

## Этюд 6. Символьная математика и трехмерная графика в теплотехнике

В *этюде 4* мы рассчитали термический КПД простейшего идеального паротурбинного цикла. В *этюде 5* мы показали, как можно учесть "неидеальность" (необратимость) процесса расширения пара в турбине и поднятия давления воды в питательном насосе. Там же мы заодно увидели, как эти процессы можно отобразить на плоском (двумерном) графике. Теперь мы усложним паротурбинную установку: добавим к ней два отбора пара для осуществления регенерации, повышающей КПД энергоустановки.

На рис. 6.1 показан расчет в среде Mathcad термического КПД паротурбинного цикла с двумя регенеративными смешивающими подогревателями.

После ссылки на "облачный" файл и ввода исходных данных (схемы цикла и его параметров) в расчет вводится система двух уравнений материального баланса энтальпии в подогревателях, которое средствами *символьной математики* Mathcad решается относительно неизвестных  $\alpha_1$  (доля пара, отбираемого из турбины в первый подогреватель) и  $\alpha_2$  (доля пара, отбираемого из турбины во второй подогреватель). После такого аналитического решения несложно подсчитать термический КПД цикла (см. рис. 6.1), определяя параметры пара в его ключевых точках и проводя несложные балансные вычисления.

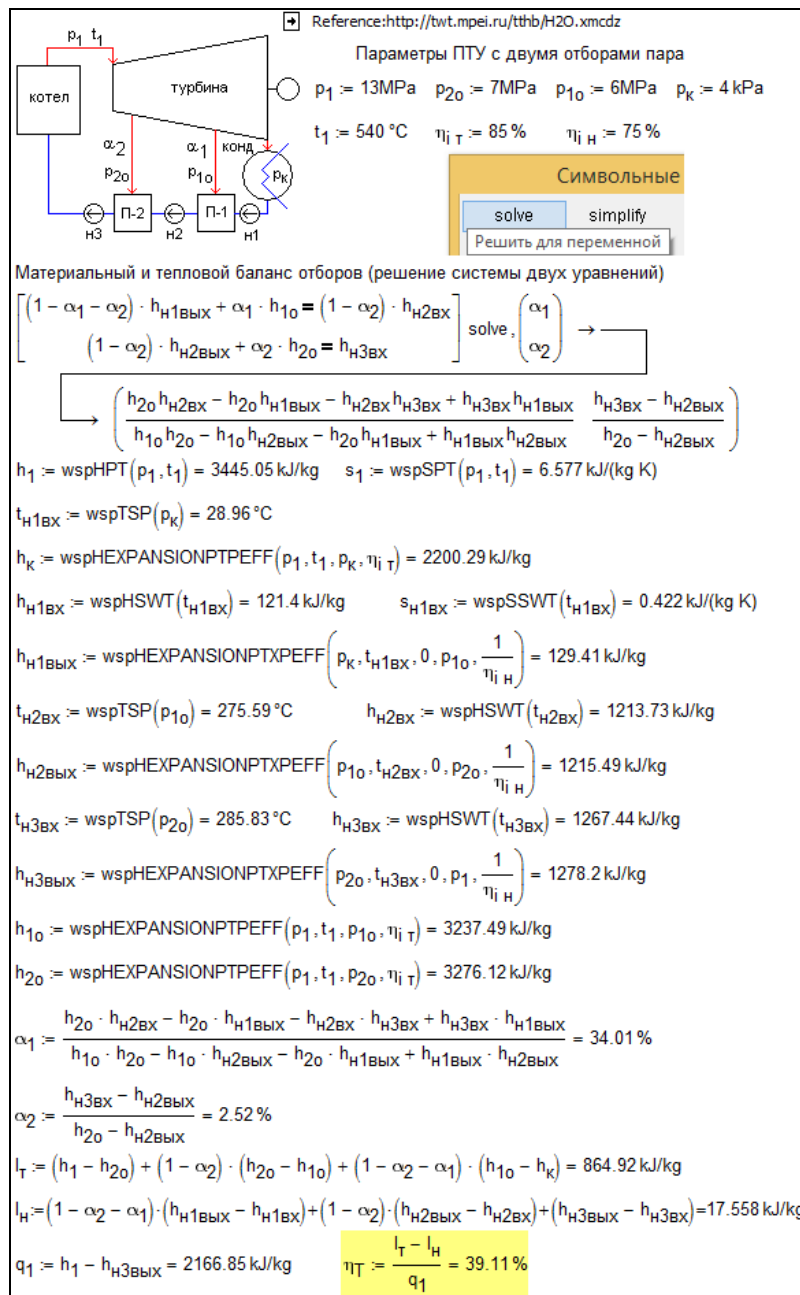


Рис. 6.1. Расчет термического КПД паротурбинного цикла с двумя отборами пара из турбины

Можно вручную менять давление отборов из турбин ( $p_{o1}$  и  $p_{o2}$ ) и наблюдать, как меняется термический КПД цикла. Но можно поручить эту работу компьютеру. Для этого необходимо создать *функцию пользователя*, возвращающую

термический КПД этого цикла в зависимости от его семи исходных параметров, перечисленных в верхней части рис. 6.1. Эта функция показана на рис. 6.2.

```

 $\eta_t(p_1, t_1, p_k, p_{10}, p_{20}, \eta_{i_T}, \eta_{i_H}) :=$  "Расчет КПД паротурбинной установки с
двумя подогревателями"
h1 ← wspHPT(p1, t1)
s1 ← wspSPT(p1, t1)
tн1вх ← wspTSP(pk)
hk ← wspHEXPANSIONPTPEFF(p1, t1, pk, ηi_T)
hн1вх ← wspHSWT(tн1вх)
sн1вх ← wspSSWT(tн1вх)
hн1вых ← wspHEXPANSIONPTXPEFF(pk, tн1вх, 0, p10,  $\frac{1}{\eta_{i_H}}$ )
tн2вх ← wspTSP(p10)
hн2вх ← wspHSWT(tн2вх)
hн2вых ← wspHEXPANSIONPTXPEFF(p10, tн2вх, 0, p20,  $\frac{1}{\eta_{i_H}}$ )
tн3вх ← wspTSP(p20)
hн3вх ← wspHSWT(tн3вх)
hн3вых ← wspHEXPANSIONPTXPEFF(p20, tн3вх, 0, p1,  $\frac{1}{\eta_{i_H}}$ )
h10 ← wspHEXPANSIONPTPEFF(p1, t1, p10, ηi_T)
h20 ← wspHEXPANSIONPTPEFF(p1, t1, p20, ηi_T)
α1 ←  $\frac{h_{20} \cdot h_{н2вх} - h_{20} \cdot h_{н1вых} - h_{н2вх} \cdot h_{н3вх} + h_{н3вх} \cdot h_{н1вых}}{h_{10} \cdot h_{20} - h_{10} \cdot h_{н2вых} - h_{20} \cdot h_{н1вых} + h_{н1вых} \cdot h_{н2вых}}$ 
α2 ←  $\frac{h_{н3вх} - h_{н2вых}}{h_{20} - h_{н2вых}}$ 
lT ← (h1 - h20) + (1 - α2) · (h20 - h10) + (1 - α2 - α1) · (h10 - hk)
lH ← (1 - α2 - α1) · (hн1вых - hн1вх) + (1 - α2) · (hн2вых - hн2вх) + (hн3вых - hн3вх)
q1 ← h1 - hн3вых
return  $\frac{l_T - l_H}{q_1}$ 

```

**Рис. 6.2.** Функция термического КПД паротурбинного цикла с двумя отборами пара из турбины

Выкладки с промежуточными результатами вычислений, показанные на рис. 6.1, можно рассматривать как отладочный этап создания функции пользователя, представленной на рис. 6.2. Так, кстати, мы поступали и в *этиюде 4*. Отлаживать создаваемую функцию можно и другим способом: вставкой после очередного вычислительного оператора функции оператор `return` с операндом очередным подсчитанным значением и вызовом такой незаконченной функции.

В среде Mathcad есть инструменты автоматического изменения аргументов функции, позволяющие принять ей максимальное или минимальное значение вблизи точки первого приближения к решению. На рис. 6.3 показано, как встроенная в Mathcad функция с именем `Maximize` решила нашу оптимизационную задачу о поиске значений давлений отборов из турбины, при которых термический КПД цикла будет максимален.

Reference: <http://twf.mpei.ru/tthb/H2O.xmcdz>

$$p_1 := 13 \text{ MPa} \quad t_1 := 540 \text{ }^\circ\text{C} \quad p_k := 4 \text{ kPa} \quad \eta_{i_T} := 85 \% \quad \eta_{i_H} := 75 \%$$

$$p_{10} := 6 \text{ MPa} \quad p_{20} := 7 \text{ MPa}$$


---


$$\eta_t(p_1, t_1, p_k, p_{10}, p_{20}, \eta_{i_T}, \eta_{i_H}) = 39.105 \%$$

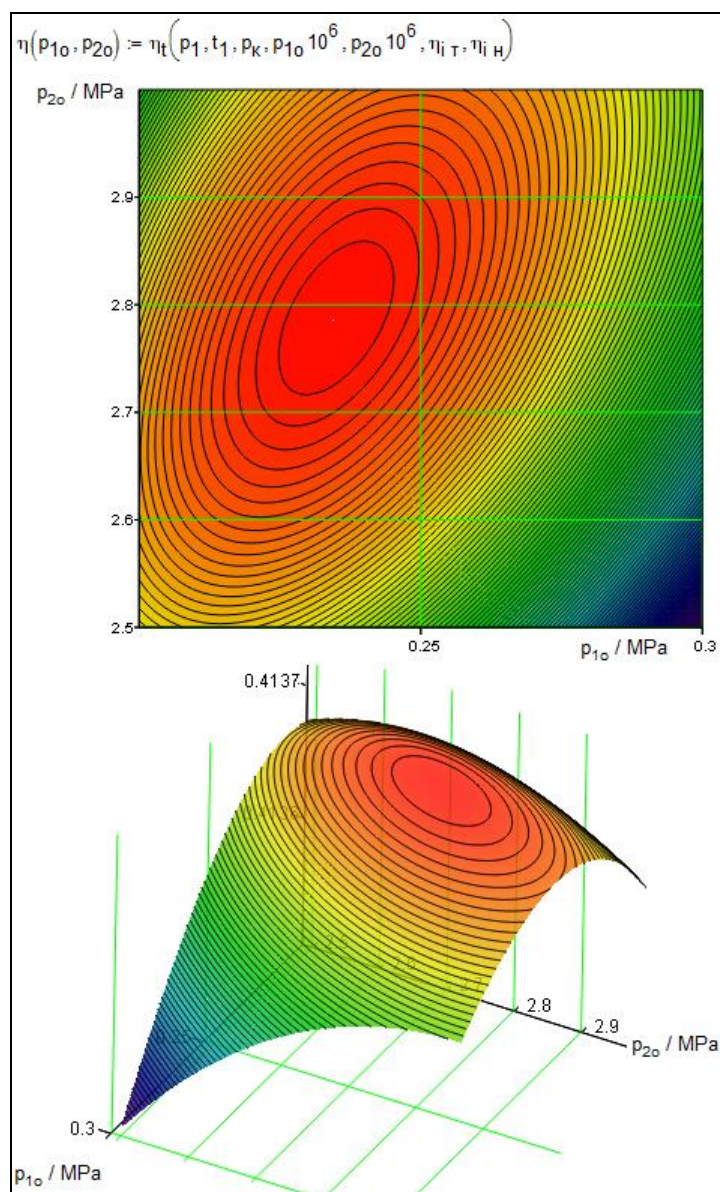
$$\eta(p_{10}, p_{20}) := \eta_t(p_1, t_1, p_k, p_{10}, p_{20}, \eta_{i_T}, \eta_{i_H})$$

$$\begin{pmatrix} p_{1\text{opt}} \\ p_{2\text{opt}} \end{pmatrix} := \text{Maximize}(\eta, p_{10}, p_{20}) = \begin{pmatrix} 0.2348 \\ 2.787 \end{pmatrix} \text{ MPa} \quad \eta_{t\text{Max}} := \eta(p_{1\text{opt}}, p_{2\text{opt}}) = 41.372 \%$$

**Рис. 6.3.** Оптимизация цикла ПТУ с двумя отборами

В свернутой области расчета на рис. 6.3 расположена функция, показанная на рис. 6.2.

На рис. 6.4 показано, как решение нашей оптимизационной задачи проверено с помощью 3D-поверхности и линий одного уровня.



**Рис. 6.4.** Графическая иллюстрация оптимизационной задачи

Решение подобной оптимизационной задачи для цикла паротурбинной установки с одним отбором пара из турбины обычно иллюстрируют графиком зависимости термического КПД цикла от температуры питательной воды.

На рис. 6.5 показана дополнительная функция, созданная на основе функции, представленной на рис. 6.2. С помощью этих двух функций: основной — рис. 6.2 и дополнительной — рис. 6.5 можно построить искомый график и отметить на нем с помощью инструмента трассировки точку максимального термического КПД.

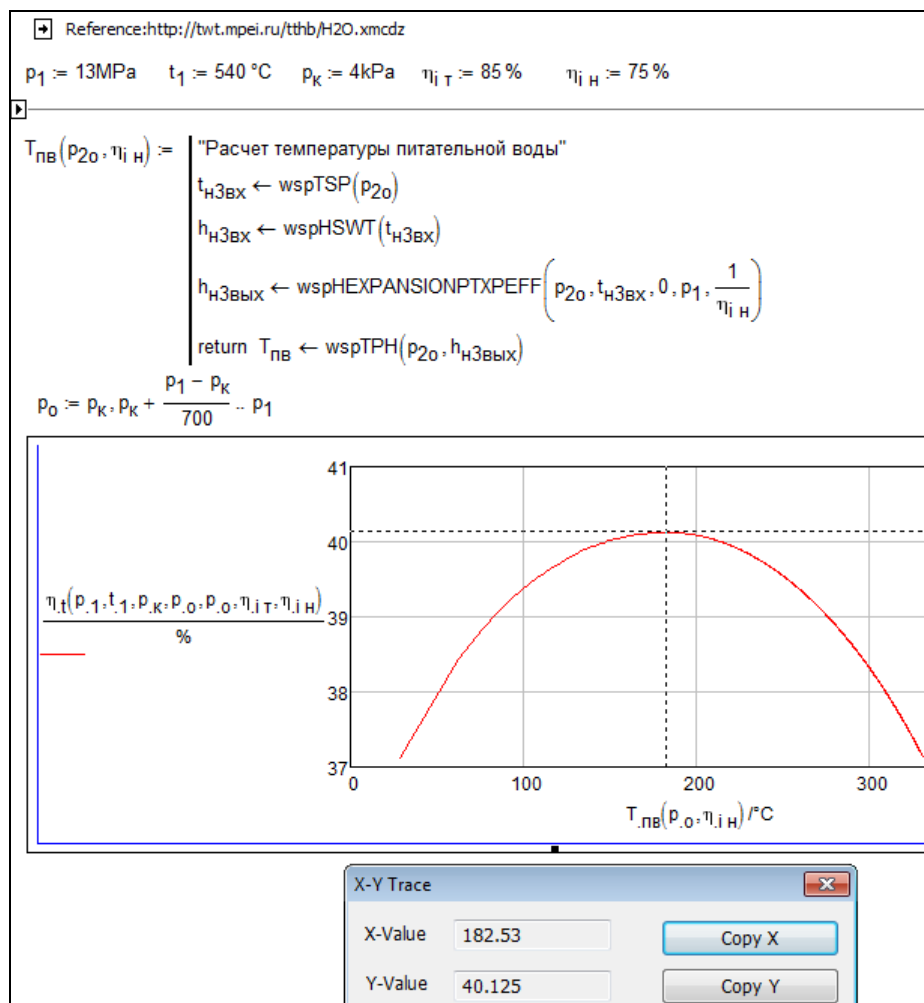


Рис. 6.5. Оптимизация паротурбинного цикла с одним отбором пара

На оси у графика на рис. 6.5 записана функция для двух отборов пара из турбины. Но при  $p_{o1} = p_{o2}$  эта функция пригодна и для случая с одним отбором пара. Сам же график у нас *параметрический*: независимой переменной расчета и оптимизации является давление отбора  $p_o$ , изменяющееся от давления в конденсаторе  $p_k$  до давления острого пара  $p_{o1}$ , но график строится по двум функциям от  $p_o$ .

Из расчетов, показанных в данном этюде, видно, что оптимизированный одиночный отбор пара из турбины на регенерацию повышает термический КПД энергоустановки с 39.11% (см. рис. 6.1) до 40.125% (см. рис. 6.5). Переход к двум регенерационным отборам пара с оптимизацией давлений повышает термический КПД до 41.372% (см. рис. 6.3).

На сайте книги расположены расчеты паротурбинных блоков с тремя и четырьмя регенерационными отборами, выполненными по методике, изложенной выше. На

рис. 6.6 и 6.7 показаны операторы символьного решения уравнений материального и теплового балансов трех и четырех смешивающих подогревателей паротурбинного блока, схема которого представлена на рис. 6.1. Показана только часть решения, т. к. оно слишком длинное и записано в виде матрицы с одной строкой и тремя (на рис. 6.6) или четырьмя (на рис. 6.7) элементами.

$$\left[ \begin{array}{l} (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot h_{н1ввых} + \alpha_1 \cdot h_{10} = (1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot h_{н2вх} \\ (1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot h_{н2ввых} + \alpha_2 \cdot h_{20} = (1 - \alpha_3) h_{н3вх} \\ (1 - \alpha_3) \cdot h_{н3ввых} + \alpha_3 h_{30} = h_{н4вх} \end{array} \right] \text{solve, } \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \rightarrow \left( \frac{h_{20} h_{30}}{h_{10} h_{20}} \dots \right)$$

**Рис. 6.6.** Решение уравнений материального и теплового балансов трех смешивающих подогревателей паротурбинного блока

$$\left[ \begin{array}{l} (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot h_{н1ввых} + \alpha_1 \cdot h_{10} = (1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot h_{н2вх} \\ (1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot h_{н2ввых} + \alpha_2 \cdot h_{20} = (1 - \alpha_3 - \alpha_4) h_{н3вх} \\ (1 - \alpha_3 - \alpha_4) \cdot h_{н3ввых} + \alpha_3 h_{30} = (1 - \alpha_4) h_{н4вх} \\ (1 - \alpha_4) \cdot h_{н4ввых} + \alpha_4 h_{40} = h_{н5вх} \end{array} \right] \text{solve, } \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} \rightarrow \left( \frac{h_2}{h_{10} h_{20} h_{30}} \dots \right)$$

**Рис. 6.7.** Решение уравнений материального и теплового балансов четырех смешивающих подогревателей паротурбинного блока

Там же на сайте <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/tdc.html> можно найти расчет реального паротурбинного блока с восьмью отборами пара в регенеративные подогреватели. На сайте <http://twf.mpei.ru/MCS/Worksheets/PTU/pnd.xmcd> помещен расчет регенеративного подогревателя низкого давления, а на сайте <http://twf.mpei.ru/MCS/Worksheets/PTU/pvd.xmcd> — высокого давления, но не смешивающего (как на ПТУ, показанной на рис. 6.1), а поверхностного типа.

## Литература

1. Очков В. Ф., Орлов К. А. Теплотехнические расчеты: от встроенных функций к облачным // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2014. — № 2. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/IGEU-Prom-1-2.pdf>.