будет описана в этой статье на примере несложной теплотехнической задачи – построение диаграммы изменения параметров рабочего тела (воды и водяного пара) в простейшем паротурбинном цикле¹. Задача будет решена в среде инженерного калькулятора Mathcad, который в настоящее время широко используется в том числе и для теплотехнических расчетов [2].

В среде Mathcad есть очень полезный инструмент – ссылка из расчетного документа на другой Mathcad-документ. После такой ссылки в рабочем документе

¹ Этот цикл обычно называют циклом Ренкина (Rankine Cycle). Но цикл Ренкина в строгом его понимании – это паротурбинный цикл на влажном паре как на большинстве АЭС. Мы же пар будем перегревать. Поэтому мы наш цикл будем называть циклом паротурбинной установки (ПТУ).

становятся доступными (видимыми, как говорят программисты) пользовательские переменные и функции, определенные в документе, на который сделана ссылка. Такую ссылку в среде Mathcad 15² можно делать не только на файлы, хранящиеся на рабочей станции или в локальной компьютерной сети, но и на внешних сайтах Интернета – «в облаках», как сейчас принято говорить. В связи с этим нами были созданы и размещены в «облаке» на сайте www.trie.ru Mathcad-документы – файлы с расширениями mcd, xmcд и xmcdz, на которые можно делать соответствующие «облачные» ссылки. Если специалисту, рассчитывающему в среде Mathcad какой-либо теплотехнический процесс, необходимо подключить к расчету некоторые функции по свойствам воды и водяного пара – основного рабочего тела и теплоносителя энергетики, то необходимо и достаточно выполнить команды, показанные на рис. 1.

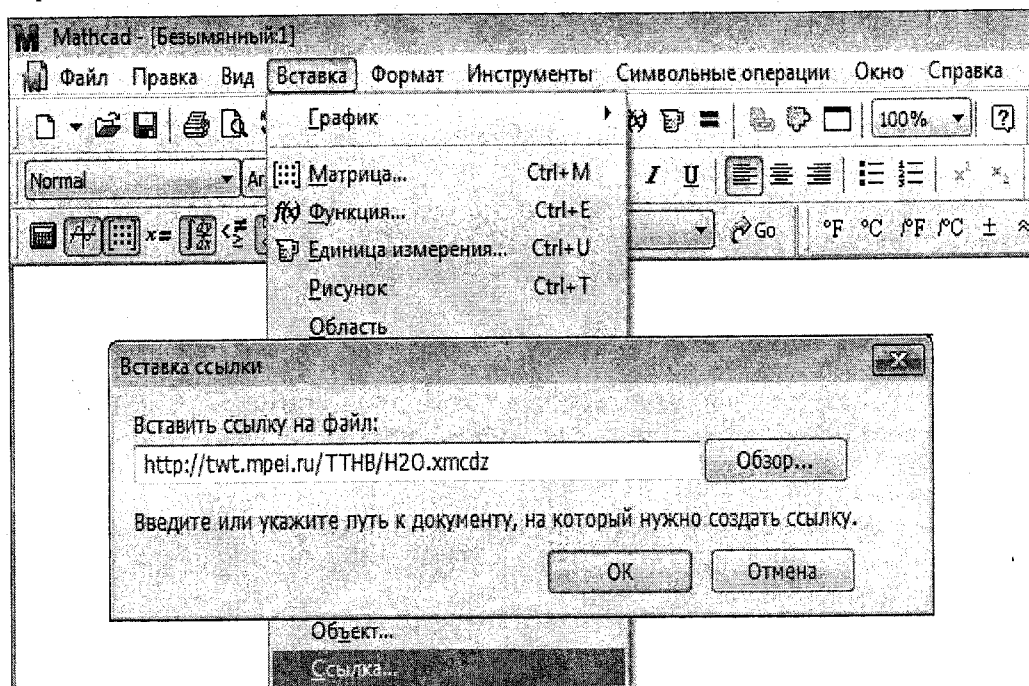


Рис. 1. Команды вставки ссылки в Mathcad-документе

В текстовом окне, показанном на рис. 1, нужно ввести адрес файла с именем Н2О.xmcdz, в котором хранятся «облачные» функции по теплофизическим свойствам воды. Адрес файла таков: <http://twf.mpei.ru/tthb>. Его запомнить несложно: twf – это английская аббревиатура названия кафедры «Технология воды и топлива», mpei – то же для Московского энергетического института России (ru). ТТНВ – аббревиатура четырехтомного справочника (handbook – НВ) по теплоэнергетике и теплотехнике (ТТ), выпущенного Издательским домом МЭИ. Электронный вариант этого справочника с «живыми» таблицами, графиками и формулами размещен по адресу <http://twf.mpei.ru/ТТНВ/tthb.html>.

² В среде Mathcad Prime эта возможность была заглушена по причинам, о которых будет сказано в конце статьи.

Если функции, возвращающие после такой ссылки теплофизические свойства воды и водяного пара, станут видимы в рабочем документе, то несложно решить поставленную задачу – построить диаграмму цикла ПТУ.

На рис. 2 отображены операторы Mathcad, позволяющие решить эту задачу. Это, повторим, сделать совсем несложно, имея под рукой функции по термодинамическим свойствам воды и водяного пара – см. на рис. 2 первый оператор, заключенный в рамку.

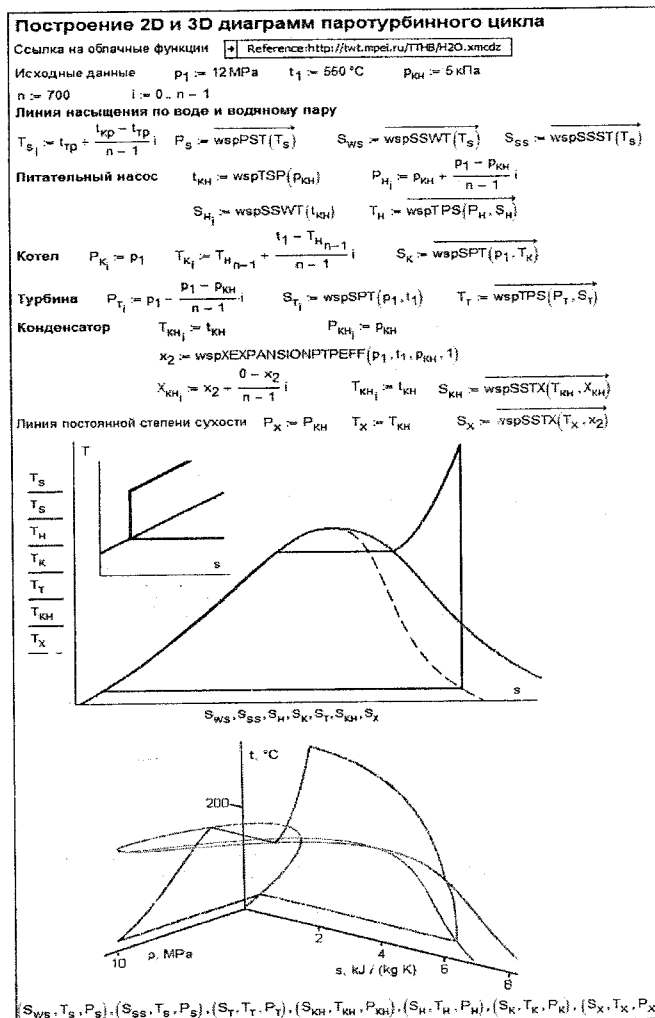


Рис. 2. Построение диаграммы паротурбинного цикла в среде Mathcad

Mathcad-документ с именем H2O.xmcdz, хранящийся «в облаках» по адресу <http://twt.mpei.ru/TTHB>, содержит много различных функций по свойствам воды и водяного пара. В расчете, показанном на рис. 2, используются следующие:

- PST – давление (P) насыщения (S – saturated) зависимости от температуры (T);
- SSWT – удельная энтропия (S) воды (W) на линии насыщения (S) в зависимости от температуры (T);
- SSST – удельная энтропия (S) пара (S) на линии насыщения (S) в зависимости от температуры (T);
- TSP – температура (T) насыщения (S) в зависимости от давления (P);

- TPS – температура (T) в однофазной области в зависимости от давления (P) и удельной энтропии (S);
- SPT – удельная энтропия (S) в однофазной области в зависимости от давления (P) и температуры (T); это «прямая» функция функции TPS (см. выше) – одной из двух обратных функций SPT);
- XEXPANSIONPTREFF – степень сухости влажного водяного пара (X) в конце процесса расширения (EXPANSION) в зависимости от начального давления (P) и температуры (T), конечного давления (P) и внутреннего относительного КПД процесса (EFF);
- SSTX – удельная энтропия (S) двухфазной области (S) в зависимости от температуры (T) и степени сухости водяного пара (X).

Все перечисленные функции данного «облачного» файла имеют префикс `wsp`. Это аббревиатура пакета программ WaterSteamPro – см. www.wsp.ru, содержащего более 500 функций по свойствам рабочих тел энергетики, которые можно скачать с сервера и присоединить по технологии DLL не только к Mathcad, но и к другим востребованным расчетным программам: Excel, Matlab, языки программирования и др. Часть функций пакета WaterSteamPro доступны по технологии «облачных» функций через файл `H2O.xmcdz`.

Исходными данными для расчета нашего упрощенного паротурбинного цикла являются три величины: давление и температура пара на входе в турбину и давление в конденсаторе. Но список исходных параметров несложно увеличить, добавив в расчет, например, внутренние относительные КПД турбины и насоса (у нас в расчете на рис. 2 они равны единице – рассматривается идеальный термодинамический цикл). Можно предусмотреть промежуточный перегрев пара, отборы пара из турбины на регенеративный подогрев воды и др., приблизив тем самым расчет к реальным паротурбинным блокам. Но мы ограничимся расчетом максимального упрощенного варианта. На сайте <http://twf.mpei.ru/ТТНВ/2/tdc.html> читатель найдет online расчеты более сложных паротурбинных циклов.

Линии на диаграммах паротурбинного цикла представляют собой точки, соединенные линиями. Эти точки хранятся в векторах с именами T , S и P (мы построим диаграммы с такими параметрами на осях: температура, удельная энтропия и давление). Длина векторов – 700 элементов: $n:=700$. Заполняются эти векторы будут поточечно – от нулевого до последнего – 699-го элемента: $i := 0 \dots n-1$. На диаграммах дополнительно будут отображаться еще три линии: линия воды в состоянии насыщения (векторы T_s , S_{ws} и P_s), водяной пар в состоянии насыщения (векторы T_s , S_{ss} и P_s) и линия постоянной степени сухости пара (векторы T_x , S_x и P_x). Линия, отображающая паротурбинный цикл, разбита на четыре участка: питательный насос (н), котел (к), турбина (т) и конденсатор (кн). На линии питательного насоса значение давления (P_n) разбивается на n равномерных участков от $p_{кн}$ до p_1 . Вектор значений удельной энтропии (s_n) хранит постоянную величину – удельную энтропию воды в состоянии насыщения при температуре в конденсаторе (процесс сжатия воды в питательном насосе идеальный). По этим двум значениям (векторы P_n и S_n) с помощью облачной функции с именем `wspTPS` рассчитываются значения температуры воды в питательном насосе T_n . Правая стрелка над операторами заполнения векторов – это оператор векторизации – поэлементного выполнения расчетов.

В котле давление P_k остается постоянным и равным p_1 , а температура T_k растет. Она отнюдь не разбивается на n равных участков – от последнего значения в векторе T_n (температура воды на выходе из питательного насоса) до t_1 (температура пара на входе в турбину). По этим двум значениям (векторы P_k и T_k) с помощью функции `wspSPT`

рассчитываются значения температуры воды (зона экономайзера), температура пароводяной смеси (зона кипения воды) и температура пара (зона пароперегревателя). Такой «расклад» применим для p_1 меньшем критического давления³. Если же давление пара на входе в турбину было бы больше критического, то такое разбиение было бы неправомерно. Но так или иначе кривая, характеризующая процесс превращения воды в водяной пар, будет рассчитана, если $p_1 > p_{кн}$ и если параметры воды и водяного пара не выходят за рамки пределов, определенных в формуляции IAPWS-IF97 [1], по которой эти параметры рассчитываются.

При расчете турбины вектор P_t заполняется 700 равностоящими элементами в интервале от $p_{кн}$ до p_1 . Вектор удельной энтропии S_t хранит одинаковые элементы – удельную энтропию при t_1 и p_1 (мы рассчитываем идеальный процесс расширения пара). Вектор температуры T_t заполняется вызовом уже описанной функции `wspTPS`.

В конденсаторе давление $P_{кн}$ и температура $T_{кн}$ постоянны. Значение же удельной энтропии рассчитывается так. Заполняется вектор $X_{кн}$ значениями степени сухости пара от значения x_2 (оно рассчитывается с помощью функции `XEXPANSIONPTPEFF` – см. ее описание выше) до нулевого значения (вода на линии насыщения). Затем с помощью функции `wspSSTX` (она также описана выше) заполняется вектор $S_{кн}$. Последними тремя операторами присваивания в расчете на рис. 2 заполняются три вектора P_x , T_x и S_x для построения двух линий насыщения (вода и водяной пар) и линии постоянной степени сухости пара, до которой «спускается» линия расширения пара в турбине.

Векторы, в которых хранятся координаты точек, в среде Mathcad несложно отобразить графически. Обычно паротурбинный цикл на диаграммах отображают в T, s – или в h, s – координатах. При этом процесс повышения давления воды в питательном насосе несколько гипертрофируют – искусственно повышают температуру воды на выходе из питательного насоса так, чтобы этот процесс был виден на T, s – диаграмме и чтобы линия, отображающая этот процесс, не сливалась с линией насыщения воды⁴. На рис. 2 эта проблема решена иначе: полная диаграмма паротурбинного цикла показана без искажений, а участки окончания процесса конденсации пара в конденсаторе, повышения давления воды в питательном насосе и начала нагрева воды в экономайзере показаны в увеличенном масштабе, на свободном месте полной диаграммы.

Второй способ правильного показа T, s – диаграммы паротурбинного цикла без искажений – это построение ее в *трехмерном виде*. Для этого-то и в расчете были заполнены векторы с именем P и с индексами sw, ss, n, k, t, kn и x . На плоской T, s – диаграмме были задействованы векторы с именами T и S . На объемной же диаграмме паротурбинного цикла (на $3D$ -диаграмме), использующего тройку векторов S, T и P (см. нижнюю часть рис. 2), участок диаграммы работы питательного насоса уже не нужно искажать или показывать отдельно в увеличенном виде – дополнительная третья ось диаграммы (ось давления) поставила все на свои места: точка оказалась не точкой, а линией поднятия давления в питательном насосе.

Первая диаграмма на рис. 2 (T, s – диаграмма) – это фактически трехмерная T, s, p – диаграмма, повернутая к зрителю осью давления. На рис. 3 показаны две другие проекции этой объемной диаграммы: T, p – диаграмма и p, s – диаграммы,

³ $p_{кр}$ – эта константа (критическое давление воды) становится видимой в расчетном после ссылки на файл `H2O.xmcdz`. Кроме того, становятся доступными русские названия единиц измерения: кДж, кг и т.д.

⁴ Так, например, изображена диаграмма паротурбинного цикла на эмблеме Института тепловой и атомной энергетики (бывший ТЭФ) НИУ «МЭИ».

© Проблемы энергетики, 2013, № 11-12

которые редко используются для графической иллюстрации паротурбинных циклов, но, тем не менее, имеют «право на жизнь».

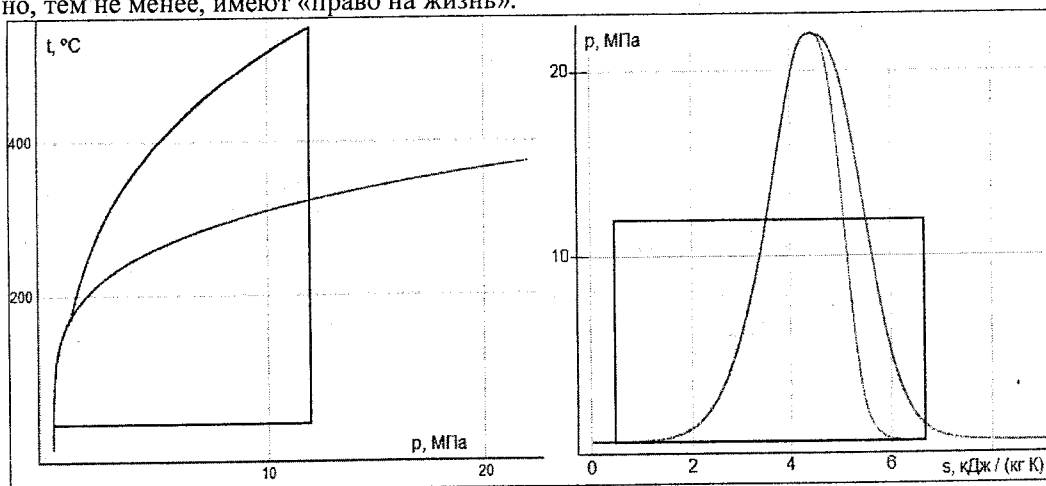


Рис. 3. Две проекции трехмерной диаграммы паротурбинного цикла

Расчет, показанный на рис. 2, можно дополнить операторами, формирующими векторы H (удельная энтальпия), что позволит построить и h, s – диаграмму (диаграмму Моляе⁵). Несложно также заполнить и другие векторы – D (плотность рабочего тела), U (удельная внутренняя энергия), E (удельная эксергия), C_p (удельная изобарная теплоемкость), C_v (удельная изохорная теплоемкость) и другие, чтобы построить диаграммы любого вида. На сайте по адресу <http://twf.mpei.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd> расположен on-line расчет паротурбинного цикла и построение его диаграмм (плоских и объемных) с любыми выбранными осями [3].

Использованию облачных функций может мешать одно обстоятельство. Во многих «серьезных» организациях (НИИ, проектных бюро, наладочных фирмах, электростанция и др.) в целях безопасности блокируют или ограничивают выход в Интернет с компьютеров рядовых сотрудников. Выход в Интернет имеет только системный администратор. Такие организации могут использовать облачные функции так: через администратора сети скачивать их из «облаков» и размещать на локальном сервере этой организации или на рабочих станциях конечных пользователей.

Так, например, база данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ, созданная в свое время в лаборатории имени Глушко Института высоких температур АН СССР, в настоящее время переводится в интерактивный, сетевой и открытый вид. «Сетевой» означает, что эта база данных расположена в Интернете – см. на рис. 4 соответствующий сайт. «Интерактивный» означает, что посетитель сайта может поменять значение, например, температуры и получить новые значения свойства вещества. «Открытый» означает то, что все формулы открыты не только для просмотра, но и для скачивания и использования их в расчетных программах и не только в среде Mathcad разных версий, но и в среде табличного процессора Excel, который широко используется для расчетов.

⁵ Рихард Моляе в 1906 году выпустил книгу «Новые таблицы и диаграммы для водяного пара», где была описана данная диаграмма. h, S – диаграмму называют диаграммой Моляе только в Германии. Кстати говоря, периодическую таблицу элементов называют таблицей Менделеева только в России, а во всем остальном мире просто периодической таблицей элементов.

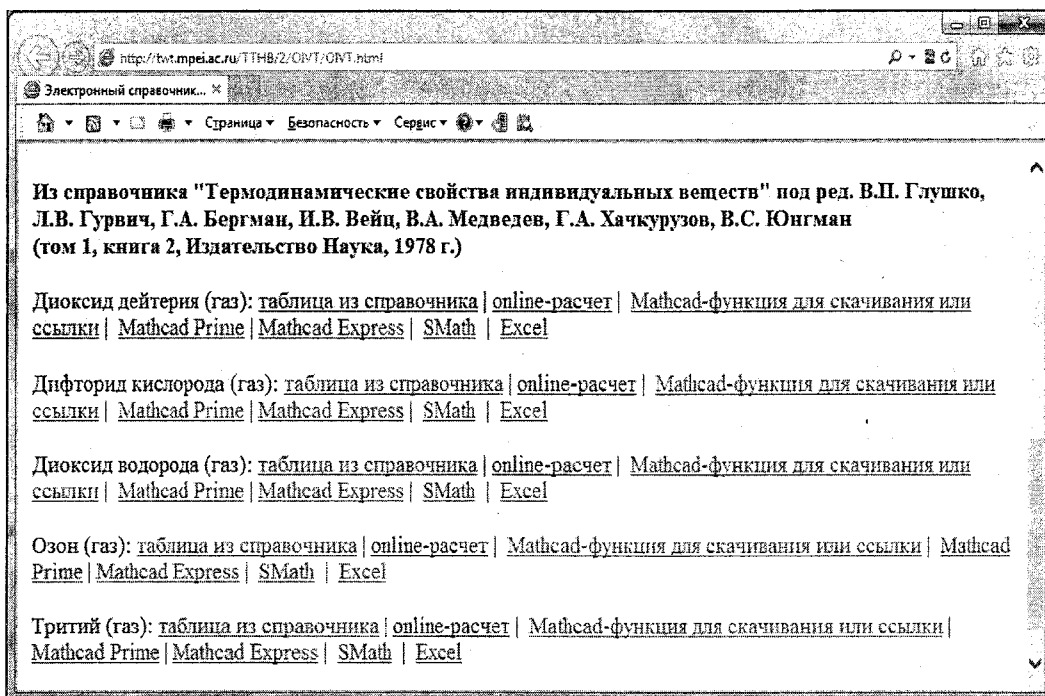


Рис. 4. Интерактивная сетевая открытая база данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ

Но преимущества работы с облачными функциями неоспоримы. Во-первых, эти функции всегда «свежи» – разработчики их непрерывно оптимизируют, уточняют, расширяют допустимый диапазон их аргументов, исправляют возможные ошибки и опечатки. Во-вторых, исключаются проблемы, связанные с потерей установленных программ – баз данных при поломке или смене компьютера или его операционной системы.

Выводы

Ссылки на облачные функции по свойствам веществ и процессам их использования, работа которых опробована на инженерном калькуляторе Mathcad и описана в данной статье, – это инновационная технология, позволяющая эффективно организовать процесс расчета энергетических объектов. На сайте <http://twm.mpei.ru/ТТНВ/2/tdc.html> размещено большое количество on-line расчетов термодинамических циклов (ПТУ, ГТУ, ПГУ, холодильные машины, тепловые насосы и др.) различной степени сложности.

Summary

In this paper the example of the construction of flat and three-dimensional diagrams of the steam-turbine power cycle describes a new information technology thermal calculations using functions that return a thermo-physical properties of the working fluids and coolants energy. These functions are stored on external servers on the Internet - "in the clouds".

Keywords: properties of matter, cloud features.

Литература

1. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. М.: Издательский дом МЭИ, 2009 (<http://twi.mpei.ru/rbtpp>).
2. Очков В.Ф., Утенков В.Ф., Орлов К.А. Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика. 2000. № 2. (<http://twi.mpei.ru/ochkov/WSPHB/TE-2-2000.pdf>).
3. Очков В.Ф. Построение диаграмм термодинамических циклов (в среде Mathcad): шаг за шагом // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2009. № 2-3. (<http://twi.mpei.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS-Create.html>).

Поступила в редакцию

02 октября 2013 г.

Очков Валерий Федорович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология воды и топлива» Национального исследовательского университета «МЭИ».

Пискотин Сергей Александрович – студент Национального исследовательского университета «МЭИ». Тел: 8(915)3322496. E-mail: piskotinsa@mpei.ru.