

Паротурбинный цикл АЭС

или

Считаем снизу вверх

На занятии с 5 по 7 мая мы узнали о том, что когда-то были экзотические бестопочные паровозы и воздуховозы, применявшиеся на взрыво- и пожароопасных производствах. Планировалось поставить на рельсы ещё более экзотические локомотивы – атомовозы с ядерными энергоустановками – см. рис. 1.



Рис. 1 Схема атомовоза

На железных дорогах атомные поезда так и не появились, а вот атомные электростанции успешно работают. Правда, темп их развития резко снизился после ряда критических катастроф – Три Майл Айленд, Чернобыль, Фукусима... Тем не менее, в эксплуатацию по-прежнему вводятся не только стационарные, но и передвижные АЭС. Правда, не на колесах (рис. 1), а в виде гражданских судов и военных кораблей с ядерной энергетической установкой. Появились и атомные электростанции, установленные на специальных баржах – плавучие атомные теплоэлектростанция (ПАТЭС), схематичный разрез одной из которых показан на рис. 2.



Рис. 2 Компоновка плавучей атомной теплоэлектростанции

А давайте оценим КПД типичной ядерной энергетической установки, которая могла бы быть установлена и на локомотиве (рис. 1), и на барже. И применим при этом несколько экзотический способ расчета: не сверху вниз (так мы поступали ранее), а снизу вверх.

На рисунке. 3 показана принципиальная схема паротурбинного блока ВВЭР – водородного энергетического реактора АЭС [2].

Нагретая вода под давлением из ядерного реактора (Р – первый контур АЭС) подается в парогенератор (ПГ), где отдает тепло вскипающей воде второго контура. На рисунке 2 можно видеть контур реактора, справа и слева от которого установлены парогенераторы вертикального типа. Насыщенный водяной пар из парогенератора подается в цилиндр высокого давления (ЦВД) паровой турбины. Часть пара из парогенератора с долей $\alpha_{пп}$ поступает в пароперегреватель (ПП). Выхлоп пара из ЦВД перед его нагревом в пароперегревателе подвергается осушению в сепараторе (С) за счет удаления из пара влаги и возвращения её контур, минуя ЦВД. Без таких усложнений схемы паротурбинного блока (цикла Ренкина) влажность пара на последних ступенях турбины была бы недопустимо высокой, что будет показано на диаграммах ниже.

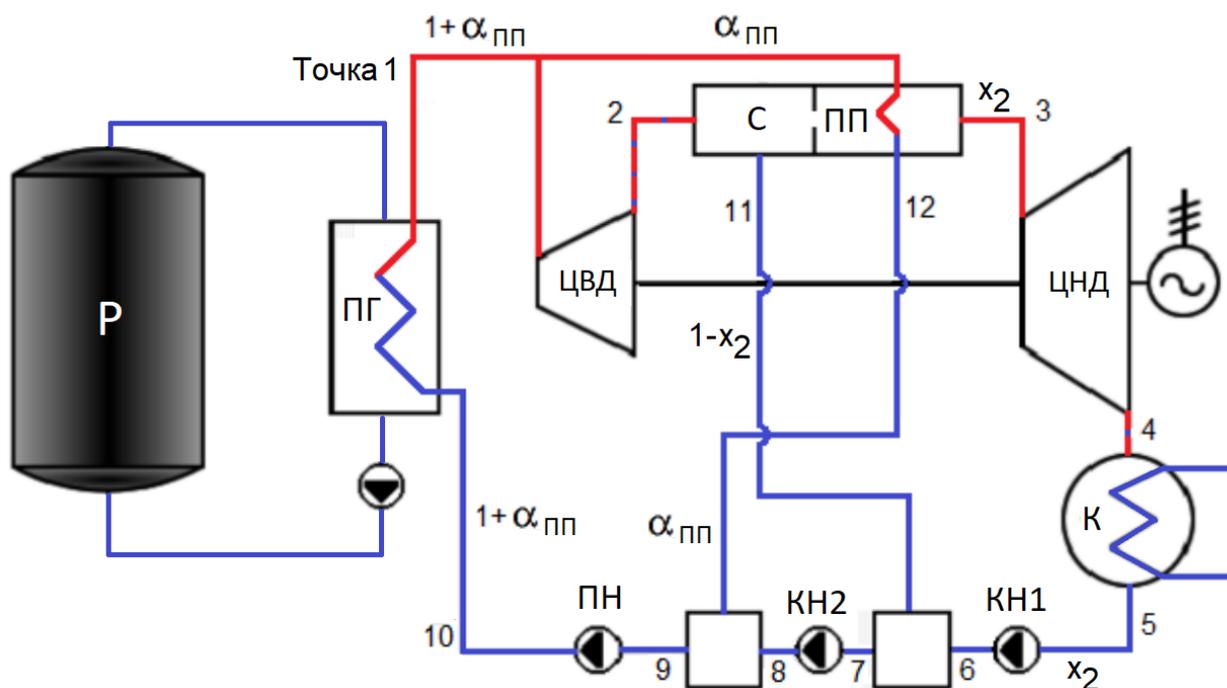


Рис. 3 Схема паротурбинного блока АЭС с ВВЭР, принятая к расчету

На рисунке 4 показан ввод исходных данных – известных (входных) параметров для расчета термического КПД энергоблока (η_T) – отношение полезной работы к подведенному теплу.

$$\begin{aligned}
 p_1 &:= 6.2 \text{ МПа} & \eta_{oi_ЦВД} &:= 89 \% \\
 p_2 &:= 0.5 \text{ МПа} & \eta_{oi_ЦНД} &:= 86 \% \\
 p_4 &:= 4 \text{ кПа} & \eta_{oi_Н} &:= 80 \% \\
 T_3 &:= 250 \text{ }^\circ\text{C} & \alpha_{ПП} &:= 11 \% \\
 & & wf &:= \text{"H2O"} \\
 p_{10} &:= (1 + 5 \%) \cdot p_1 = 6.510 \text{ МПа}
 \end{aligned}$$

Рис. 4 Исходные данные для расчета термического КПД цикла АЭС с ВВЭР

На рисунке 5 показаны вспомогательные функции пользователя, возвращающие удельную энтальпию рабочего тела (воды и водяного пара) на выходе из турбины или насоса. Учитывается тот факт, что входящий в турбину пар или входящая в насос вода могут находиться, либо не находиться в состоянии насыщения. Поэтому у функций пользователя, показанных на рис. 14.4, либо три, либо четыре аргумента. Трехаргументные функции будут вызываться тогда, когда рабочее тело на входе в турбину или в насос находится на линии насыщения. Функции на рис. 5 – это аналоги функций `wspNEXPANSIONPTPEFF` и `wspNEXPANSIONPTXPEFF` с четырьмя или пятью

аргументами авторского пакета WaterSteamPro, который наряду с пакетом CoolProp Wrapper используется для решения задач этого учебного пособия.

□ — функции пользователя

$$\begin{aligned}
 h_{ExpansionPPEFF}(P_0, P_1, \eta) &:= \begin{cases} \text{"Расширение пара в ЦВД"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_0, \text{"Q"}, 1, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, P_0, \text{"Q"}, 1, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 - (h_0 - h_1) \cdot \eta \end{cases} \\
 h_{ExpansionPTPEFF}(P_0, T_0, P_1, \eta) &:= \begin{cases} \text{"Расширение пара в ЦНД"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_0, \text{"T"}, T_0, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, P_0, \text{"Q"}, 1, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 - (h_0 - h_1) \cdot \eta \end{cases} \\
 h_{CompressionPPEFF}(P_0, P_1, \eta) &:= \begin{cases} \text{"Сжатие воды в КН1"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_0, \text{"Q"}, 0, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, P_0, \text{"Q"}, 0, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 + \frac{h_1 - h_0}{\eta} \end{cases} \\
 h_{CompressionPTPEFF}(P_0, T_0, P_1, \eta) &:= \begin{cases} \text{"Сжатие воды в КН2 и ПН"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_0, \text{"T"}, T_0, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, P_0, \text{"T"}, T_0, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 + \frac{h_1 - h_0}{\eta} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Рис. 5 Вспомогательные функции

Читателя может смутить тот факт, что у функции пользователя с именем $h_{expansionPPEFF}$ первый аргумент имеет имя p_0 , в то время как на рис. 3 и 4 вход в паровую турбину обозначен цифрой 1. Дело в том, что аргументы функций на рис. 5 являются формальными параметрами и никак не связаны со схемой установки, в расчете которой они участвуют. Давление p_0 — это *начальное* давление и в паровой турбине (две первые функции на рис. 5), и в насосе (последние две функции), а давление p_1 — это *конечное* давление и в паровой турбине (две первые функции на рис. 5), и в насосе (последние две функции).

Расчет, как и обещано, будет вестись не сверху вниз, а снизу вверх. Что это такое?!

Из рисунка 6 видно, что пользователь после задания исходных данных (рис. 4) и определения функций пользователя (рис. 5) сразу ввел итоговую формулу для расчёта термического КПД (отношения полезной работы – работы двух цилиндров турбины за вычетом работы трех насосов – к подведенному теплу) и получил не численный ответ, а сообщение об ошибке – удельная работа цилиндра высокого давления $l_{цвд}$ ещё не определена (ещё не подсчитана).

$$\eta_T := \frac{l_{цвд} + l_{цнд} - l_{кн1} - l_{кн2} - l_{пн}}{q_{пг}} = \blacksquare \blacksquare$$

$l_{цвд}$ - неопределено.

Рис. 6 Начало расчета

Чтобы исправить эту ошибку, выше формулы¹, показанной на рис. 6, вводится формула для расчета $l_{цвд}$. Возникает новая аналогичная ошибка, которую исправляют аналогичным методом – см. рис. 7-

$$l_{цвд} := 1 \cdot (h_1 - h_2) = \blacksquare \blacksquare$$

h_1 - неопределено.

$$\eta_T := \frac{l_{цвд} + l_{цнд} - l_{кн1} - l_{кн2} - l_{пн}}{q_{пг}} = \blacksquare$$

Рис. 7 Продолжение расчёта, показанного на рис. 6

$$h_1 := \text{CoolProp_Props} ("H", "P", p_1, "Q", 1, wf) = 2782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{цвд} := 1 \cdot (h_1 - h_2) = \blacksquare$$

$$\eta_T := \frac{l_{цвд} + l_{цнд} - l_{кн1} - l_{кн2} - l_{пн}}{q_{пг}} = \blacksquare$$

¹ В формуле для расчета удельной работы цилиндра высокого давления на рис. 8 присутствует единица, которую можно спутать с латинской прописной буквой эль. Отличаются они шрифтом – прямым и курсивом.

Рис. 8 Продолжение расчёта, показанного на рис. 7

$$h_2 := h_{ExpansionPPEFF} (P_1, P_2, \eta_{oi_ЦВД}) = 2394 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 := CoolProp_Props ("H", "P", P_1, "Q", 1, wf) = 2782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{ЦВД} := 1 \cdot (h_1 - h_2) = 388.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_T := \frac{l_{ЦВД} + l_{ЦНД} - l_{КН1} - l_{КН2} - l_{ПН}}{q_{ПГ}} = \blacksquare \blacksquare$$

l.ЦНД - неопределено.

Рис. 9 Продолжение расчёта, показанного на рис. 8

Из рисунка 9 видно, что на данном этапе расчёта нужно будет определить удельную работу цилиндра низкого давления, наращивая всё новые и новые операторы не в конце, а в начале расчёта. Почему в начале расчёта, а не в конце? Дело в том, что оператор := (ввод значения переменной) делает её видимой справа и ниже места ввода. Но не выше! Переменную в среде SMath можно сделать глобальной, т.е. видимой во всём расчётном документе, если предварить её имя тильдой (символом с ASCII кодом 126) – см. рис. 10 и пункт 3 задания читателям.

$a = \blacksquare \blacksquare$	$\sim a = 1$	$\pi = 3.142$
a - неопределено.		
$a := 1$	$\sim a := 1$	
$a = 1$	$\sim a = 1$	$e = 2.718$

Рис. 10 ввод в расчет глобальной переменной

Следуя запросам расчёта – следя за красной подсветкой не заданных переменных, отображенных на рис. 6-9, и проводя в некоторых местах перестановку расчётных операторов, можно в конце концов получить итоговый расчёт, показанный на рис. 11, с итоговой формулой внизу.

$$P_6 := P_2$$

$$P_5 := P_4$$

$$h_6 := h_{\text{CompressionPPEFF}}(P_5, P_6, \eta_{oi_H}) = 122.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 := h_{\text{ExpansionPPEFF}}(P_1, P_2, \eta_{oi_ЦВД}) = 2394 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_2 := \text{CoolProp_Props}(\text{"Q"}, \text{"P"}, P_2, \text{"H"}, h_2, wf) = 83.20 \%$$

$$h_{11} := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_2, \text{"Q"}, 0, wf) = 640.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_7 := x_2 \cdot h_6 + (1 - x_2) \cdot h_{11} = 209.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_7 := P_2$$

$$T_7 := \text{CoolProp_Props}(\text{"T"}, \text{"P"}, P_7, \text{"H"}, h_7, wf) = 49.83 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_8 := P_1$$

$$h_8 := h_{\text{CompressionPTPEFF}}(P_7, T_7, P_8, \eta_{oi_H}) = 216.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_3 := P_2$$

$$h_3 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_3, \text{"T"}, T_3, wf) = 2961 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_1, \text{"Q"}, 1, wf) = 2782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{12} := \frac{1 \cdot h_2 + \alpha_{III} \cdot h_1 - (1 - x_2) \cdot h_{11} - x_2 \cdot h_3}{\alpha_{III}} = 1172 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_9 := \frac{\alpha_{III} \cdot h_{12} + 1 \cdot h_8}{1 + \alpha_{III}} = 310.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_9 := \text{CoolProp_Props}(\text{"T"}, \text{"P"}, P_{10}, \text{"H"}, h_9, wf) = 73.01 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{10} := h_{\text{CompressionPTPEFF}}(P_1, T_9, P_{10}, \eta_{oi_H}) = 311.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{III} := (1 + \alpha_{III}) \cdot (h_1 - h_{10}) = 2743 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 := h_{\text{ExpansionPPEFF}}(P_1, P_2, \eta_{oi_ЦВД}) = 2394 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{III} := (1 + \alpha_{III}) \cdot (h_{10} - h_9) = 0.1604 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{KH2} := 1 \cdot (h_8 - h_7) = 7.201 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_5 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, P_4, \text{"Q"}, 0, wf) = 121.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{KH1} := x_2 \cdot (h_6 - h_5) = 0.5179 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 := h_{\text{ExpansionPTPEFF}}(P_3, T_3, P_4, \eta_{oi_ЦНД}) = 2181 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{ЦНД} := x_2 \cdot (h_3 - h_4) = 648.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{ЦВД} := 1 \cdot (h_1 - h_2) = 388.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_T := \frac{l_{ЦВД} + l_{ЦНД} - l_{KH1} - l_{KH2} - l_{III}}{q_{III}} = 37.52 \%$$

Рис. 11 Итоговый расчет с искомым ответом

Операторы, показанные на рис. 11, можно не писать отдельно, а объединить в программный блок через команду панели программирования Line и последующие запятые, расширяющие блок. Получится то, что показано на рис. 10.13а. Недостаток такой записи в том, что нельзя выводить «на печать» значения, подсчитанные по отдельным операторам прямо в программном блоке – можно видеть только итоговый ответ и выводить значения переменных вне блока. Зато преимуществ такой записи по крайней мере две. Первое заключается в том, что при выделении курсором имени переменной или функции это имя подсвечивается во всём расчёте – см. переменную x_2 на рис. 12, которая подсвечена семь раз. Второе же преимущество такое – расчёт очень просто преобразовать в функцию и работать уже с ней – см. рис. 13 с графиком зависимости КПД от температуры T_3 .

$$\begin{aligned}
 p_6 &:= p_2 && = 37.52 \% \\
 p_5 &:= p_4 \\
 h_6 &:= h_{\text{CompressionPPEFF}}(p_5, p_6, \eta_{oi_H}) \\
 h_2 &:= h_{\text{ExpansionPPEFF}}(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}) \\
 x_2 &:= \text{CoolProp_Props}("Q", "P", p_2, "H", h_2, wf) \\
 h_{11} &:= \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_2, "Q", 0, wf) \\
 h_7 &:= x_2 \cdot h_6 + (1 - x_2) \cdot h_{11} \\
 p_7 &:= p_2 \\
 T_7 &:= \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_7, "H", h_7, wf) \\
 p_8 &:= p_1 \\
 h_8 &:= h_{\text{CompressionPTPEFF}}(p_7, T_7, p_8, \eta_{oi_H}) \\
 p_3 &:= p_2 \\
 h_3 &:= \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_3, "T", T_3, wf) \\
 h_1 &:= \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_1, "Q", 1, wf) \\
 h_{12} &:= \frac{1 \cdot h_2 + \alpha_{III} \cdot h_1 - (1 - x_2) \cdot h_{11} - x_2 \cdot h_3}{\alpha_{III}} \\
 h_9 &:= \frac{\alpha_{III} \cdot h_{12} + 1 \cdot h_8}{1 + \alpha_{III}} \\
 T_9 &:= \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_{10}, "H", h_9, wf) \\
 h_{10} &:= h_{\text{CompressionPTPEFF}}(p_1, T_9, p_{10}, \eta_{oi_H}) \\
 q_{III} &:= (1 + \alpha_{III}) \cdot (h_1 - h_{10}) \\
 h_2 &:= h_{\text{ExpansionPPEFF}}(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}) \\
 l_{III} &:= (1 + \alpha_{III}) \cdot (h_{10} - h_9) \\
 l_{KH2} &:= 1 \cdot (h_8 - h_7) \\
 h_5 &:= \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_4, "Q", 0, wf) \\
 l_{KH1} &:= x_2 \cdot (h_6 - h_5) \\
 h_4 &:= h_{\text{ExpansionPTPEFF}}(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi_ЦНД}) \\
 l_{ЦНД} &:= x_2 \cdot (h_3 - h_4) \\
 l_{ЦВД} &:= 1 \cdot (h_1 - h_2) \\
 \eta_T &:= \frac{l_{ЦВД} + l_{ЦНД} - l_{KH1} - l_{KH2} - l_{III}}{q_{III}}
 \end{aligned}$$

Рис. 12 Итоговый расчет с искомым ответом

$$\eta_T(T_3) := \left| \begin{array}{l} p_6 := p_2 \\ p_5 := p_4 \\ h_6 := h_{\text{CompressionPPEFF}}(p_5, p_6, \eta_{oi_H}) \\ \hline l_{\text{ЦНД}} := x_2 \cdot (h_3 - h_4) \\ l_{\text{ЦВД}} := 1 \cdot (h_1 - h_2) \\ \frac{l_{\text{ЦВД}} + l_{\text{ЦНД}} - l_{\text{КН1}} - l_{\text{КН2}} - l_{\text{ПН}}}{Q_{\text{ПГ}}} \end{array} \right.$$

$$\eta_T(250 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.3752 \quad T_3 := [(200 \text{ } ^\circ\text{C}), 201 \text{ } ^\circ\text{C}..(300 \text{ } ^\circ\text{C})]$$

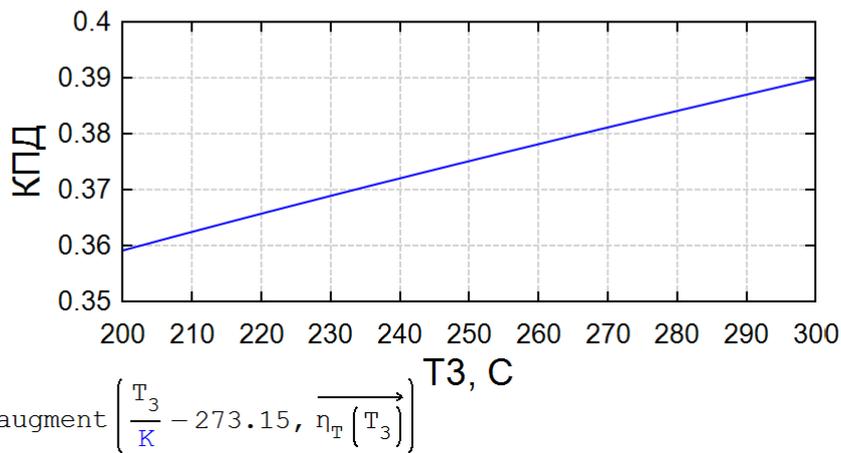


Рис. 13 Превращение программы в функцию

Традиционно мы заканчиваем расчёт термодинамического цикла АЭС с ВВЭР построением диаграмм – см. рис. 14, 16-13-15.

На рисунке 14 показано формирование векторов с именами T_{Sat} , s_{Sat} , h_{Sat} , s_p , h_{p2} и других для построения графиков (диаграмм). Некоторые векторы создаются через оператор задания арифметической прогрессии [■, ■..■] – первое значение, второе значение и последнее значение². Другие же векторы создаются через вызов функций с оператором векторизации – стрелочка вправо над именем функции и её аргументами.

² От последнего значения вектора T_{Sat} отняли одну десятитысячную кельвина. На график это никак не повлияло, но позволило избежать ошибки при заполнении векторов s_{Sat} и h_{Sat} – удельной энтропии и удельной энтальпии насыщенного водяного пара.

$$T_{cr} := \text{CoolProp_Props}(\text{"Tcrit"}, \text{""}, 0, \text{""}, 1, wf) = 373.95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{tr} := \text{CoolProp_Props}(\text{"Ttriple"}, \text{""}, 0, \text{""}, 1, wf) = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{sat} := \left[T_{tr}, T_{tr} + \frac{T_{cr} - 0.0001 \text{ K} - T_{tr}}{1000} \dots (T_{cr} - 0.0001 \text{ K}) \right]$$

$$s_{sat} := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"T"}, T_{sat}, \text{"Q"}, 1, wf)$$

$$h_{sat} := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"T"}, T_{sat}, \text{"Q"}, 1, wf)$$

$$s_p := \left[\left(5.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left(5.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \dots \left(7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right]$$

$$h_{p2} := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"S"}, s_p, \text{"P"}, p_2, wf)$$

$$p_{12} := \left[p_1, p_1 - \frac{p_1 - p_2}{300} \dots p_2 \right]$$

$$h_{12} := h_{\text{ExpansionPPEFF}}(p_1, p_{12}, \eta_{oi_ЦВД})$$

$$s_{12} := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, p_{12}, \text{"H"}, h_{12}, wf)$$

$$p_{34} := \left[p_3, p_3 - \frac{p_3 - p_4}{300} \dots p_4 \right]$$

$$h_{34} := h_{\text{ExpansionPTPEFF}}(p_3, T_3, p_{34}, \eta_{oi_ЦВД})$$

$$s_{34} := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, p_{34}, \text{"H"}, h_{34}, wf)$$

$$h_{x2} := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"Q"}, x_2, \text{"T"}, T_{sat}, wf)$$

$$s_{x2} := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"Q"}, x_2, \text{"T"}, T_{sat}, wf)$$

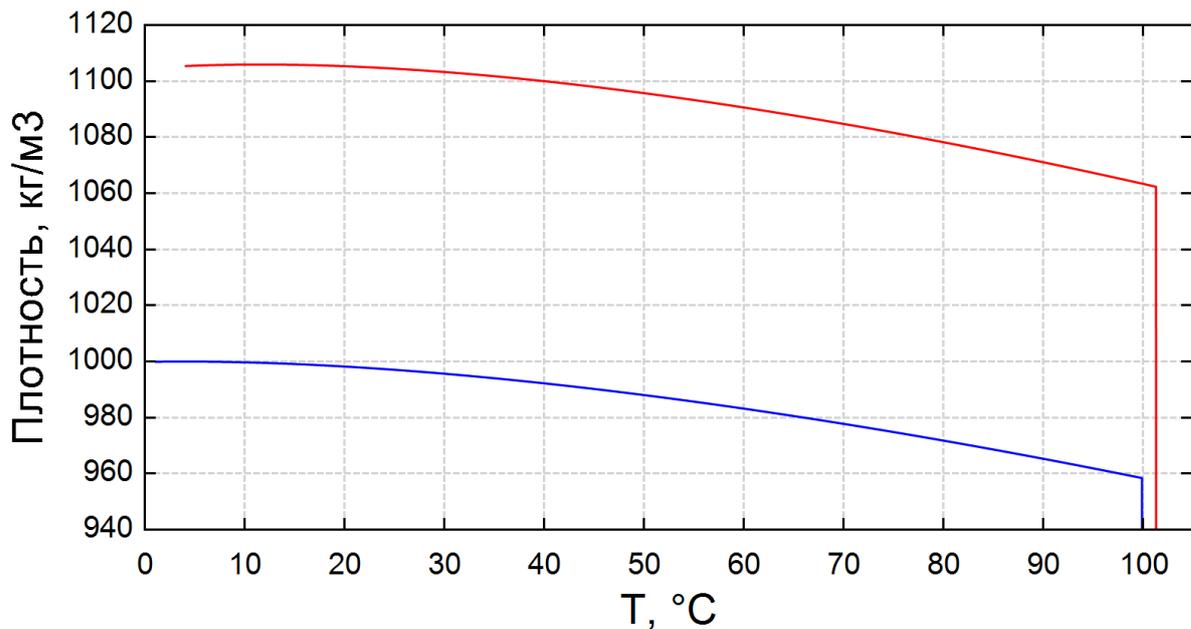
$$h_{x4} := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"Q"}, x_4, \text{"T"}, T_{sat}, wf)$$

$$s_{x4} := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"Q"}, x_4, \text{"T"}, T_{sat}, wf)$$

Рис. 14 Формирование векторов для построения графиков

Два верхних оператора на рис. 14 включают функцию, возвращающую значения температуры критической и тройной точек воды. Лёгкой (обычной) воды! Если же в значении переменной *wf* (working fluid) букву Н (водород) заменить на букву D (дейтерий), то... см. рис. 15. Тяжелая вода на АЭС иногда применяется в качестве замедлителя и теплоносителя первого контура. Если же обычную воду второго контура заменить на тяжёлую (заменить букву Н на букву D в исходных данных, отображенных на рис. 4), то КПД цикла упадет с 37.52 % (см. конец рис. 11) до 36.89 %. Но все это укладывается в погрешность (неопределенность) расчета. А вот значения плотности тяжёлой (красная кривая) и лёгкой воды (синяя кривая) отличаются значительно – см. графики на рис. 15, оправдывающие названия этих двух вод.

```
wf = "D2O"      Тяжелая вода с дейтерием (D) вместо водорода (H)
T_cr := CoolProp_Props ("Tcrit", "", 0, "", 1, wf) = 370.7 °C
T_tr := CoolProp_Props ("Ttriple", "", 0, "", 1, wf) = 3.819 °C
T_H2O := [(1 °C), 1.1 °C..(110 °C)]      T_D2O := [(4 °C), 4.1 °C..(110 °C)]
```



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{augment} \left(\frac{T_{H2O}}{K} - 273.15, \text{CoolProp_Props} \left("D", "T", T_{H2O}, "P", 1 \text{ atm}, "H2O" \right) \right) \\ \text{augment} \left(\frac{T_{D2O}}{K} - 273.15, \text{CoolProp_Props} \left("D", "T", T_{D2O}, "P", 1 \text{ atm}, "D2O" \right) \right) \end{array} \right\}$$

Рис. 15 Тяжёлая и лёгкая вода

Из графика на рис.15 также видно, что при атмосферном давлении тяжёлая вода кипит не при 100, а примерно при 102 градуса Цельсия.

На рисунке 16 показано, как формируется переменная `Plot` – аргумент будущих графиков. Строки оператора `Система` (открывающаяся фигурная скобка) – это матрицы с одной строкой и двумя столбцами. Первый (левый) элемент матрицы – это формирование новой матрицы с двумя столбцами, хранящими координаты точек на графике, а второй (правый) элемент – это комментарий. Из матрицы изымается первый элемент – см. единичный индекс у закрывающихся квадратных скобок.

$$\text{Plot} := \left[\begin{array}{l} \left[\text{augment} \left(\frac{s_{Sat}}{1000}, \frac{h_{Sat}}{1000} \right) \text{"Линия насыщения по водяному пару"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(\frac{s_{12}}{1000}, \frac{h_{12}}{1000} \right) \text{"Расширение пара в ЦВД"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(\frac{s_{x2}}{1000}, \frac{h_{x2}}{1000} \right) \text{"Линия одинаковой влажности для ЦВД"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(\frac{s_p}{1000}, \frac{h_{p2}}{1000} \right) \text{"Изобара p2"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(\frac{s_{34}}{1000}, \frac{h_{34}}{1000} \right) \text{"Расширение пара в ЦНД"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(\frac{s_{x4}}{1000}, \frac{h_{x4}}{1000} \right) \text{"Линия одинаковой влажности для ЦНД"} \right]_1 \end{array} \right]$$

Рис. 16 Формирование аргумента графика

В переменной `Plot` нет строк, формирующих надписи на диаграммах, как это показано, например, на рис. 11.8 в главе 11. Надписи на рисунках 17-19 были вручную добавлены к диаграмме в среде графического редактора `Paint` – ещё одно «надувательство» (обман читателя), о котором говорилось во Введении (см. рис. В1).

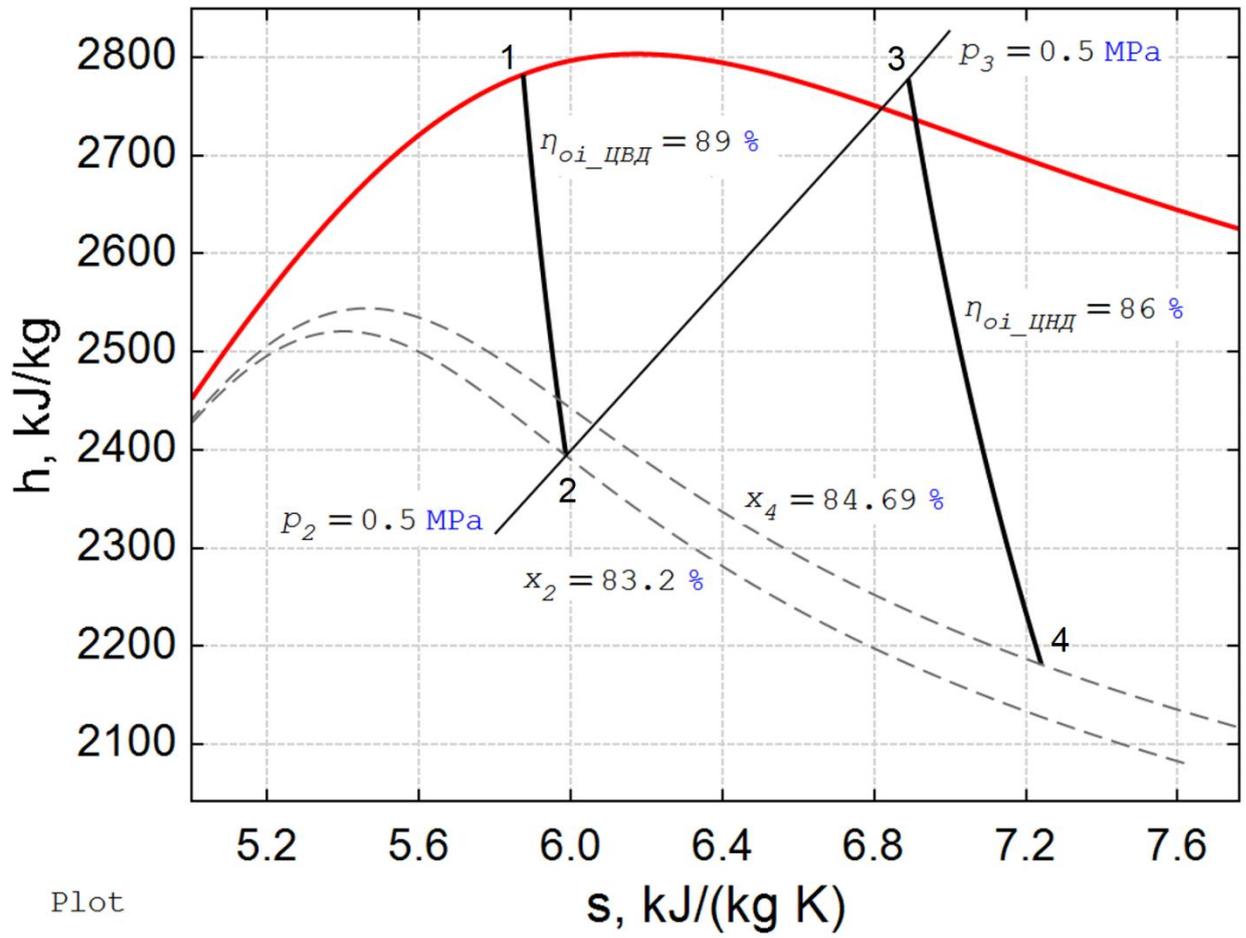


Рис. 17 Диаграмма 1 – реальные процессы расширения пара в цилиндрах турбины

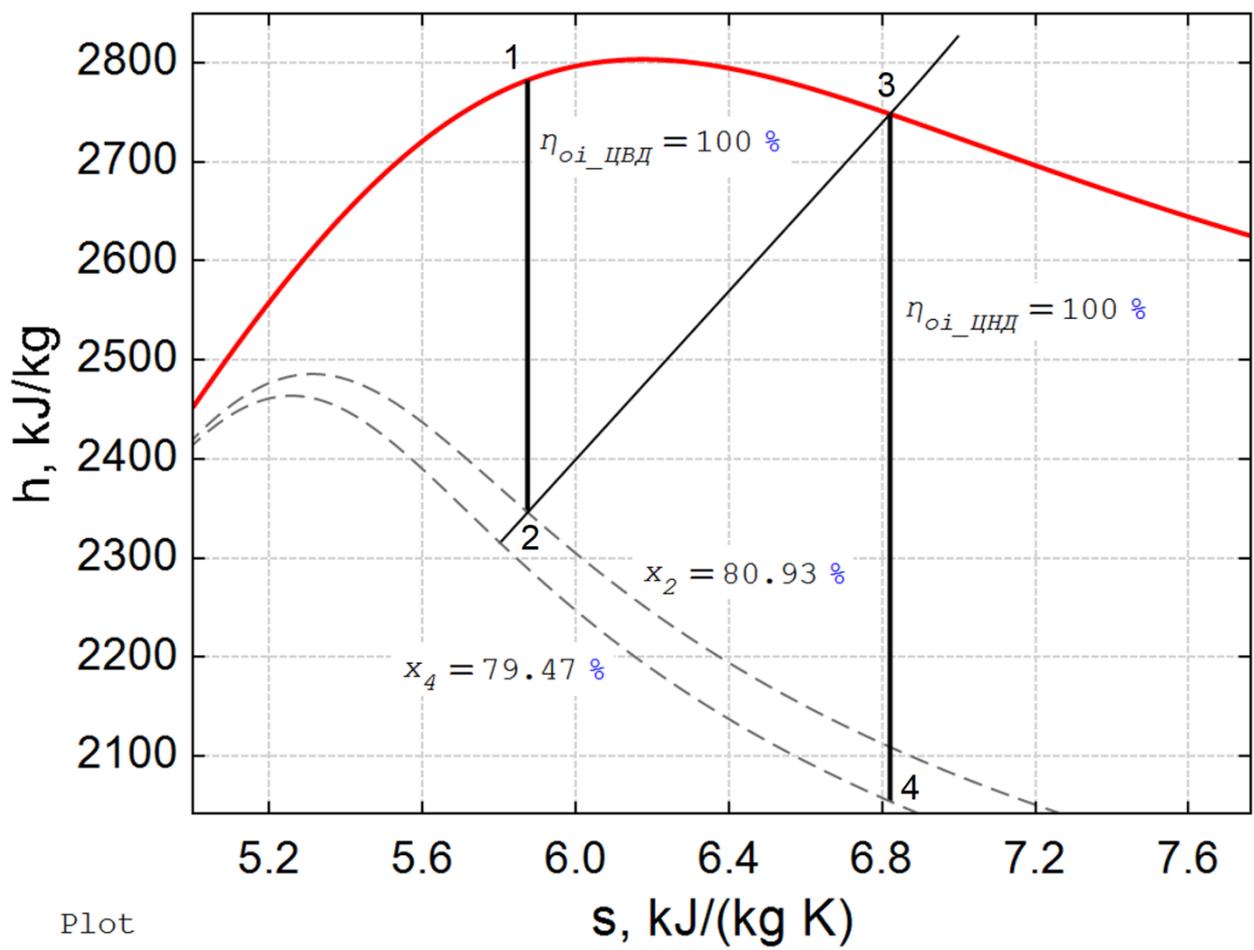


Рис. 18 Диаграмма 2 – идеальные процессы расширения пара в цилиндрах турбины

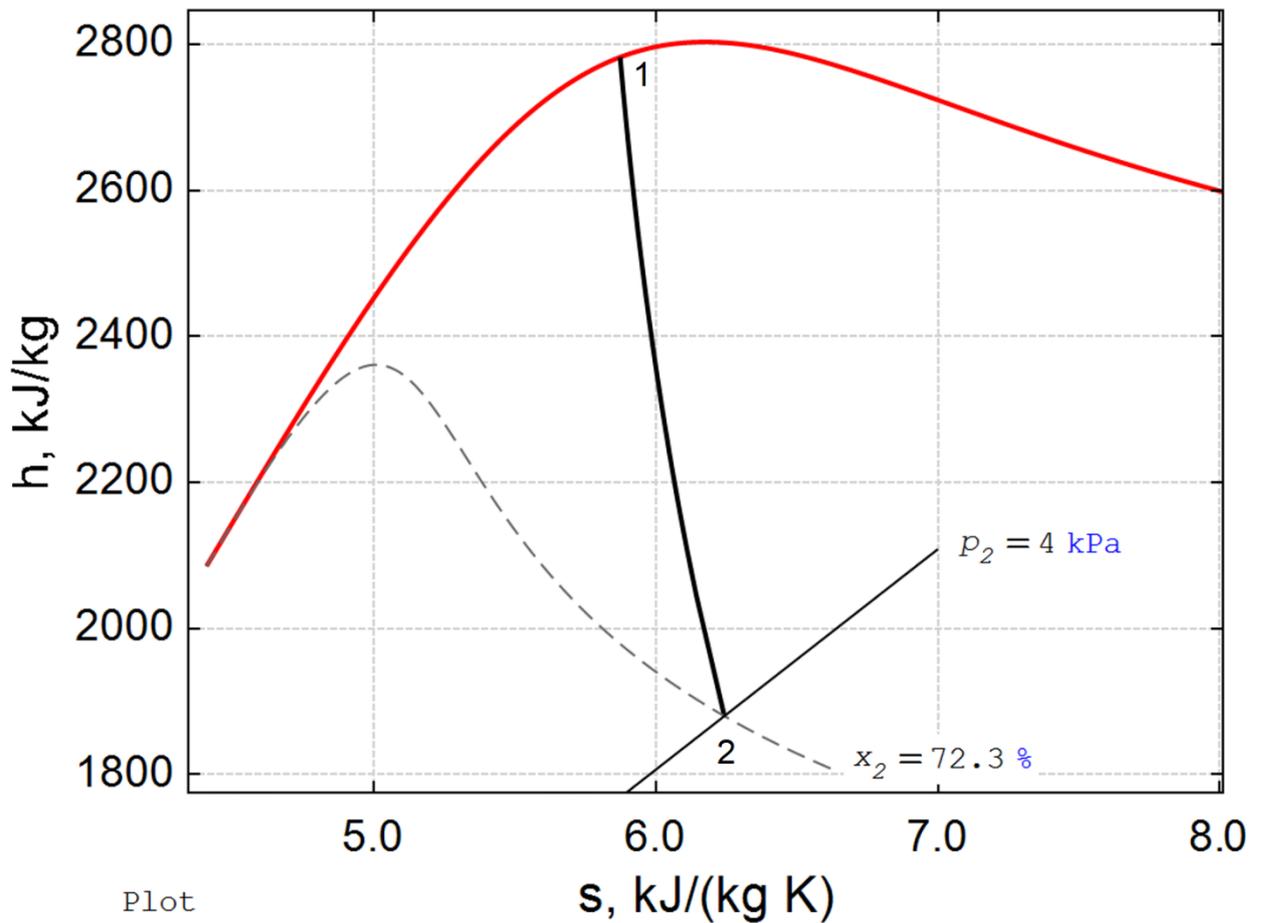


Рис. 19 Диаграмма 3 – процессы расширения пара в турбине без сепаратора и пароперегревателя.

Как видно из рисунка 19, паротурбинный цикл АЭС на влажном паре без сепаратора и пароперегревателя будет иметь не просто высокую, а недопустимо высокую влажность на выходе из турбины. Можно с большой натяжкой сказать, что паровая турбина становится чуть ли не... гидравлической турбиной. Это конечно шутка (гипербола), но она позволяет нам поговорить о термодинамических основах гидроэлектростанций с гидротурбинами в виде дивертисмента к данной главе учебного пособия.