

## Этюд 9. Паротурбинный цикл АЭС

На рисунке. 9.1 показана принципиальная схема паротурбинного блока водо-водяного энергетического реактора АЭС [1]. Вода под давлением из ядерного реактора (первый контур АЭС) подается в парогенератор (ПГ), где отдает тепло вскипающей воде второго контура. Насыщенный водяной пар из парогенератора подается в цилиндр высокого давления (ЦВД) паровой турбины. Часть пара из парогенератора поступает в пароперегреватель (ПП). Выхлоп пара из ЦВД перед его нагревом в перегревателе подвергается частичному осушению в сепараторе (С) за счет удаления из влажного пара части влаги и возвращения ее в контур, минуя цилиндр низкого давления (ЦНД) паровой турбины.

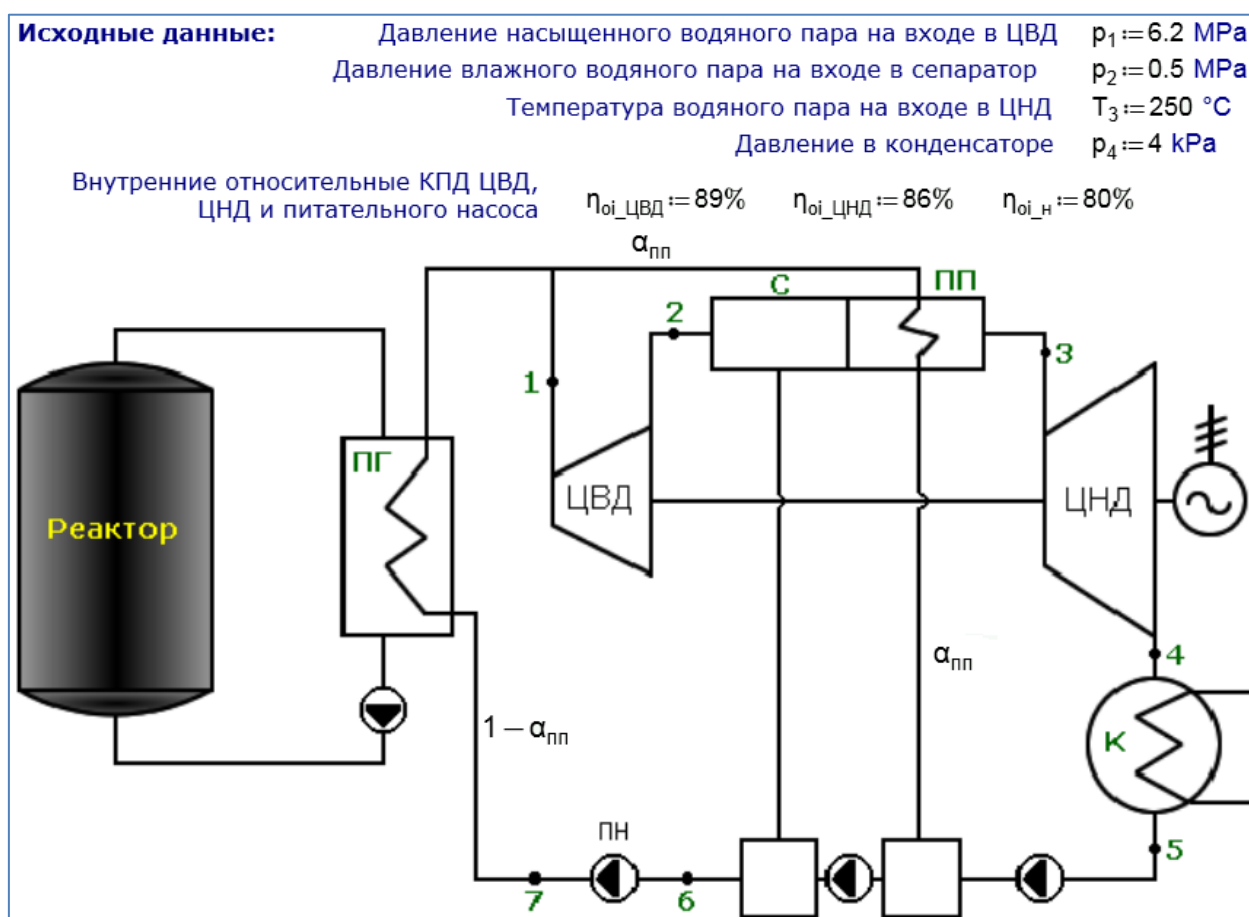


Рис. 9.1. расчет термического КПД паротурбинного блока АЭС: ввод исходных данных и схема блока.

Такое усложнение тепловой схемы паротурбинного цикла АЭС по сравнению с тепловой электростанцией на органическом топливе (см., например, рис. 6.1 в этюде 6) связано со следующей особенностью АЭС. Если насыщенный водяной пар подавать в турбину с давлением в конденсаторе 5—4 кРа, то влажность пара на последних ступенях турбины будет недопустимо высокая. Это может приводить к выходу из строя паровой турбины. Влажность пара на выходе из турбины на АЭС без сепаратора и пароперегревателя можно оценить, обратившись к двум сайтам Интернета [2], показанным на рис. 9.2 и 9.3.

Таблица II. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)  
 (из справочника: Александров А.А, Орлов К.А., Очков В.Ф.  
Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики  
 М.: Издательский дом МЭИ, 2009)

0.001 - 22.064 МПа

p :=  МПа    digits :=     Recalculate

$T_s = 277.734 \text{ }^\circ\text{C}$      $T_{s \text{ max}} = 277.764 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_{s \text{ min}} = 277.705 \text{ }^\circ\text{C}$

$v' = 0.00132579 \text{ m}^3/\text{kg}$      $v'' = 0.0313098 \text{ m}^3/\text{kg}$   
 $\rho' = 754.265 \text{ kg/m}^3$      $\rho'' = 31.9389 \text{ kg/m}^3$

$h' = 1224.86 \text{ kJ/kg}$      $h'' = 2782.33 \text{ kJ/kg}$      $r = 1557.48 \text{ kJ/kg}$   
 $s' = 3.0472 \text{ kJ/(kg K)}$      $s'' = 5.87442 \text{ kJ/(kg K)}$      $s'' - s' = 2.82723 \text{ kJ/(kg K)}$

Рис. 9.2. Сайт Интернета для определения температуры кипения воды в зависимости от давления

Во-первых, по давлению пара перед турбиной (6.2 МПа – см. исходные данные на рис. 9.1) можно определить его температуру, принимая во внимание то, что это насыщенный водяной пар.

Затем необходимо будет зайти на сайт, показанный на рис. 9.3, где можно провести on-line расчет процесса расширения пара в турбине, задав

значения начального давления, начальной температуры, конечного давления и внутреннего относительного КПД процесса.

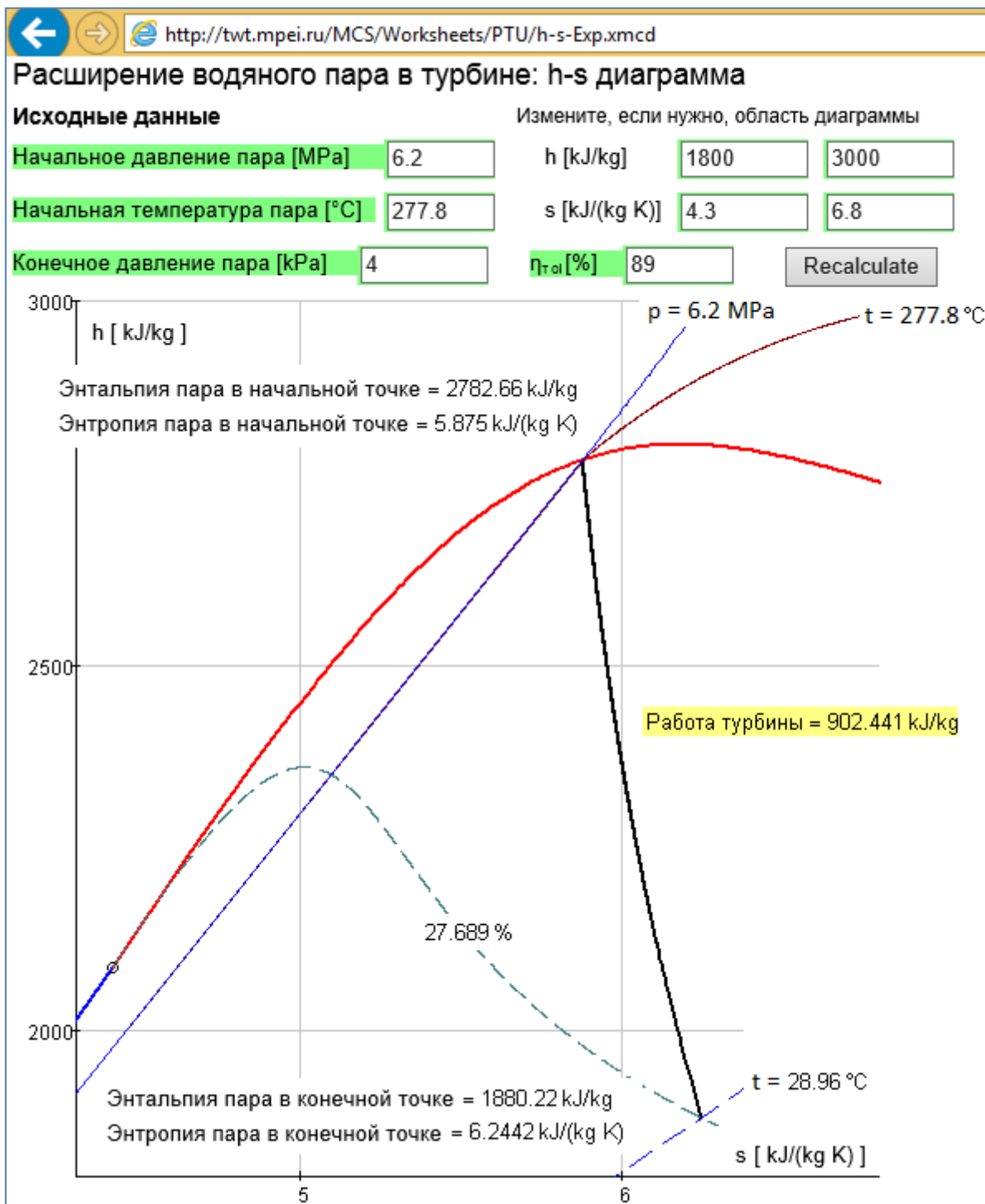


Рис. 9.3. Сайт Интернета для расчета процесса расширения пара в турбине

Примечание. Вид сайта с адресом <http://tw.t.mpei.ru/MCS/Worksheets/PTU/h-s-Exp.xmcd> несколько отличается от того, что отображено на рис. 9.3. Дело в том, что исходный сайт

был скопирован в буфер обмена нажатием клавиши Print Screen, затем перенесен в графический редактор, где из него было убрано лишнее и оставлена только нужная информация.

Из расчета, показанного на рис. 6.3, видно, что влажный водяной пар, расширяясь в турбине от исходного давления 6.2 МПа при давлении в конденсаторе 4 кПа будет почти на треть состоять из влаги, что, как отмеченные выше, недопустимо для последних ступеней турбины, которые при такой влажности пара могут выйти из строя.

Из-за этой особенности данного паротурбинного цикла паровую турбину АЭС разбивают на два цилиндра – цилиндр высокого давления и цилиндр низкого давления, а водяной пар перед подачей в ЦНД осушают в сепараторе и нагревают в паро-паровом подогревателе (перегревателе) за счет тепла свежего пара из парогенератора – см. схему на рис. 9.1.

На рис. 9.4 показан уже нами задействованный сайт по расчету процесса расширения пара в турбине с иным (не 4 кПа, а 0.5 МПа) давлением на выходе из турбины.

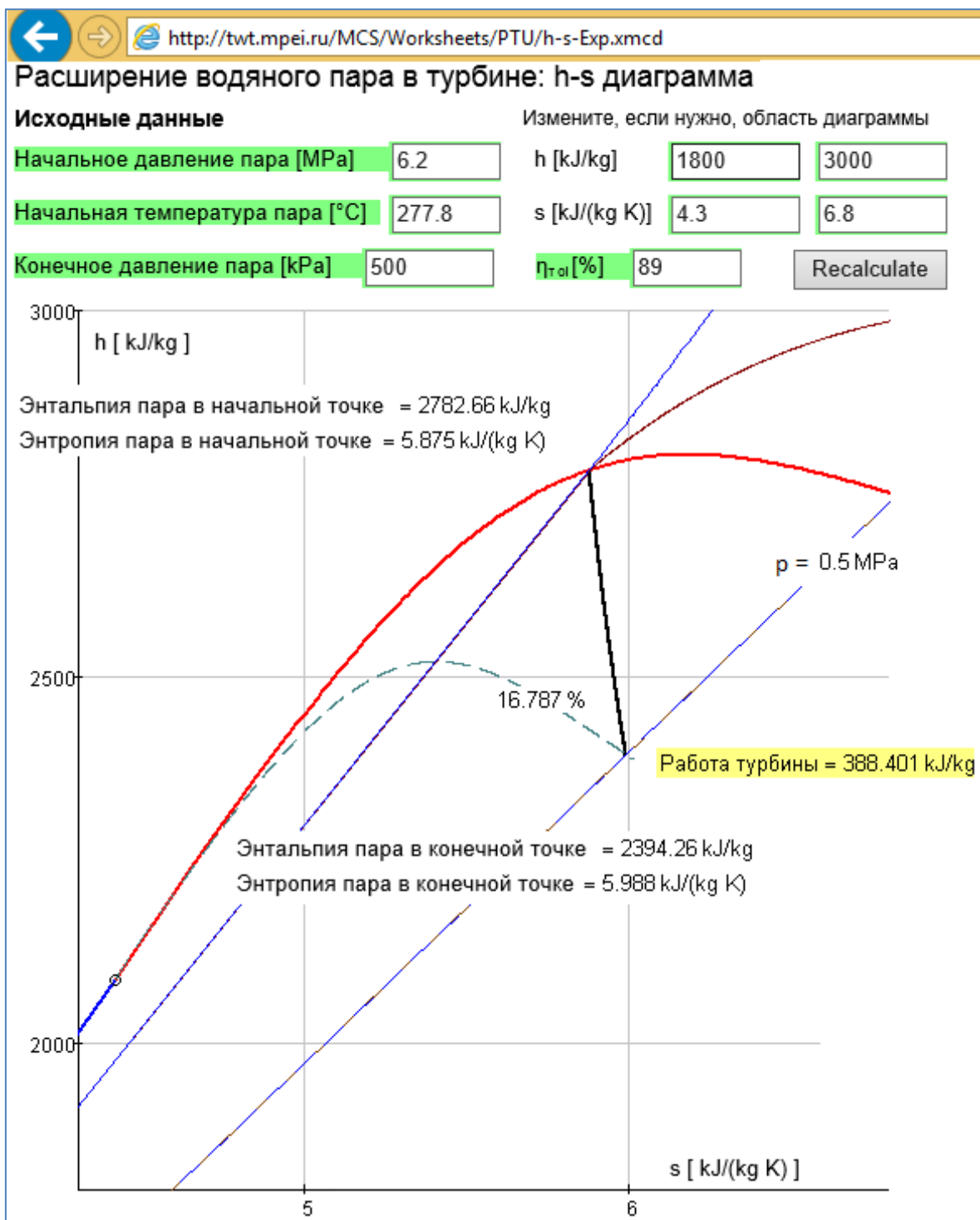


Рис. 9.4. Интернет-диаграмма процесса расширения пара в ЦВД паровой турбины АЭС

Сравнивая рисунки 9.2 и 9.3 можно видеть, что при увеличении давления выхлопа с 5 kPa до 0.5 МПа влажность пара, выходящего из турбины, снизилась с 27.8 % до 16.8 %. Такое значение влажности пара на последних ступенях турбины (16.8 %) вполне допустимо для ее безаварийной работы.

В принципе можно провести «вручную» весь расчет термического КПД паротурбинного цикла АЭС, показанного на рис. 6.1, обращаясь к сайтам, поддерживающим справочник [2] и показанным на рис. 9.2, 9.3 и 9.4. На рис. 6.5 можно видеть процесс расширения водяного пара в ЦНД, после того как этот пар был осушен в сепараторе и перегрет в пароперегревателе. Но мы продолжим расчет в среде Mathcad, начало которого показано на рис. 9.1.

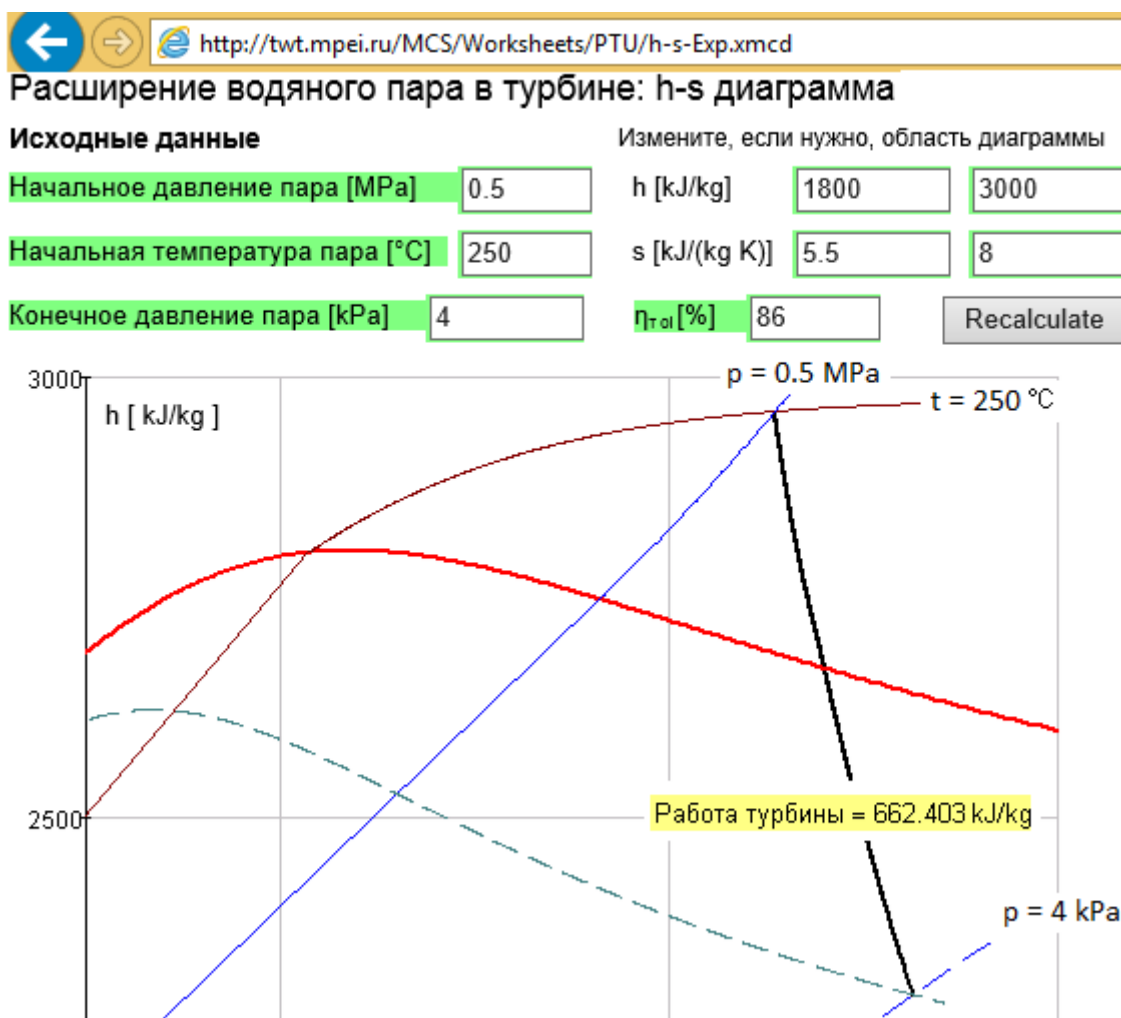


Рис. 9.5 Интернет-диаграмма процесса расширения пара в ЦНД паровой турбины АЭС

Как мы уже отмечали в этюде 2, к программе Mathcad 15 (рис. 2.21) и к программе Mathcad Prime 3 можно прикреплять функции по свойствам воды и водяного пара WaterSteamPro ([www.wsp.ru](http://www.wsp.ru)) через механизм DLL. В среде Mathcad Prime 3 (а именно в этом пакете мы проведем расчет цикла АЭС, начатый на рис. 9.1) несколько изменилась технология работа с этим пакетом

по сравнению с Mathcad 15. В среде Mathcad 15 аргументы функций с суффиксом wsp не могли быть размерными и эти аргументы приходилось лишать размерности – см. рис. 2.24 в этюде 2. В среде Mathcad Prime 3 эта работа (лишение аргументов размерности) проводится автоматически, но функции пакета WaterSteamPro по-прежнему (как и в среде Mathcad 15) выдают безразмерные величины, соответствующие базовым единицам SI: давление в паскалях, а не в мегапаскалях, температура по шкале Кельвина, а не Цельсия и т.д.

Чтобы функции пакета WaterSteamPro правильно работали в среде Mathcad Prime 3 с размерными величинами, их нужно переопределить так, как показано на рис. 9.6.

Область

$$\begin{aligned}
 \text{kJ/kg} &:= \frac{1000 \text{ J}}{\text{kg}} & \text{kJ/(kg\_K)} &:= \frac{1000 \text{ J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & \text{J/kg} &:= \frac{\text{J}}{\text{kg}} & \text{J/(kg\_K)} &:= \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\
 \text{wspTSP}(p) &:= \text{wspTSP}(p) \cdot \text{K} \\
 \text{wspHSST}(T) &:= \text{wspHSST}(T) \cdot \text{J/kg} & \text{wspHSWT}(T) &:= \text{wspHSWT}(T) \cdot \text{J/kg} \\
 \text{wspSSST}(T) &:= \text{wspSSST}(T) \cdot \text{J/(kg\_K)} & \text{wspSSWT}(T) &:= \text{wspSSWT}(T) \cdot \text{J/(kg\_K)} \\
 \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}(p_1, T, x, p_2, \eta) &:= \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}(p_1, T, x, p_2, \eta) \cdot \text{J/kg} \\
 \text{wspHPT}(p, T) &:= \text{wspHPT}(p, T) \cdot \text{J/kg} & \text{wspSPT}(p, T) &:= \text{wspSPT}(p, T) \cdot \text{J/(kg\_K)} \\
 \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_1, T, p_2, \eta) &:= \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_1, T, p_2, \eta) \cdot \text{J/kg}
 \end{aligned}$$

Рис. 9.6. Переопределение функций пакета WaterSteamPro в размерные в среде Mathcad Prime 3

Операторы переопределения функций в Mathcad-документе выделены в отдельную область, которую можно свернуть, щелкнув мышью по «плюсику», показанному в левой верхней части рис. 9.6. На рисунке 9.10 данная область показана в свернутом виде. В данной области кроме того введены пользовательские «однострочные» единицы удельной энтропии и удельной энтальпии. Дополнительно можно ввести контроль размерности аргументов функций пакета WaterSteamPro так, как это показано на рис. 9.7.

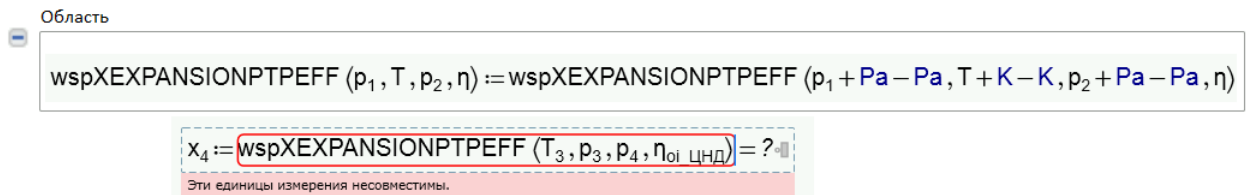


Рис. 9.7. Контроль размерностей аргументов функции пакета WaterSteamPro

Из рисунка 9.7 видно, что вызов функции XEXPANSIONPTPEFF с первыми двумя аргументами, переставленными местами, заканчивается сообщением об ошибке. (Функции XEXPANSIONPTPEFF не было в списке, показанном на рис. 9.6, так как она возвращает безразмерное значение — влажность пара в конце процесса расширения в турбине.)

После того, как функции пакета WaterSteamPro стали видимыми (через DLL) и размерными (через переопределение) несложно в среде Mathcad Prime 3 провести расчет термического КПД паротурбинного цикла АЭС с водяным энергетическим реактором (рис. 9.7), начатый на рис. 9.1.



1. Параметры водяного пара на входе в цилиндр высокого давления (ЦВД)

$$T_1 := \text{wspTSP}(p_1) = 277.7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h_1 := \text{wspHSST}(T_1) = 2782.3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 := \text{wspSSST}(T_1) = 5.874 \text{ kJ/(kg}_\cdot\text{K)} \quad h'_1 := \text{wspHSWT}(T_1) = 1224.9 \text{ kJ/kg}$$

2. Параметры водяного пара на входе в сепаратор (С)

$$T_2 := \text{wspTSP}(p_2) = 151.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h'_2 := \text{wspHSWT}(T_2) = 640.2 \text{ kJ/kg}$$

$$s_2 := s_1 = 5.8744 \text{ kJ/(kg}_\cdot\text{K)} \quad h''_2 := \text{wspHSST}(T_2) = 2748.1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 := \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}(p_1, T_1, 1, p_2, \eta_{oi\_ЦВД}) = 2394.0 \text{ kJ/kg}$$

$$x_2 := \text{wspXEXPANSIONPTXPEFF}(p_1, T_1, 1, p_2, \eta_{oi\_ЦВД}) = 83.2\%$$

3. Параметры водяного пара на входе в цилиндр низкого давления (ЦНД)

$$p_3 := p_2 = 0.5 \text{ МПа} \quad h_3 := \text{wspHPT}(p_3, T_3) = 2961.1 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 := \text{wspSPT}(p_3, T_3) = 7.27 \text{ kJ/(kg}_\cdot\text{K)}$$

4. Параметры водяного пара в конце процесса расширения в ЦНД

$$T_4 := \text{wspTSP}(p_4) = 29 \text{ } ^\circ\text{C} \quad s_4 := s_3 = 7.27 \text{ kJ/(kg}_\cdot\text{K)}$$

$$h_4 := \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi\_ЦНД}) = 2298.7 \text{ kJ/kg}$$

$$x_4 := \text{wspXEXPANSIONPTPEFF}(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi\_ЦНД}) = 89.52\%$$

5. Параметры воды на выходе из конденсатора

$$h_5 := \text{wspHSWT}(T_4) = 121.4 \text{ kJ/kg} \quad s_5 := \text{wspSSWT}(T_4) = 0.42 \text{ kJ/(kg}_\cdot\text{K)}$$

6. Доля сепарации

$$\alpha_{\text{пп}} := x_2 \cdot \frac{h_3 - h''_2}{h_1 - h'_1} = 11.38\%$$

7. Параметры на входе в питательный насос

$$h_6 := \frac{x_2 \cdot h_5 + \alpha_{\text{пп}} \cdot h'_1 + (1 - x_2) \cdot h'_2}{1 + \alpha_{\text{пп}}} = 312.39 \text{ kJ/kg}$$

8. Удельная работа насоса

$$l_{\text{Н}} := 1.1107 \cdot \frac{p_1}{\text{МПа} \cdot \eta_{oi\_н}} \cdot \text{kJ/kg} = 8.61 \text{ kJ/kg}$$

9. Параметры на выходе из питательного насоса

$$h_7 := h_6 + l_{\text{Н}} = 321 \text{ kJ/kg}$$

10. Удельная работа ЦВД

$$l_{\text{ЦВД}} := h_1 - h_2 = 388.3 \text{ kJ/kg}$$

11. Удельная работа ЦНД

$$l_{\text{ЦНД}} := x_2 \cdot (h_3 - h_4) = 551.1 \text{ kJ/kg}$$

12. Термический КПД цикла

$$\eta_{oi} := \frac{l_{\text{ЦВД}} + l_{\text{ЦНД}} - l_{\text{Н}}}{(1 + \alpha_{\text{пп}}) \cdot (h_1 - h_7)} = 33.96\%$$

Рис. 9.8. Расчет термического КПД цикла АЭС

Расчет, показанный на рис. 9.8, не требует особых комментариев и это очень полезное потребительское качество Mathcad, которое мы отмечали во введении и к которому мы еще вернемся в этюде 20.

Дивертисмент.

Определение влажности водяного пара – это сложная теплотехническая задача. Один из способов измерения этого параметра заключается в следующем. Влажный водяной пар с известным давлением (или с известной температурой, а эти параметры связаны двухфазной области – см. рис. 9.2) дросселируют в отдельную камеру, где водяной пар становится однофазным и где можно измерить уже «независимые» температуру и давление. По этим трем замеренным параметрам (давление влажного пара, температура и давление сухого пара после дросселирования) можно оценить влажность исходного пара, обратившись к сайту, показанному на рис. 9.9.

## Дросселирование водяного пара из двухфазной области: $h = \text{const}$

Исходные данные

Начальное давление пара  МПа

Конечная температура пара  °C

Конечное давление пара  МПа

Задайте область диаграммы

$h$    кДж/кг

$s$    кДж/(кг К)

Рассчитанные данные

Энтальпия пара при начальном и конечном давлениях  $h = 2706.5$  кДж/кг

Энтропия влажного пара при начальном давлении  $s_0 = 5.9949$  кДж/(кг К)

Температура влажного пара при начальном давлении  $t_0 = 233.86$  °C

Энтропия пара при конечном давлении  $s_k = 8.4992$  кДж/(кг К)

Удельный объем пара при начальном давлении  $v_0 = 0.06314$  м<sup>3</sup>/кг

Удельный объем пара при конечном давлении  $v_k = 17.66068$  м<sup>3</sup>/кг

Степень сухости пара при начальном давлении  $x_0 = 94.61$  %

$h, s$ -диаграмма дросселирования пара из области влажного пара

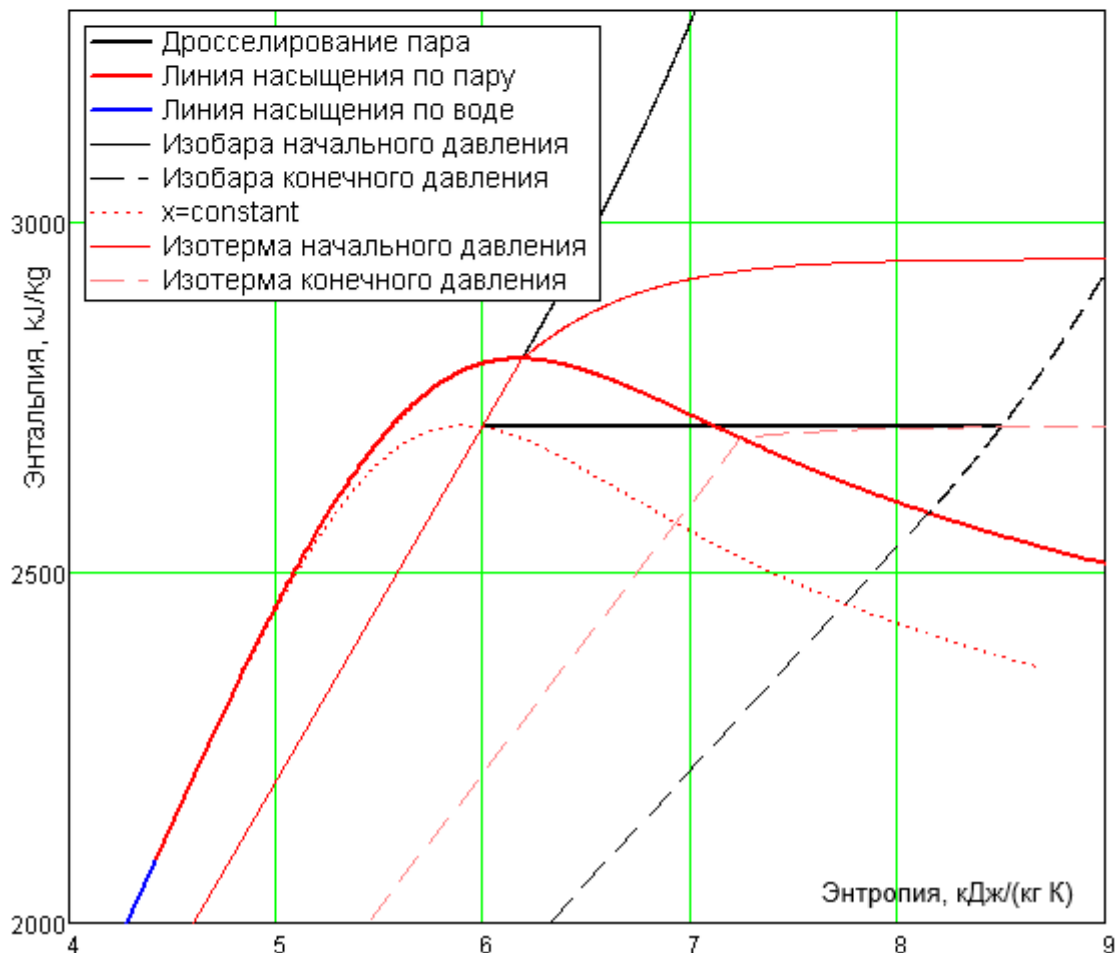


Рис. 9.9. Интернет-расчет процесса дросселирования влажного водяного пара

Расчет, заложенный в сайт, показанный на рис. 9.9, опирается на три функции пакета WaterSteamPro:

-  $wspHPT$  — удельная энтальпия в зависимости от давления и температуры;

-  $wspTSP$  — температура насыщения в зависимости от давления;

-  $wspXSTH$  — влажность пара в зависимости от температуры и удельной энтальпии.

На рисунке 9.10 показан соответствующий расчет в среде Mathcad Prime 3.

$p_1 := 3 \text{ MPa}$        $p_2 := 10 \text{ kPa}$        $t_2 := 110 \text{ °C}$

$h_2 := wspHPT(p_2, t_2) = 2706.5 \text{ kJ/kg}$

$h_1 := h_2$        $t_1 := wspTSP(p_1) = 233.86 \text{ °C}$        $x_1 := wspXSTH(t_1, h_1) = 94.61\%$

Рис. 9.10. Расчет влажности пара в среде Mathcad Prime 3

#### Литература

1. **Зорин В.М.** Атомные электростанции. Основной технологический процесс. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 304 с.
2. **Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф.** Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: интернет-справочник. М.: Издательский дом МЭИ. 2009 (<http://twt.mpei.ac.ru/rbtp>)