

УДК 621.1.36.7(035.5)

Теплотехнические расчеты с использованием «облачных» функций

д.т.н. Очков В.Ф., студент Нгуен Тиен Санг

Национальный исследовательский университет «МЭИ»¹

В статье на примере расчета и оптимизации паротурбинного энергетического цикла с двумя регенеративными подогревателями 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».

Теплотехнические расчеты требуют знания теплофизических свойств рабочих тел, теплоносителей и конструкционных материалов. При ручных расчетах эти данные 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, вводить исходные данные (температуру и давление, например) и получать нужные ответы – плотность, теплоемкость, теплопроводность и т.д. нужного рабочего тела, теплоносителя или материала. Появились сайты Интернета, где такие расчеты (справки) можно вести в режиме on-line. К примеру, все таблицы, графики и формулы справочника [1] продублированы в Интернете – см. <http://twt.mpei.ac.ru/rbtpp>. Некоторые такие базы данных свойств веществ встроены в специализированные компьютерные пакеты программ для теплотехнических расчетов – в программу Thermoflow, например, см. – www.thermoflow.com. Они работают по принципу «черного ящика», куда «кладут» массив исходных данных, «закрывают крышку ящика» (нажимают кнопку «Пересчитать»), «открывают крышку» и «вытаскивают из ящика» ответ – параметры проектируемого или эксплуатируемого теплотехнического объекта. Но всегда хочется знать, что находится в таком «черном ящике», правильно ли ведутся расчеты. Всегда есть желание провести свой собственный расчет или проверить тот, какой сделан в «большой» программе. Кроме того, приоткрывать крышку такого «ящика» полезно в целях образования и самообразования – для изучения математических моделей, заложенных в те или иные расчетные программы. Вот мы сейчас и рассмотрим такую частную математическую модель!

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

¹ 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14 – www.mpei.ru

внедрена в практику 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 задачи – расчет простейшего паротурбинного цикла². Она 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 становятся доступными (видимыми, как говорят программисты) все пользовательские константы, переменные и функции, определенные в документе, на который сделана ссылка. Такую ссылку можно делать не только на файлы, хранящиеся на рабочей станции и в локальной компьютерной сети, но и на внешних сайтах Интернета – «в облаках», как сейчас принято говорить³. В НИУ «МЭИ» совместно со специалистами ОИВТ РАН и ООО «Триеру» были созданы и размещены на сайте www.trie.ru такие 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 энергетики, то нужно выполнить команды, показанные на рис. 1.

² 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 предусмотрены два регенеративных отбора пара на внутреннюю теплофикацию. Поэтому мы наш цикл будем называть циклом паротурбинной установки (ПТУ).

³ В «облаках» сейчас, как правило, хранят фотографии для того, чтобы они были доступны из любого компьютера. Но в «облаках» можно гранить и более практичные вещи... Читаем статью дальше!

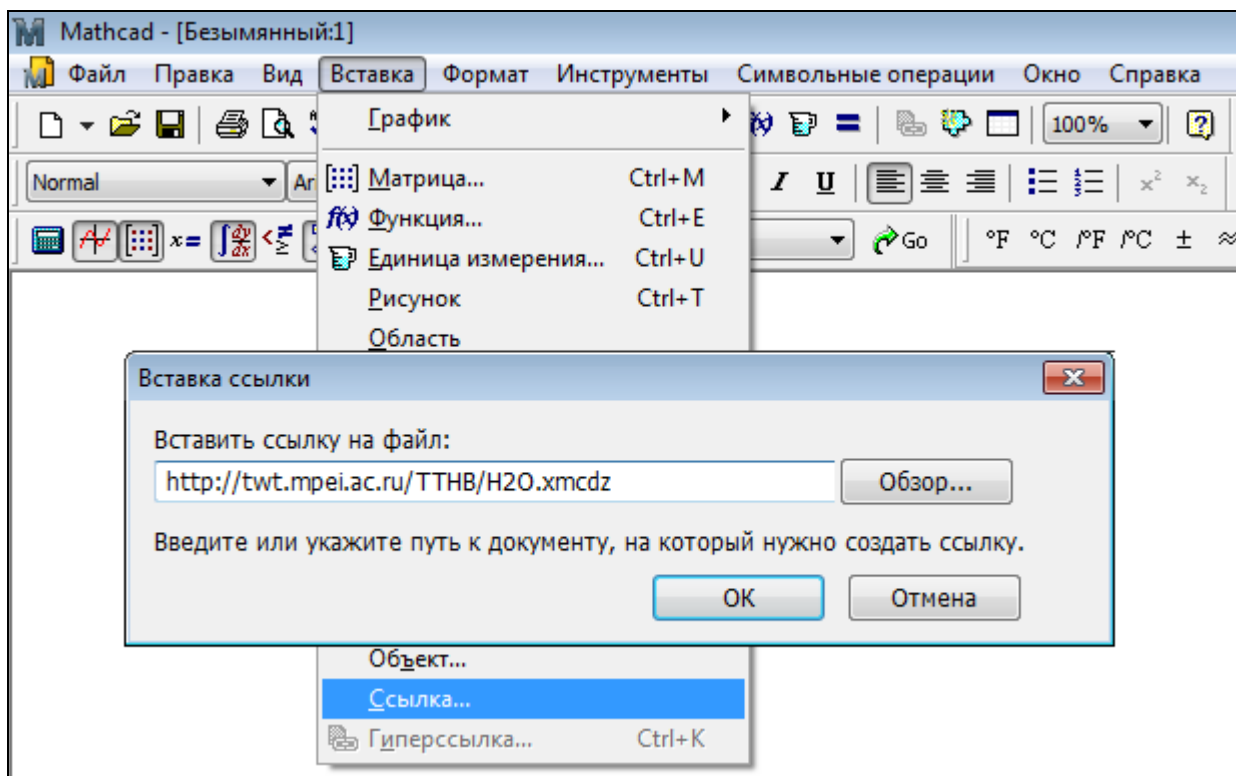


Рис. 1. Команда вставки ссылки в Mathcad-документе

Если функции, возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара стали видимы в рабочем документе, то несложно решить поставленную задачу – рассчитать паротурбинную энергетическую установку (ПТУ) с двумя регенеративными подогревателями.

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

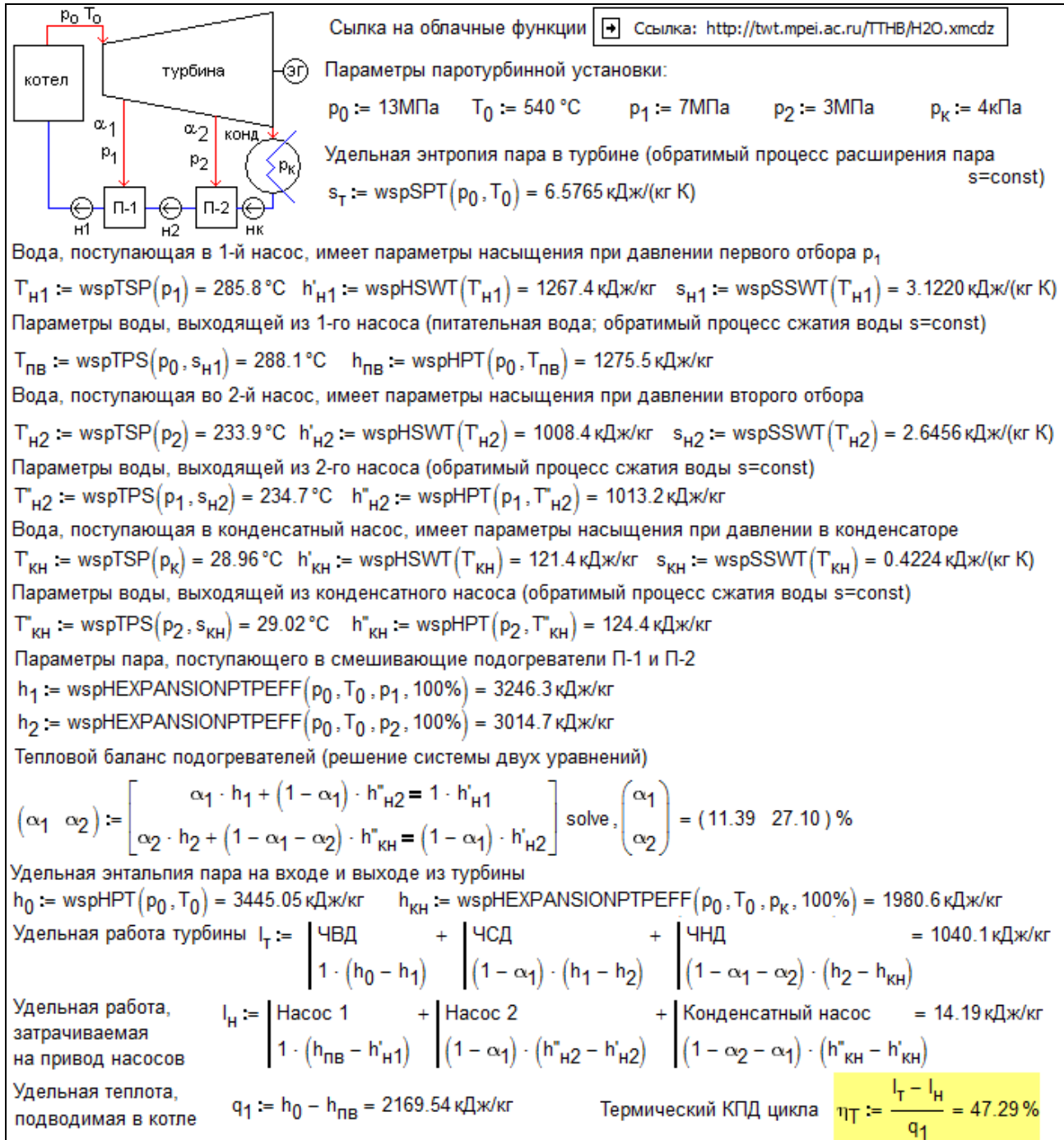


Рис. 2. Расчет ПТУ с двумя регенеративными отборами пара из турбины

Mathcad-документ с именем H2O.xmcdz, хранящийся «в облаках» по адресу <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ>⁴, содержит множество функций по свойствам воды и водяного пара. В расчете, показанном на рис. 2, используются следующие⁵:

⁴ twt – это английская аббревиатура названия кафедры Технологии воды и топлива, mpei – аббревиатура Московского энергетического института, являющегося академической (ac) организацией России (ru). ТТНВ – аббревиатура четырехтомного справочника (handbook – НВ) по теплоэнергетике и теплотехнике (ТТ),

- SPT – удельная энтропия (S) в однофазной области в зависимости от давления (P) и температуры (T);
- TSP – температура насыщения (S – saturated) зависимости от давления;
- HSWT – удельная энтальпия (H) воды (W) на линии насыщения в зависимости от температуры;
- SSWT – удельная энтропия воды на линии насыщения в зависимости от температуры;
- TPS – температура в однофазной области в зависимости от давления и удельной энтропии;
- HPT – удельная энтальпия в однофазной области в зависимости от давления и температуры;
- HEXPANSIONPTPEFF – удельная энтальпия в конце процесса расширения (EXPANSION) в зависимости от начального давления и температуры, конечного давления и внутреннего относительного КПД процесса (EFF);

Исходными данными для расчета являются такие величины: давление (p_0) и температура (T_0) пара на входе в турбину и давление в конденсаторе (p_k), а также давления отборов (p_1 и p_2). Но список исходных параметров можно увеличить, добавив, например внутренние относительные КПД турбины и насоса (у нас в расчете на рис. 2 они равны единице – рассматривается идеальный процесс расширения пара в турбине). Можно предусмотреть промежуточный перегрев пара и т.д., приблизив тем самым расчет к реальным паротурбинным блокам⁶. Но мы ограничимся расчетом максимального упрощенного варианта.

Подробно описывать расчет термического КПД цикла ПТУ с двумя регенеративными подогревателями не имеет смысла – он дан комментариями на рис. 2. Отметим лишь некоторые детали.

1. Подогреватели у нас *смешивающие*. В них питательная вода, давление которой поднято насосом до давления отбора, подогревается паром из турбины до температуры насыщения при давлении отбора.

2. Доли отбора пара из турбины α_1 и α_2 определяются путем решения системы двух алгебраических уравнений. При этом на рис. 2 сразу дан численный ответ $\alpha_1=11.39\%$, $\alpha_2=27.10\%$.

выпущенном Издательским домом МЭИ. Электронный его вариант с «живыми» таблицами, графиками и формулами размещен по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/tthb.html>.

⁵ Все функции имеют префикс *wsp*. Это аббревиатура пакета программ WaterSteamPro – см. www.wsp.ru, содержащего более 500 функций по свойствам рабочих тел энергетики (вода и водяной пар, дымовые газы и проч. В данной статье описаны только семь («великолепная семерка») из них. Функции запрограммированы на основе формуляции IAPWS-IF97 Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.org), в которой работает один из авторов этой статьи.

⁶ К примеру, на сайте http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/Exp_Steam_K_300_240_LMZ.html размещен один такой реальный расчет – расчет расширения пара в турбине К-300-240.

Эту систему можно отдельно решить аналитически (см. рис. 3) и вставить полученное выражение для α_1 и α_2 в расчет. Это с одной стороны ускорит решение задачи, а с другой – усложнит ее понимание. Компромиссное решение – оператор solve показывать в виде картинки, а операторы $\alpha_1:=$ и $\alpha_2:=$ скрывать в отдельных областях расчета.

$$\left[\begin{array}{l} \alpha_1 \cdot h_1 + (1 - \alpha_1) \cdot h''_{H2} = 1 \cdot h'_{H1} \\ \alpha_2 \cdot h_2 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot h''_{KH} = (1 - \alpha_1) \cdot h'_{H2} \end{array} \right] \text{solve,} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\left(\begin{array}{l} \frac{h'_{H1} - h''_{H2}}{h_1 - h''_{H2}} \quad \frac{h_1 \cdot h'_{H2} - h_1 \cdot h''_{KH} - h'_{H1} \cdot h'_{H2} + h'_{H1} \cdot h''_{KH}}{h_1 \cdot h_2 - h_2 \cdot h''_{H2} - h_1 \cdot h''_{KH} + h''_{H2} \cdot h''_{KH}} \end{array} \right)$$

Рис. 3. Аналитическое решение уравнений балансов энергии в смешивающих регенеративных подогревателях ПТУ

3. Ссылка на «облачный» файл H2O.xmcdz делает видимыми в расчете не только функции по свойствам воды и водяного пара, но и «русские» единицы измерения МПа, кПа, кДж, кг и т.д. Эта особенность инженерного калькулятора Mathcad (работа с физическими величинами, а не просто с числами как в среде Excel, MatLab или в языках программирования) существенно упрощает расчеты, снижает риск ошибок в них [3].

4. В расчете, показанном на рис. 2, у функции с префиксом wsp могут быть аргументы, хранящие не только параметры рабочего тела (вода и водяной пар), но и параметры теплотехнических процессов. Так функция HEXPANTIONPTREFF имеет в качестве одного аргумента значение внутреннего относительного КПД процесса расширения пара в турбине. Мы приняли его равным 100% (идеальный процесс, при котором удельная энтропия не меняется), но этот КПД можно менять, принимать его меньшим 100%. Если в имени функции HEXPANSION заменить букву H на X, то эта функция вернет значение степени сухости пара в конце процесса расширения, если, конечно, там пар окажется влажным.

На рис. 4 показана функция, созданная на основе функций, заложенных в файл H2O.xmcdz, и возвращающая термический КПД нашего простейшего паротурбинного цикла, но без регенеративных отборов пара из турбины. При сравнении рис. 2 и 4 видно, что регенеративный отбор пара из турбины поднимает термический КПД нашего цикла более чем на 3%. Программу, показанную на рис. 2, можно также переделать в функцию, подобную той, которая приведена на рис. 4. У новой функции будут два дополнительных аргумента – давление двух регенеративных отборов. На рис. 5 показано, как у этой функции был найден и отображен графически максимум – значения p_1 и p_2 , при которых термический КПД максимален.

Reference: <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/Н2О.xmcdz>

$$\text{wspEFFsimplePTUPTP}(p_0, T_0, p_1, \eta) := \left. \begin{array}{l} h_0 \leftarrow \text{wspHPT}(p_0, T_0) \\ T_{12} \leftarrow \text{wspTSP}(p_1) \\ h_1 \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_0, T_0, p_1, \eta) \\ h_2 \leftarrow \text{wspHSWT}(T_{12}) \\ s_{23} \leftarrow \text{wspSSWT}(T_{12}) \\ T_3 \leftarrow \text{wspTPS}(p_0, s_{23}) \\ h_3 \leftarrow \text{wspHPT}(p_0, T_3) \\ \frac{(h_0 - h_1) - (h_3 - h_2)}{h_0 - h_3} \end{array} \right|$$

$\text{wspEFFsimplePTUPTP}(13\text{MPa}, 540\text{ }^\circ\text{C}, 4\text{kPa}, 100\%) = 43.84\%$

Рис. 4. Функция, возвращающая термический КПД простейшего паротурбинного цикла (без отборов пара) с учетом внутреннего относительного КПД паровой турбины

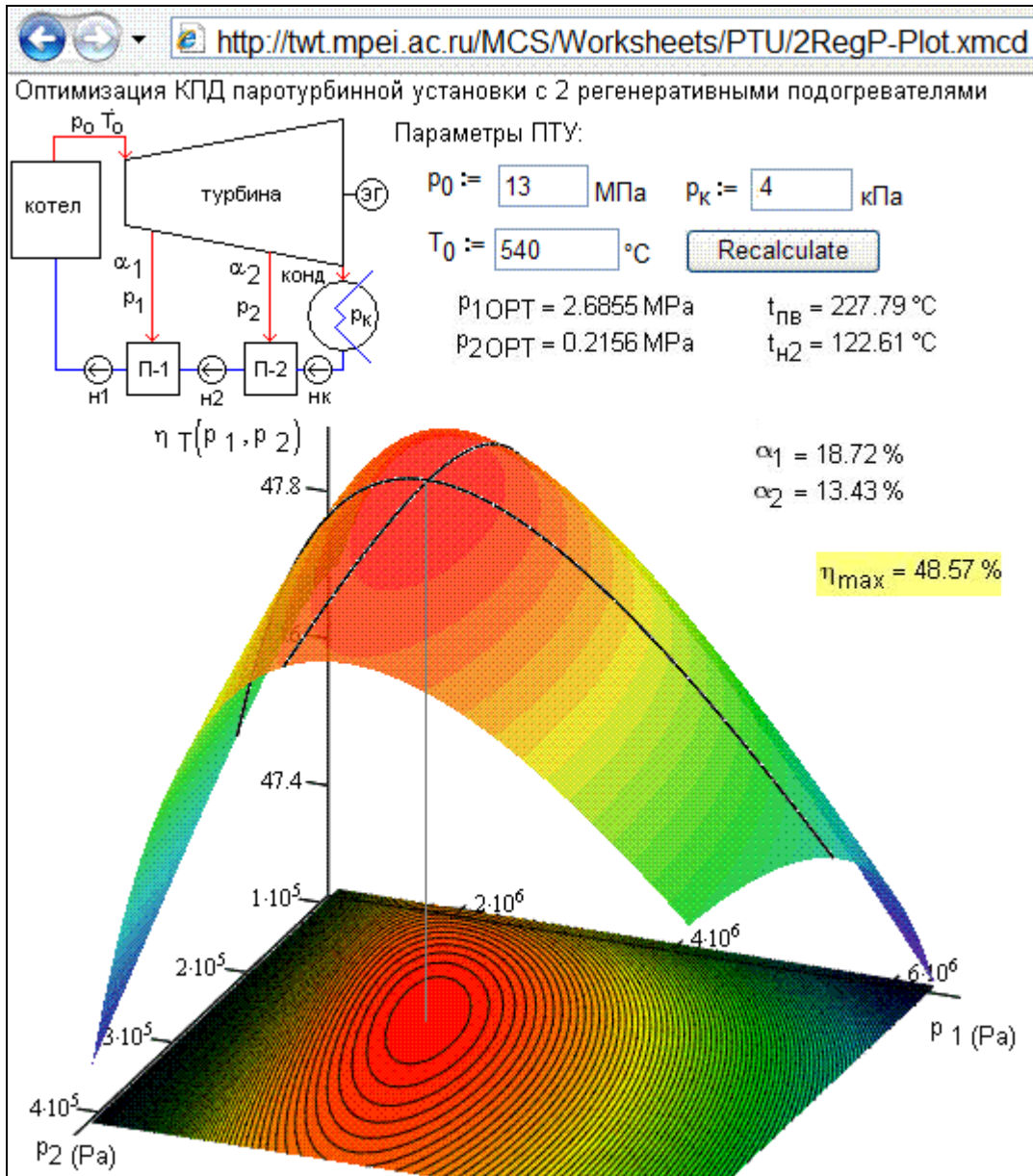


Рис. 5. Оптимизация ПТУ с двумя регенеративными отборами пара из турбины

Использованию облачных функций может мешать одно обстоятельство. Во многих «серьезных» организациях (НИИ, проектные бюро, наладочные фирмы, электростанции и др.) в целях безопасности блокируют или ограничивают выход в Интернет с компьютеров конечных пользователей. Выход в Интернет имеет только системный администратор. Такие организации могут использовать облачные функции так. Скачивать их из «облаков» и размещать на локальном сервере этой организации или на рабочих станциях конечных пользователей. Можно также скачать и прикрепить через механизм DLL к своим рабочим программам (не только к Mathcad, но и к Excel, MatLab, к языкам программирования) все функции с префиксами *wsp* и *wspg* (газы, используемые в ГТУ и ПГУ), зайдя на сайт www.wsp.ru.

Но преимущества работы с облачными функциями неоспоримы. Во-первых, эти функции всегда «свежи» – разработчики их непрерывно оптимизируют, уточняют, расширяют допустимый диапазон их аргументов. Во-вторых, исключаются проблемы, связанные с потерей установленных программ – баз данных при смене компьютера или его операционной системы. Сейчас ведется работа по перемещению самих расчетных программ в «облака». Так, например, «русский Mathcad» – программа SMath (www.smith.info) может работать в Интернете и в режиме on-line.

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://twf.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.

Литература:

1. Александров А.А, Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009 (<http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp>)
2. Очков В.Ф., Утенков В.Ф., Орлов К.А. Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика, № 2, 2000
3. Очков В.Ф. Физические и экономические величины в Mathcad и Maple (Серия «Диалог с компьютером»). М.: Финансы и статистика, 2002 (http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword_book.htm)