

Теплотехнические расчеты: от встроенных функций к облачным

В.Ф. Очков, К.А. Орлов

ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», г. Москва, Российская Федерация
Email: ochkov@tw.t.mpei.ac.ru, orlov@tw.t.mpei.ac.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующие подходы к выполнению теплотехнических расчетов не учитывают современные возможности по использованию компьютерных вычислений. Существует также проблема использования опубликованных справочных данных, в которых могут содержаться неточности, исправление которых затруднительно, требует больших временных затрат и не может быть осуществлено одновременно во всех случаях использования. Для решения этих вопросов предлагаются подходы к ведению расчетов на основе централизованных облачных компьютерных технологий.

Материалы и методы: Используются возможности современных расчетных программных средств, таких как Mathcad, позволяющие организовать простой и удобный доступ к справочным данным для расчетов на локальном компьютере пользователя централизованно через Интернет.

Результаты: Рассмотрена методика доступа к справочным данным для организации теплотехнических расчетов в среде Mathcad.

Выводы: Ссылки на облачные функции по свойствам веществ и процессам их использования являются инновационной технологией, позволяющей эффективно организовать процесс расчета энергетических объектов.

Ключевые слова: теплотехнический расчет, информационные технологии, облачные вычисления, функции свойств веществ, справочные данные.

Thermal calculations: from built-in to cloud functions

V.F. Ochkov, K.A. Orlov

National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation
Email: ochkov@tw.t.mpei.ac.ru, orlov@tw.t.mpei.ac.ru

Abstract

Background: The existing approaches to the implementation of thermal calculations do not take into account the current possibilities of computer-assisted calculations. There is also a problem of using published reference data that may contain errors. Correction of the errors is difficult, time-consuming and cannot be made simultaneously for all use cases. The paper suggests solving these problems by making calculations on the basis of centralized cloud computer technologies.

Materials and Methods: Application of modern computational software tools such as Mathcad can make it easy and convenient to access the reference data for calculations on a user's local computer using an Internet (cloud) server.

Results: The method of accessing reference data for organizing thermal calculations in Mathcad has been investigated.

Conclusions: Links to cloud functions arranged according to the properties of substances and processes of their use are an innovative technology that makes it possible to organize the process of thermal engineering calculations efficiently.

Key words: thermal calculations, information technologies, cloud computing, functions of substance properties, reference data.

Одной из программ константного¹ обеспечения теплотехнических расчетов является программа WaterSteamPro [1]. После загрузки ее с сайта www.wsp.ru на компьютерах конечных пользователей становятся доступны (видимыми, как говорят программисты) функции, возвращающие теплофизические свойства рабочих тел и теплоносителей, используемых в энергетике. Эти функции превращаются во встроенные (как функция $\sin(x)$, например) почти во всех программах, исполь-

зуемых в инженерных и научно-технических расчетах (Excel², Mathcad, Matlab, Maple [2]), а также языках программирования высокого уровня (Pascal, BASIC, C, Fortran и др.). Пакет WaterSteamPro основан на Формуляции 1997 года Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара [3]. На сайте этой организации (www.iapws.org) есть соответствующая ссылка на пакет WaterSteamPro, что говорит о международной сертификации этого программного продукта, который также официально сертифицирован и Госстандартом России.

¹ Правильнее говорить – *функционального* обеспечения. Но под константами мы понимаем и зависимости этих констант от температуры, давления и прочих параметров веществ, в частности рабочих тел и теплоносителей.

² Excel (электронные таблицы) – это в первую очередь бухгалтерская программа, но многие используют ее и для научно-технических расчетов.

Наиболее удобно работать с пакетом WaterSteamPro в программе Mathcad [2], которая оснащена инструментарием работы с физическими величинами. Это вкупе с хорошей документированностью расчетов намного упрощает и ускоряет расчеты, исключает многие ошибки в них, повышает наглядность (открытость) расчетов.

На рис. 1 показано, как после подключения пакета WaterSteamPro к программе Mathcad в ней становятся видимыми функции по свойствам воды и водяного пара с префиксом wsp. Эти функции «в чистом виде» работают с безразмерными величинами (Unitless), хранящими значения параметров воды и водяного пара с базовыми единицами СИ: паскаль (давление), джоуль (энергия, работа), кельвин (температура) и т.д., что не очень удобно и чревато ошибками (килограммы можно сложить с метрами, грубо говоря).

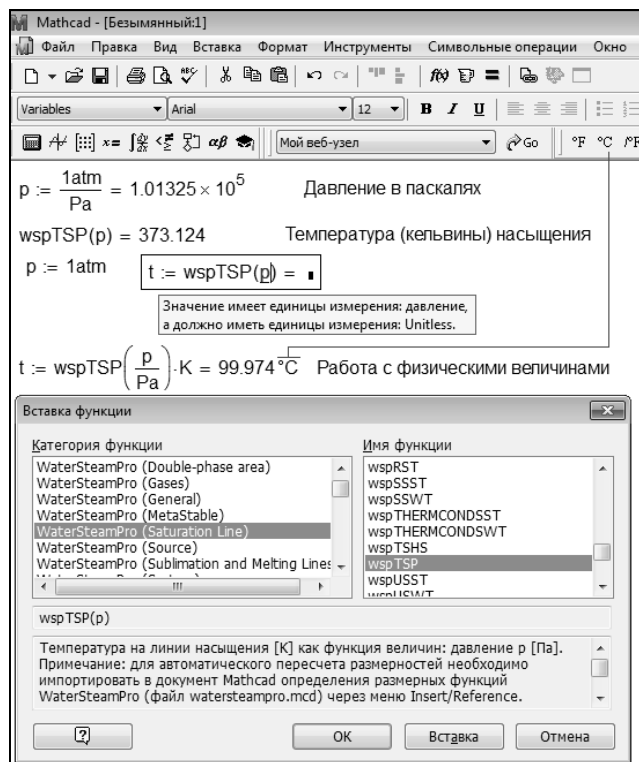


Рис. 1. Mathcad с подключенным пакетом WaterSteamPro

В документе, показанном на рис. 1, функция wspTSP (одна из более чем трех сотен функций пакета – она возвращает температуру T насыщения (S – saturation) воды и водяного пара в зависимости от давления P) была переопределена (деление аргумента на паскали и умножение функции на кельвины) так, чтобы она могла работать с физическими величинами – давлением и температурой. Такие переопределения всех функций пакета WaterSteamPro собраны в одном Mathcad-документе с именем watersteampro.xmcd, который поставляется вместе с пакетом и на который достаточно сделать ссылку в рабочем

Mathcad-документе (рис. 2), чтобы механизм размерностей заработал в полной мере.

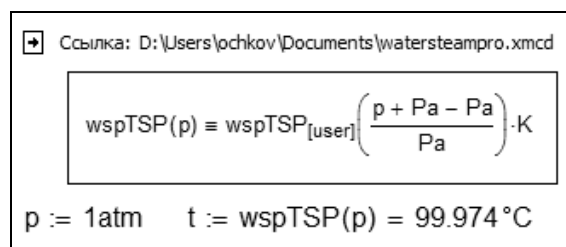


Рис. 2. Штатные средства работы с физическими величинами в комплексе Mathcad-WaterSteamPro

В силу того, что пакет WaterSteamPro был создан с помощью языка программирования C++, который не имеет инструментария работы с физическими величинами и единицами их измерения, «в чистом виде» (без ссылки на файл watersteampro.xmcd) пакет WaterSteamPro работает по умолчанию с базовыми единицами СИ, не «высвечивая» их в расчете. Так, кстати, можно и нужно работать в готовом (отлаженном) расчете для повышения его скорости.

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 другим причинам в НИУ «Московский энергетический институт» была разработана и внедрена в практику новая информационная технология работы с электронными базами данных по свойствам рабочих тел, теплоносителей и материалов, используемых в тепловой и атомной энергетике. Опишем данную технологию на примере несложной задачи – расчет и оптимизация простейшего паротурбинного цикла³ с промежуточным перегревом пара [4] в среде инженерного калькулятора Mathcad (широко используется в настоящее время).

В среде Mathcad есть очень полезный инструмент – ссылка из расчетного документа на другой Mathcad-документ. После такой ссылки в рабочем документе становятся доступными (видимыми, как говорят программисты) все пользовательские константы, переменные и функции, определенные в документе, на который сделана ссылка. Такую ссылку можно делать на файлы, хранящиеся не только на рабочей станции и в локальной компьютерной сети, но и на внешних сайтах Интерне-

³ Этот цикл обычно называют циклом Ренкина (Rankine Cycle). Но цикл Ренкина в строгом его понимании – это паротурбинный цикл без перегрева водяного пара, на влажном паре (как на большинстве АЭС). Мы же пар будем перегревать. Кроме того, в нем предусмотрен и промежуточный перегрев пара. Поэтому мы наш цикл будем называть циклом паротурбинной установки.

та – «в облаках», как сейчас принято говорить⁴. В НИУ «МЭИ» совместно со специалистами ОИВТ РАН и ООО «Триеру» были созданы и размещены на сайте www.trier.ru Mathcad-документы – файлы с расширениями mcd, xmcd и xmcdz. Если специалисту, рассчитывающему в среде Mathcad какой-либо теплотехнический процесс, необходимо подключить к расчету функции по свойствам, например, воды и водяного пара – основного рабочего тела и теплоносителя в энергетике, то необходимо и достаточно выполнить команды, показанные на рис. 3.

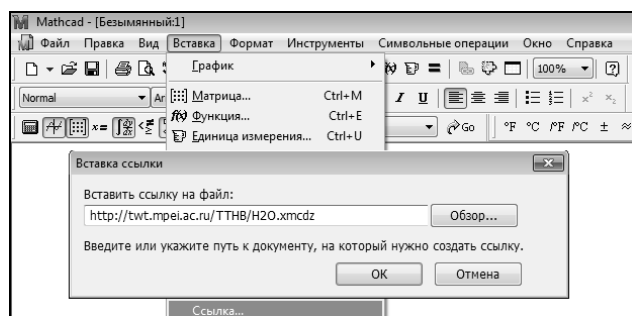


Рис. 3. Команда вставки ссылки в Mathcad-документе

После такой команды (рис. 3) функции, возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара, станут видимы в рабочем документе. Как результат, несложно решить поставленную задачу: рассчитать и оптимизировать паротурбинную энергетическую установку (ПТУ) с промежуточным перегревом пара – определить давление промежуточного перегрева пара, при котором термический КПД паротурбинного цикла будет максимален (рис. 4).

Первым оператором расчета, показанного на рис. 4, является оператор ссылки на уже отмеченный файл (Mathcad-документ) с именем H2O.xmcdz, хранящийся «в облаках» – на сервере по адресу twf.mpei.ac.ru/TTNB⁵. Такая ссылка, как уже было отмечено, делает видимыми в расчете константы и функции, определенные в «облачном» Mathcad-документе с именем H2O.xmcdz. А это, в первую очередь, функции, устанавливающие соотношения между различными множествами параметров

этого основного рабочего тела тепловой энергетике.

Далее за оператором ссылки размещены операторы задания исходных данных: параметры свежего пара, поступающего в турбину (p_0 и t_0); внутренний относительный КПД турбины; температура, до которой водяной пар перегревается в промежуточном пароперегревателе (t_{np}); давление в конденсаторе (p_k). Давление промежуточного перегрева пара (p_{np}) задается через функцию `stack` (она преобразует список в вектор) несколькими дискретными значениями в диапазоне от p_k до p_0 – в диапазоне давлений в турбине: сначала переменной p_{np} присваивается скалярное, а не векторное значение, например, 1,5 МПа, на котором отлаживается расчет; затем этой переменной присваивается несколько значений в виде вектора через функцию `stack`. Над некоторыми функциями и операторами расчета, показанного на рис. 4, проведена горизонтальная правая стрелка. Это оператор векторизации, заставляющий отмеченное действие (вызов функции, расчет по формулам) выполняться поэлементно. У операторов с векторизацией не выведено полученного значения, так как оно бы занимало много места. Оператор вывода полученного значения « $=$ » можно добавлять к формулам с векторизацией в момент его отладки, когда переменной p_{np} было присвоено единичное значение (скаляр), а не ряд значений (вектор).

В пакете «облачных» функций, на который сделана ссылка (рис. 4, вторая строка), есть функции, возвращающие не только свойства воды и водяного пара, но и функции, возвращающие некоторые технологические параметры этого рабочего вещества и оборудования, его использующего. Функция `wspHEXPANSIONPTPEFF` возвращает удельную энтальпию в конце процесса расширения (EXPANSION) пара в турбине в зависимости от начального давления (p) и температуры (T), конечного давления (p) и внутреннего относительного КПД процесса (EFF).

После того, как в расчете определены все нужные параметры в ключевых точках цикла (рис. 4, пп. 1–9), формулой в п. 11 (рис. 4) рассчитывается вектор значений термического КПД турбоустановки. Эти точки (два вектора p_{np} и η_t) отображены на графике (рис. 4, п. 12). Дополнительно сплайн-интерполяцией через данные точки проведена кривая, у которой найдена ордината максимального значения – рассчитано значение давления промежуточного перегрева пара (4,994 МПа), при котором термический КПД паротурбинного цикла будет максимален (41,76 %).

⁴ В «облаках» сейчас, как правило, хранят фотографии для того, чтобы они были доступны из любого компьютера. Но в «облаках» можно хранить и более практичные вещи.

⁵ twf – это английская аббревиатура названия кафедры Технологии воды и топлива; mpei – аббревиатура Московского энергетического института, являющегося академической (ac) организацией России (ru); TTNB – аббревиатура четырехтомного справочника (handbook – HB) по теплоэнергетике и теплотехнике (TT), выпущенного Издательским домом МЭИ. Электронный его вариант с «живыми» таблицами, графиками и формулами размещен по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/tthb.html>

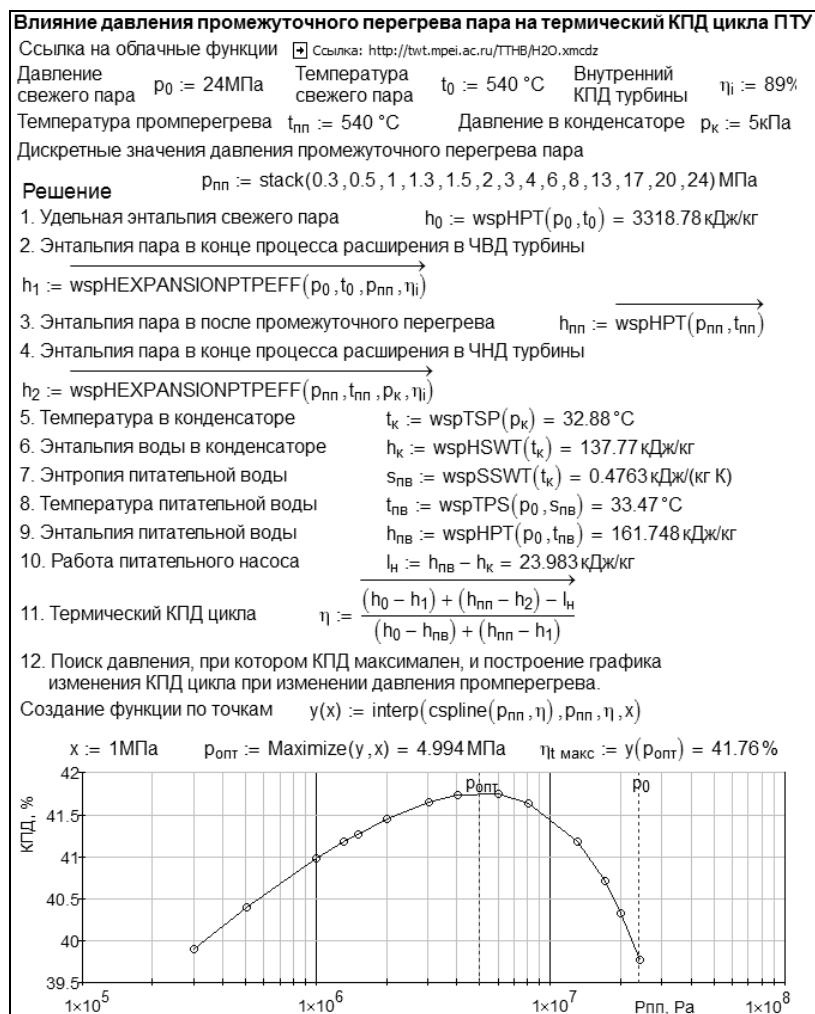


Рис. 4. Расчет эффективности промежуточного перегрева пара

Обычно расчет термодинамического цикла завершают его отображением на диаграммах, на осях которых зафиксированы некоторые параметры рабочего тела – температура, удельная энтропия, удельная энтальпия, давление, плотность и проч. Графические средства Mathcad позволяют это сделать легко и быстро количественно, а не качественно⁶, отображая реальные процессы с реальными величинами. На рис. 5 показано начало построения такой диаграммы – проведены линии насыщения по воде и водяному пару, проставлены критическая точка⁷ и точка, отображаю-

щая конец процесса перегрева пара в котле и начало расширения пара в турбине, изобара начального давления (идеальный процесс нагрева и испарения воды, а также перегрева пара в котле).

На T,s-диаграмме показана также изохора и изоэнтальпа точки свежего пара. Для построения этих изолиний нам потребуются функции, которых нет в файле H2O.xmcdz, но которые несложно создать, используя встроенные инструменты Mathcad.

⁶ При «качественном» графическом отображении паротурбинных циклов, как правило, резко завышают значение температуры питательной воды, чтобы линия нагрева воды в экономайзере не сливалась с линией насыщенной воды. Так, например, «нарисован» цикл паротурбинной установки на эмблеме института тепловой и атомной энергетики МЭИ и в различных книгах по термодинамике.

⁷ Параметры критической и тройной точек воды и водяного пара хранятся в «облачном» файле H2O.xmcdz. Там же хранятся и русские имена единиц измерения – Дж, кг и т.д. (а также их сочетание кДж/(кг·К)).

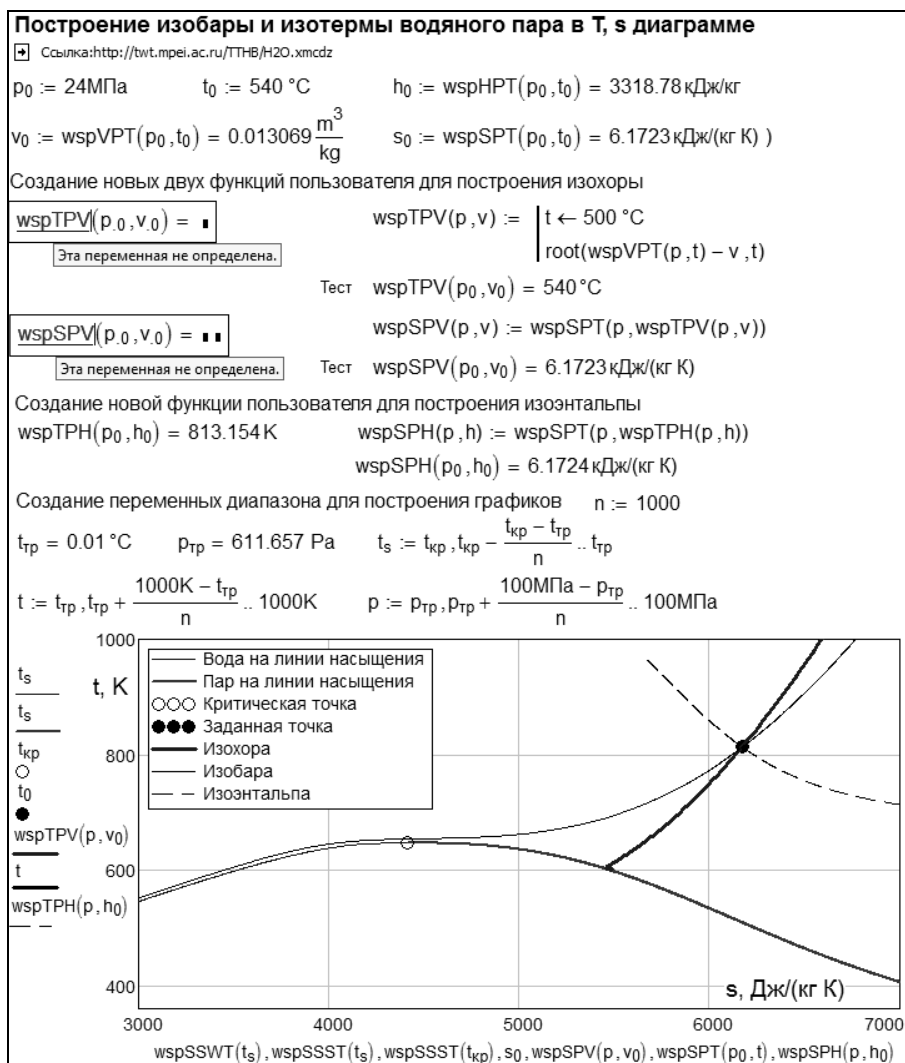


Рис. 5. T, s-диаграмма в среде Mathcad

Для построения на T, s-диаграмме изохоры начального удельного объема свежего водяного пара необходимо иметь две функции, возвращающие температуру и удельную энтропию в зависимости от давления и удельного объема – wspTPV и wspSPV . Таких функций в файле H2O.xmcdz нет, и это зафиксировано на рис. 5 операторами с выведенными сообщениями об ошибке: «Эта переменная (вернее, функция) не определена». Но в файле H2O.xmcdz есть функция wspVPT , возвращающая удельный объем воды или водяного пара в зависимости от давления и температуры. Требуемая функция wspTPV является обратной по отношению к функции wspVPT , и ее несложно определить, используя встроенную в Mathcad функцию root , возвращающую нуль анализируемой функции (разность $\text{wspVPT}(p, t) - v$) вблизи заданной точки – температуры t . В качестве начального приближения мы выбрали значение $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Его следует менять, если необходимо задать обратную функцию в другой области значений.

Вторая функция, необходимая для построения изобары, – функция wspSPV , была

создана на базе имеющейся в файле H2O.xmcdz функции wspSPT , у которой второй аргумент (температура) был заменен на ранее созданную функцию wspTPV .

С помощью приема замены аргумента на функцию была создана функция wspSPH , необходимая для построения изохоры: в функции wspSPT (она есть в файле H2O.xmcdz) второй аргумент (температура) был заменен на имеющуюся в файле H2O.xmcdz функцию wspTPH . На осях T, s-диаграммы (рис. 5) показаны семь пар аргументов. При этом переменные t_s , t и p , используемые в диаграмме, это не константы, а переменные диапазона, хранящие набор дискретных значений, который должен быть задан перед построением диаграмм. (В расчете учитывается работа питательного насоса с идеальным (изоэнтропным) повышением давления.)

Альтернативный способ поиска оптимального значения давления промежуточного перегрева пара – это создание функции пользователя, имеющей в качестве аргументов исходные данные для расчета и возвращающей термический КПД цикла ПТУ. Эта функция показана на рис. 6.

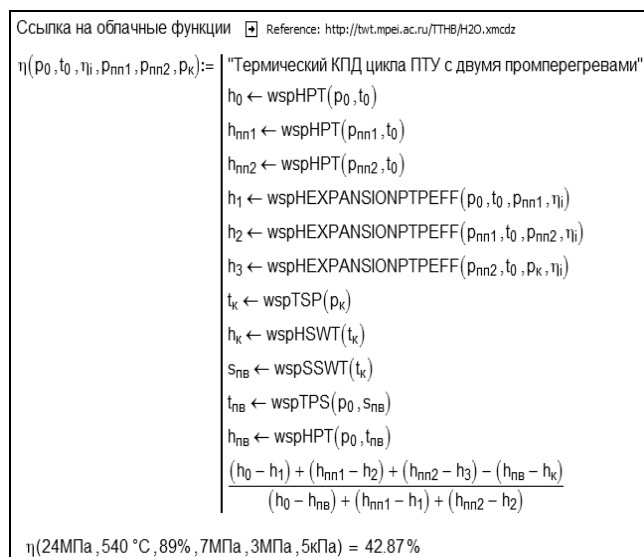


Рис. 6. Создание функции, возвращающей КПД цикла ПТУ

В функции, показанной на рис. 6, повторены операторы, использованные и описанные в расчете, показанном на рис. 5. Сделано только одно дополнение – в цикле ПТУ предусмотрен не один (рис. 5), а два промежуточных перегрева пара с давлениями p_{nn1} и p_{nn2} . На рис. 7 отображен процесс вызова этой функции в трех случаях:

1. Промперегрева нет – $p_{nn1} = p_{nn2} = p_0$.
 2. Один промежуточный перегрев пара – $p_{nn1} = p_{nn2} < p_0$ (повторение расчета, показанного на рис. 5).

3. Два промежуточных перегрева пара. Оптимизация процесса двойного промперегрева отображена линиями уровня.

Во всех трех случаях (рис. 7) рассчитана степень сухости пара, поступающего в конденсатор турбины. Для этого была задействована еще одна функция пакета H2O.xmcdz.

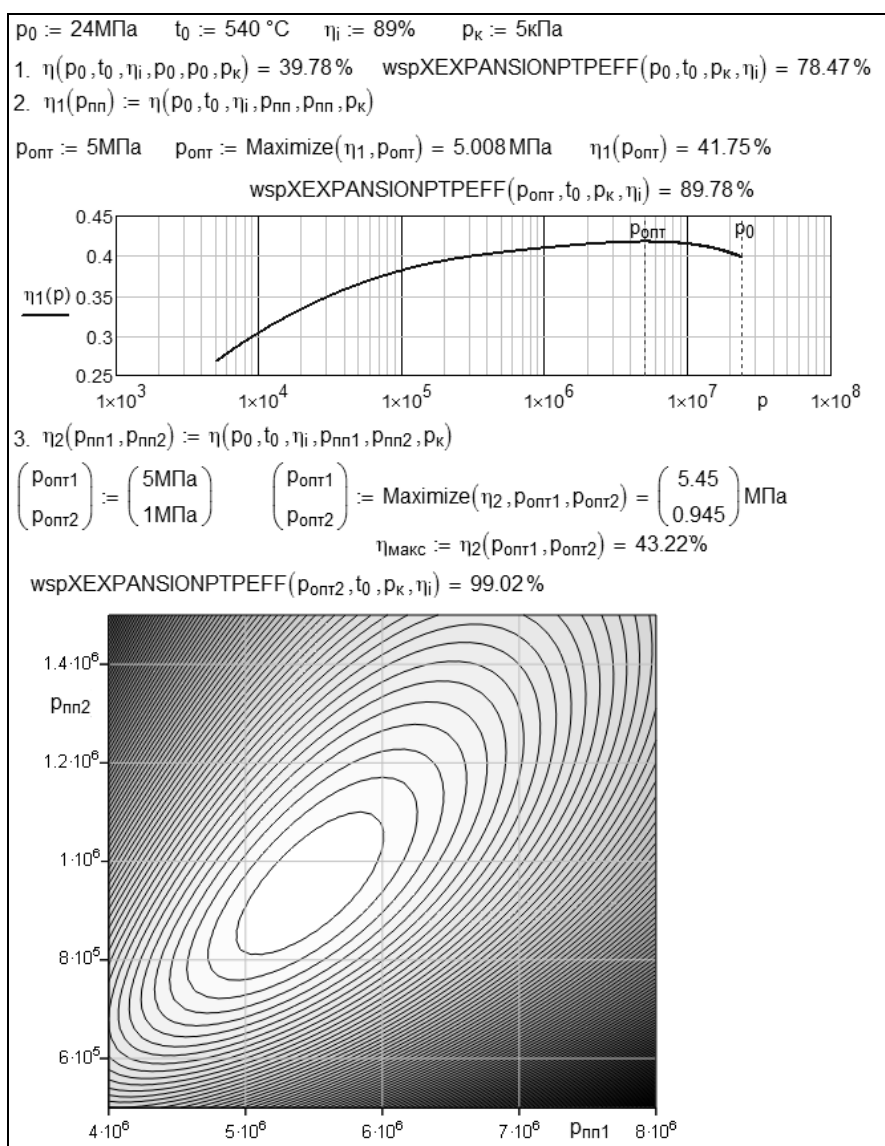


Рис. 7. Оценка эффективности промперегрева пара в цикле ПТУ

Заключение

Ссылки на облачные функции по свойствам веществ и процессам их использования, работа которых опробована на инженерном калькуляторе Mathcad, – это инновационная технология, позволяющая эффективно организовать процесс расчета энергетических объектов⁸.

Список литературы

1. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 224 с.

2. Дьяконов В.П. Новые информационные технологии: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 640 с. (доп. издание).

3. IF-97 IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. International Association for the Properties of Water and Steam / Executive Secretary R.B. Dooley. Electric Power Research Institute. Palo Alto. CA 94304, USA.

4. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. 160 с.

References

1. Aleksandrov, A.A., Orlov, K.A., Ochkov, V.F. *Termofizicheskie svoystva rabochnik veshchestv teploenergetiki: Internet-spravochnik* [Thermophysical properties of working substances of power systems: Internet reference book]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2009. 224 p.

2. D'yakonov, V.P. *Novye informatsionnye tekhnologii* [New information technologies. Study guide]. Moscow, Solon-Press, 2009. 640 p.

3. IF-97 IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. International Association for the Properties of Water and Steam. Executive Secretary R.B. Dooley. Electric Power Research Institute. Palo Alto. CA 94304, USA.

3. Alexandrov, A.A. *Termodinamicheskie osnovy tsiklov teploenergeticheskikh ustanovok* [Thermodynamic basics of thermal power cycles]. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2004. 160 p.

Очков Валерий Федорович,
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
доктор технических наук, профессор кафедры технологии воды и топлива,
телефон (495) 362-71-71,
e-mail: ochkov@twi.mpei.ac.ru

Орлов Константин Александрович,
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии воды и топлива,
телефон (495) 362-71-71,
e-mail: orlov@twi.mpei.ac.ru

⁸ На сайте <http://twi.mpei.ac.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