

Компьютерный инструмент работы с флюидами: построение диаграмм

С сайта, показанного на рис. 1, можно скачать свободно распространяемую физико-математическую программу SMath Studio (далее SMath), которая позволяет легко и быстро строить диаграммы термодинамических циклов. Покажем это на конкретных примерах!

← ↻ 🏠 🔒

https://www.smath.com/ru-RU/view/SMathStudio/скачать

Скачать SMath Studio

Версия **1.1.8763**
Стабильная (опубликовано **29.12.2023**)
Автор: **ООО "ЭсМат"**

Windows

 **Windows installer of SMath Studio** Размер: **3.32 МБ**

Installation package for computers running Windows OS. **85611** из **1446587** загрузок

Universal

 **Mono package of SMath Studio** Размер: **2.14 МБ**

Application package to use with Mono runtime. **4275** из **290633** загрузок

Linux

 **SMath Studio for Linux (Ubuntu Desktop)** Размер: **12.6 МБ**

Application package to run on Ubuntu Desktop 22.04 LTS, Fedora 36. **5546** из **15351** загрузок

 **SMath Studio for Linux (Astra Linux)** Размер: **10.14 МБ**

Application package to run on Astra Linux "Орёл" 1.7. **3200** из **7474** загрузок

Android

 **SMath Studio for Android (32-bit ARM)** Размер: **14.35 МБ**

Android app package for 32-bit ARM CPUs. **7236** из **15019** загрузок

 **SMath Studio for Android (64-bit ARM)** Размер: **13 МБ**

Android app package for 64-bit ARM CPUs. **8954** из **19191** загрузок

Рис. 1. Сайт, с которого скачивается программа SMath Studio

Дополнительно необходимо к среде SMath подгрузить дополнение (плагин – см. рис. 2) CoolProp Wrapper (www.coolprop.com), функции которого возвращают теплофизические свойства некоторых флюидов, в частности воды и водяного пара, о которых речь пойдет ниже.

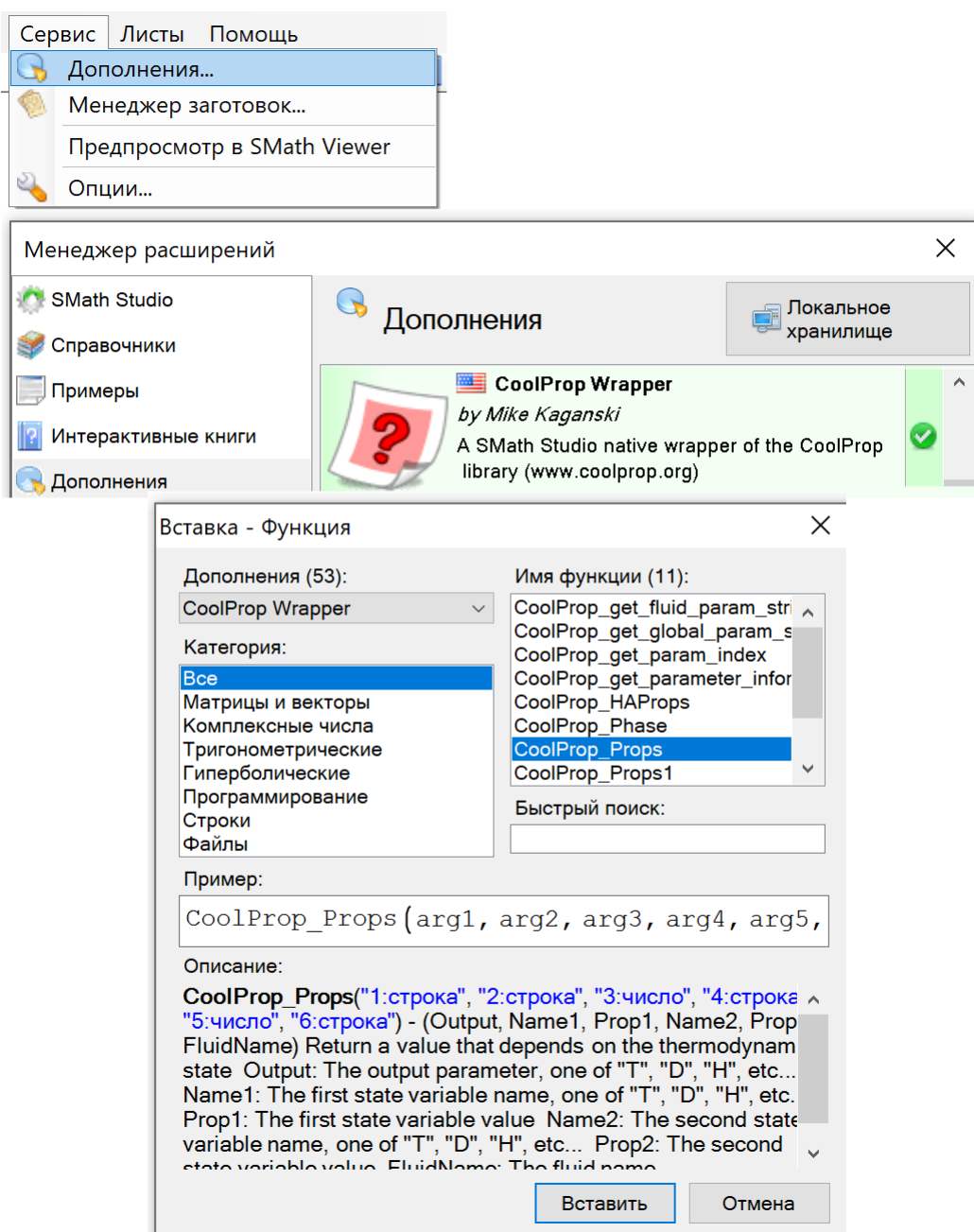


Рис. 2. Подгрузка дополнения CoolProp Wrapper

Эти свойства определяются формуляциями Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара, два сайта которых показаны на рис. 3 и 4.

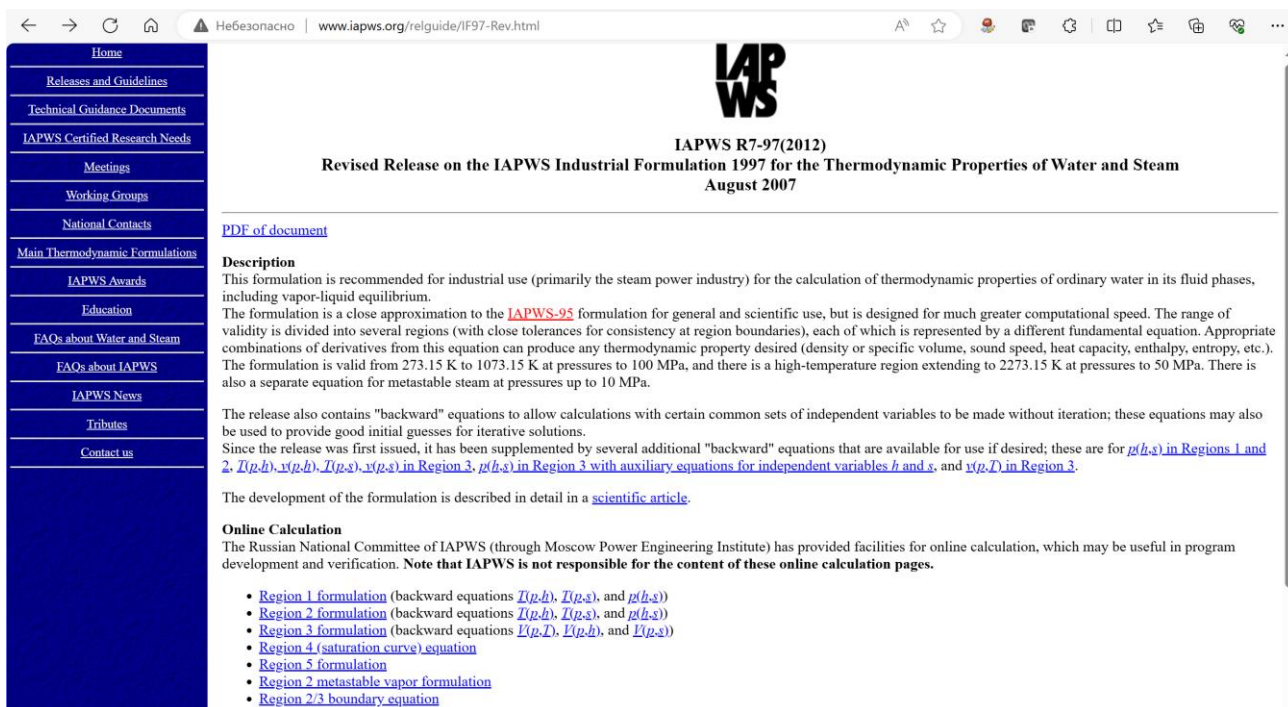


Рис. 3. Сайт <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html> (формуляция 1997 года)

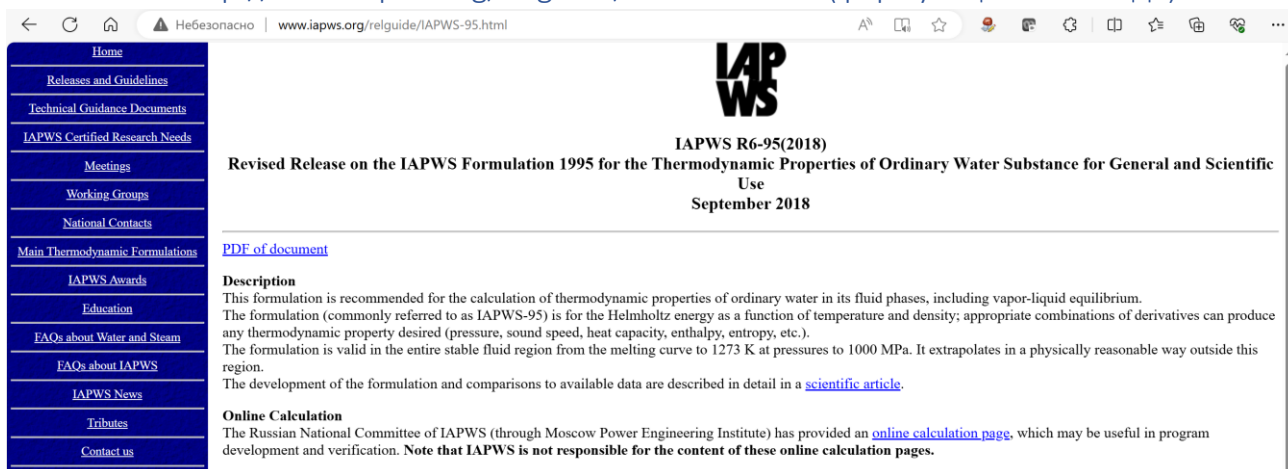


Рис. 4. Сайт <http://www.iapws.org/relguide/IAPWS-95.html> (формуляция 1995 года)

Примеры вызова функций пакета CoolProp Wrapper показаны на рис. 5: задаются значения давления и температуры свежего пара, подаваемого в паровую турбину, а также давление в конденсаторе паровой турбины, по которым определяются значения удельной массовой энтальпии (h – теплосодержания), удельной массовой энтропии (s) и степени сухости водяного пара (x), выходящего из паровой турбины. Процесс расширения пара в турбине идеальный – значение энтропии пара в ней не меняется – $s_c = s_0$. На рисунке 6 показаны примеры вызова функций, возвращающих теплофизические свойства воды и водяного пара по формуляции 1997 года Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара. То, что это формуляция именно 1997, а не 1995 года свидетельствует запись `wm:="IF97::H2O"`. Для работы с формуляцией 1995 кода необходима укороченная такая запись `wm:="H2O"`.

Примечание. Традиционно в технической термодинамике под переменную, хранящую температуру в градусах Цельсия, отводят маленькую (прописную) букву t , а под переменную, хранящую температуру в градусах Кельвина (в кельвинах), большую (заглавную) букву T . В расчете, показанном на рис. 5, переменная одна и это заглавная буква T потому, что в действительности она хранит температуру в кельвинах вследствие автоматического перехода к основным единицам СИ.

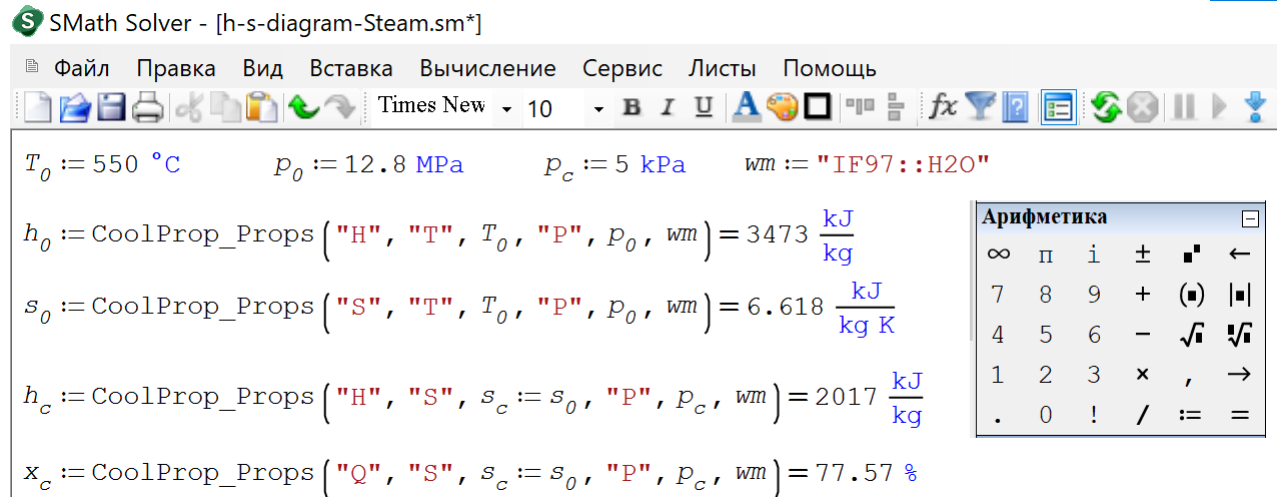


Рис. 5. Примеры вызова функций пакета CoolProp Wrapper

На рисунке 6 показано продолжение SMath расчета, начало которого отображено на рис. 5. Он связан с подготовкой к построению диаграмм процесса адиабатного (обратимого) расширения водяного пара от давления 12.8 МПа (температура 550°C) до давления 5кПа – см. первую строку расчета на рис. 5. Операторами, показанными на рис. 6, определяются параметры критической (cr) и тройной (tr) точек воды и водяного пара. В пятом операторе на рис. 6 фигурирует переменная Q – степень сухости водяного пара (Quality – качество водяного пара). Для влажного пара в отечественной литературе здесь используется буква x – степень сухости пара и y – влажность пара ($x+y=1$). В пятом операторе на рис. 6 значение Q может быть в пределах от нуля до единицы, что не меняет результат расчета. При расчете линии насыщения значение переменной Q равно единице (сухой насыщенный пар) или нулю (вода на линии насыщения).

Линии диаграммы расширения водяного пара в турбине – это по своей сути точки, соединенные отрезками прямых линий. Если точек много (y нас их 1001) и они расположены близко друг от друга, то они сливаются в сплошную линию.

Операторы, показанные на рис. 6 не требуют особых комментариев. Равномерно по арифметической прогрессии заполняются три вектора с именами T_{sat} , S_p и S_h , по которым рассчитываются значения в векторах S_{sats} (удельная энтропия сухого насыщенного пара), S_{satw} (удельная энтропия воды на линии насыщения), T_p (температура пара при постоянном давлении P_0 и меняющемся значении удельной энтропии), S_x (удельная энтропия влажного

пара при постоянной степени сухости пара x_c и меняющемся значении температуры насыщения T_{Sat}) и T_h (температура пара при постоянном значении удельной энтальпии h_0 и меняющемся значении удельной энтропии s_h). Оператор векторизации (верхняя стрелочка, направленная вправо) заставляет пакет SMATH выполнять нужные действия над каждым элементом соответствующего вектора.

Примечание. Вектор T_{Sat} заполняется значениями температуры в пределах от значения в тройной точке (tr) до значения в критической точке (cr), уменьшенного на одну десятитысячную кельвина. Это сделано для того, чтобы не было ошибки вычисления в последующем операторе расчета удельной энтропии сухого насыщенного пара.

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

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

$$p_{cr} := \text{CoolProp_Props}("Pcrit", "", 0, "", 1, wm) = 22.064 \text{ MPa}$$

$$s_{cr} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T_{cr}, "P", p_{cr}, wm) = 4.4255 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$T_c := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_c, "Q", 1, wm) = 32.88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Saturated line

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

$$s_{SatS} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T_{Sat}, "Q", 1, wm)$$

$$s_{SatW} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T_{Sat}, "Q", 0, wm)$$



Isobar

$$s_p := \left[\left(4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left(4.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \dots \left(6.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right]$$

$$T_p := \text{CoolProp_Props}("T", "S", s_p, "P", p_0, wm)$$

x - const

$$s_x := \text{CoolProp_Props}("S", "Q", x_c, "T", T_{Sat}, wm)$$

h - const

$$s_h := \left[\left(6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left(6.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \dots \left(8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right]$$

$$T_h := \text{CoolProp_Props}("T", "S", s_h, "H", h_0, wm) \quad T_h := \text{wspTHS}(h_0, s_h)$$

Рис. 6. Заполнение векторов, формирующих диаграмму расширения водяного пара в турбине

Имея под рукой заполненные векторы, несложно построить нужные диаграммы. Для этого в расчет вводится переменная *Plot*, в которую заносятся операторы построения графиков, объединенные фигурными скобками – см. рис. 7. Эти операторы объединены в матрицу с одной строкой и двумя столбцами – в горизонтальный вектор, первый элемент которого – это действующий оператор, а второй – это комментарий. Функция *augment*, встроенная в *SMath*, объединяет два вектора в одну матрицу с двумя столбцами. Первый столбец – это значения абсцисс на графике, а второй – ординат. По умолчанию графики строятся в соответствии базовым единицам измерения СИ – Джоули, а не килоджоули, градусы Цельсия, а не кельвины. Чтобы на осях графика были нужные единицы, аргументы функции *augment* подвергаются небольшим изменениям – деление на 1000 (кило) и переход от температурной шкалы Кельвина к шкале Цельсия.

Линия обратимого расширения пара в турбине строится через ввод матрицы с двумя строками и двумя столбцами, элементы которой фиксируют координаты начала и конца отрезка прямой.

Некоторые точки графика отмечены либо кружочком (критическая точка), либо соответствующей подписью. Это конец линии одинаковой сухости пара, конец изобар и конец изоэнтальпы. Функция *num2str*, встроенная в *SMath*, позволяет преобразовать число (*num*) к (2 – to, two) строке (*str*) и отобразить эту информацию на графике с нужным числом знаков (второй аргумент "n4" функции *num2str*). Данная информация размещается на графике правее и ниже отмеченной точки. Если информация представляет собой латинскую букву *o* или символы *x*, *+*, *.* (точка), то эти символы отображаются на месте отмеченной точки.

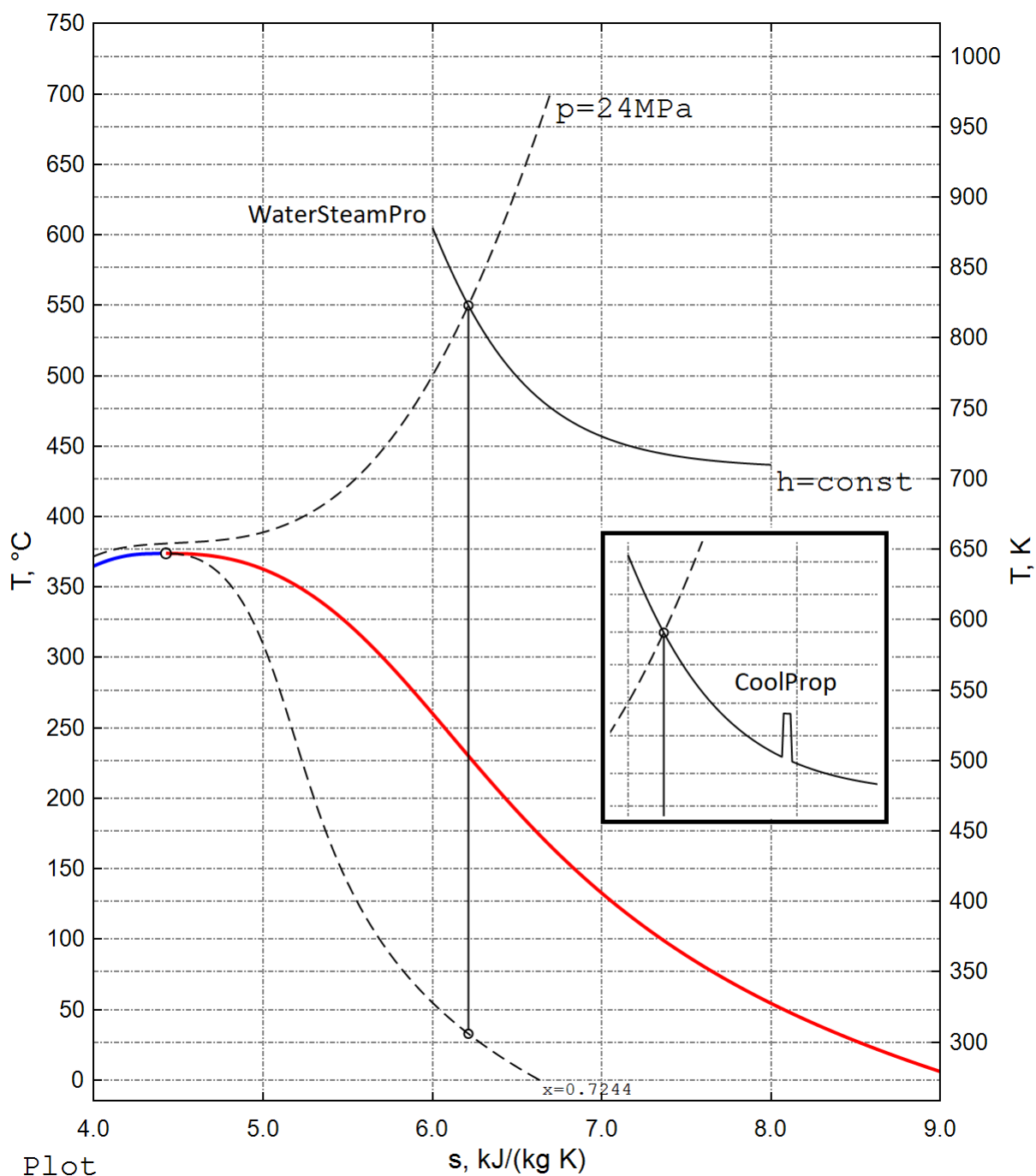


Рис. 8. T-s диаграмма обратимого расширения пара в турбине

На рисунке 8 показано диалоговые окна формирования графика, через которые на концах отрезка прямой, изображающей обратимое расширение тара в турбине, проставлены два кружочка.

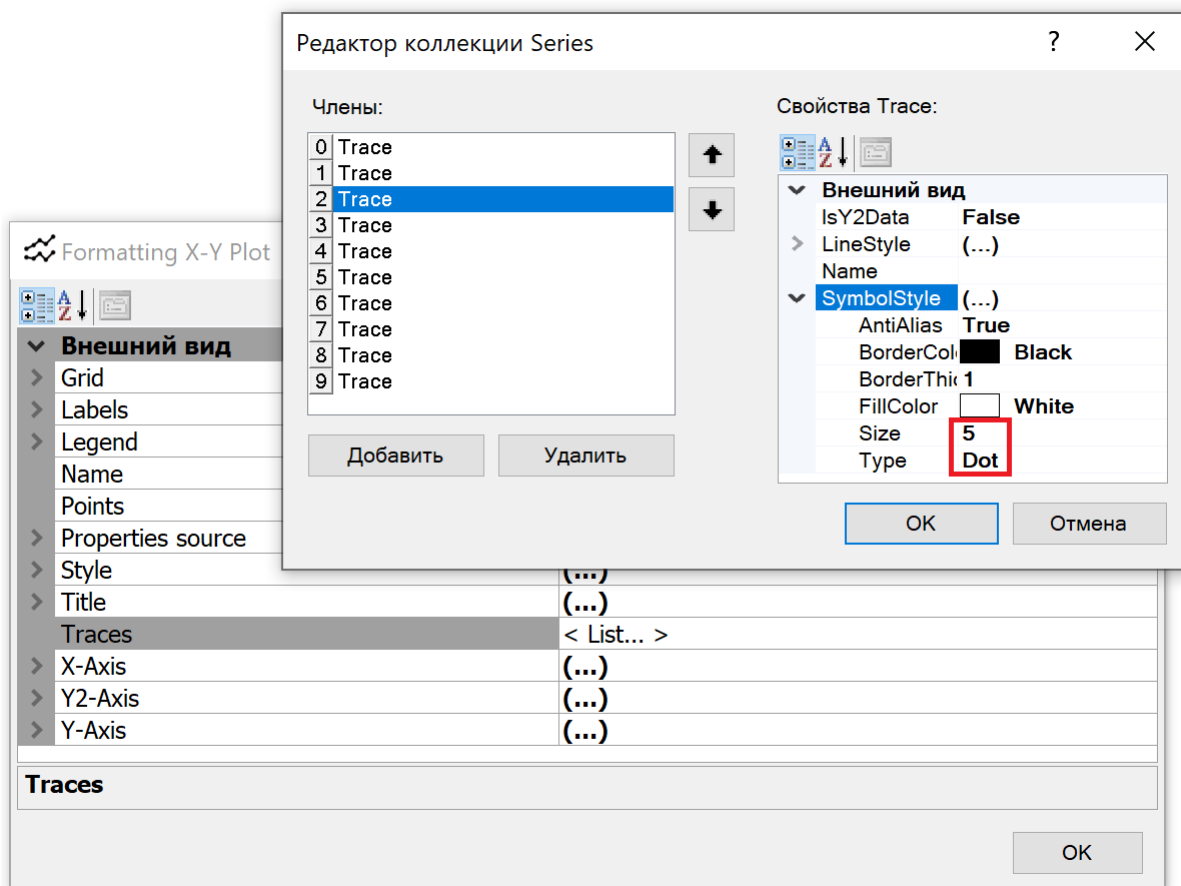


Рис. 9. Форматирование отрезка прямой с двумя кружочками а концах

Диаграмма, показанная на рис. 8, имеет две оси ординат. Левая ось отображает температуру по шкале Цельсия, а правая – по шкале Кельвина (абсолютная температура). Получить такую диаграмму можно, включив в работу (true) вторую ось Y (см. рис. 10) и соответствующим образом отформатировав ее.

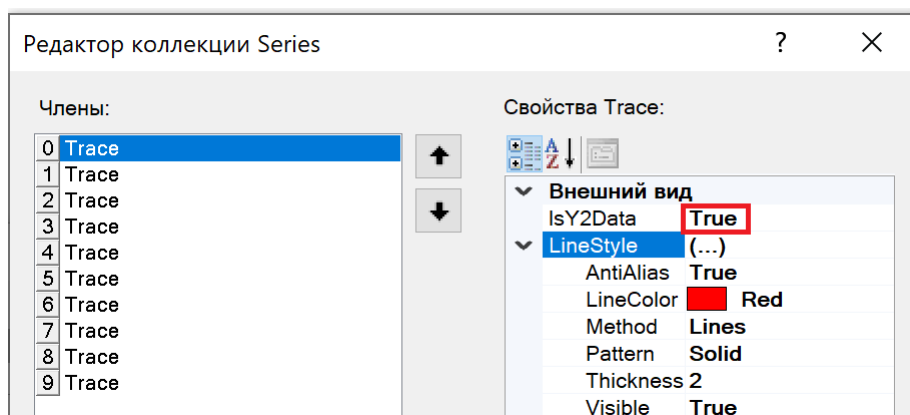


Рис. 10. Работа со второй осью ординат

При особом желании можно получить и вторую ось абсцисс – см. рисунок 11, отображающий зависимость изобарной удельной теплоемкости воды от температуры при атмосферном давлении.

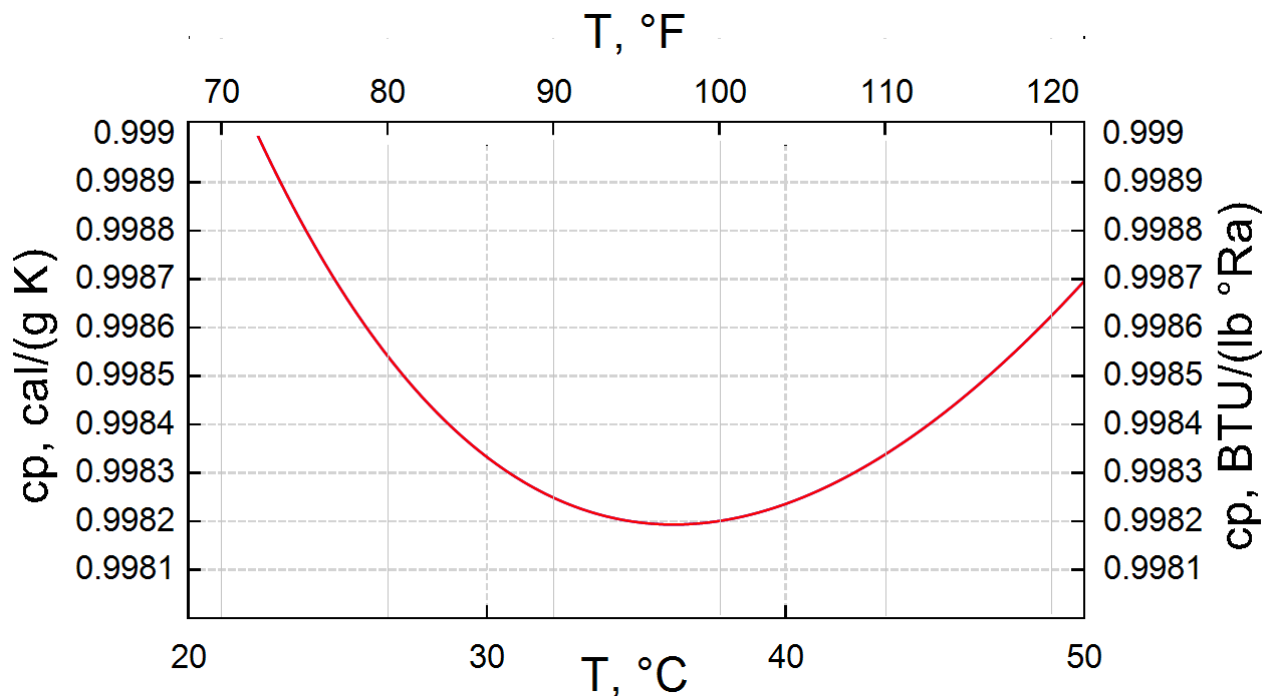


Рис. 11. Зависимость изобарной удельной теплоемкости воды от температуры при атмосферном давлении

График на рисунке 11 – это коллаж из двух графиков – графика со шкалой Цельсия по оси абсцисс и графика со шкалой Фаренгейта по оси абсцисс. Но если к пакету SMATH загрузить приложение Maxima, то можно иметь реальную, а не пририсованную вторую ось абсцисс. Это было описано на сайте пользователей SMATH по адресу https://en.smath.com/forum/yaf_postst25243_2-d-X-axes.aspx.

На рисунке 12 показана h-s диаграмма (диаграмма Молье) необратимого расширения пара в турбине. Для этого в расчет была введена дополнительная величина η_{oi} – внутренний (i) относительный (o) КПД (η) турбины. Показана также прямая линия, отображающая процесс обратимого расширения пара. Такой график построить несложно, пользуясь информацией, приведенной выше.

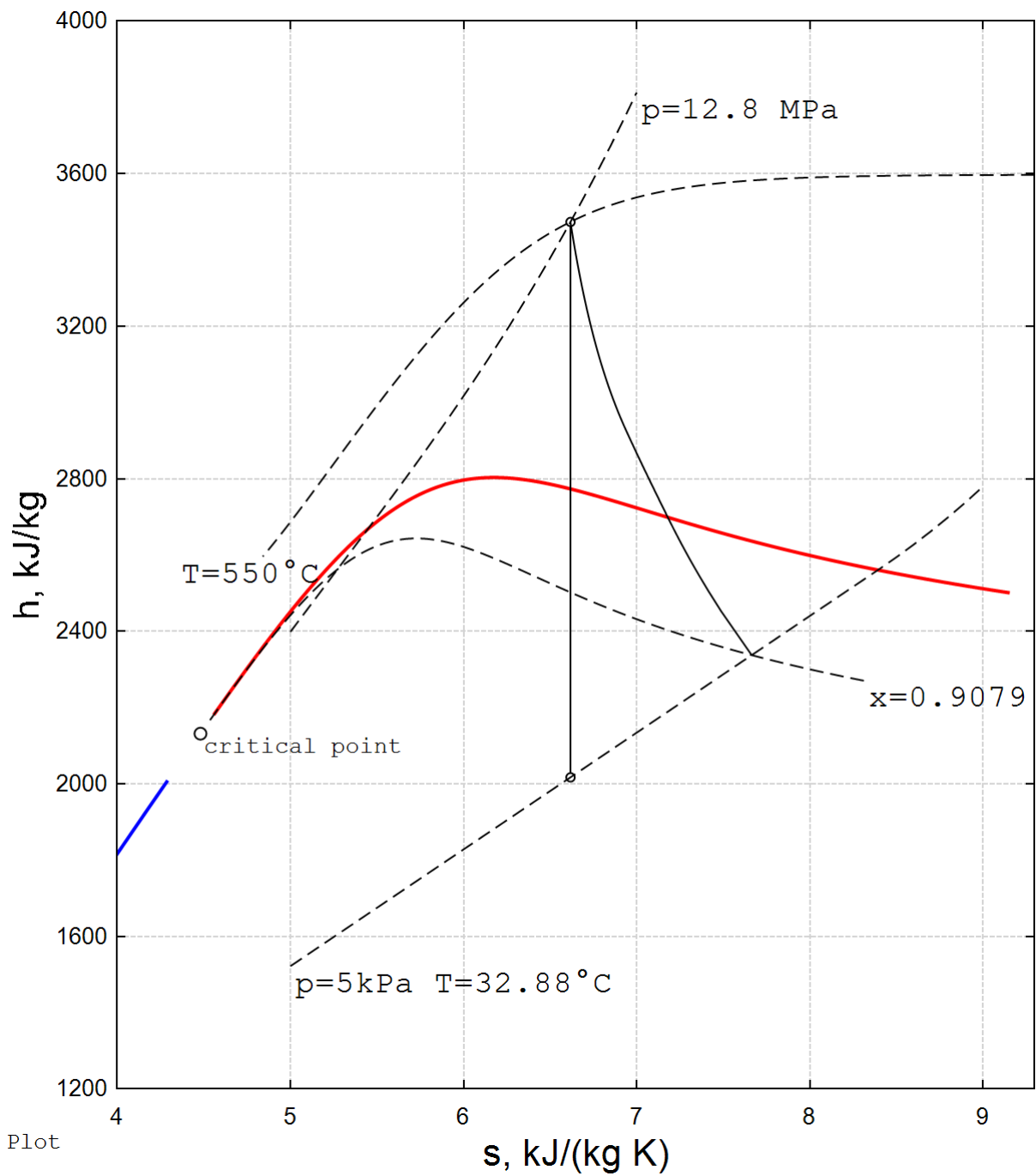


Рис. 12. h-s диаграмма необратимого расширения пара в турбине

На рисунке 13 показаны операторы, формирующие векторы для построения h-s диаграммы. Используется не приложение CoolProp Wrapper, а WaterSteamPro.

$$T_0 := 550 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad p_0 := 12.8 \text{ MPa} \quad p_c := 5 \text{ kPa} \quad \eta_{oi} := 78 \%$$

$$h_0 := \text{wspHPT} \left(p_0, T_0 \right) = 3473 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_0 := \text{wspSPT} \left(p_0, T_0 \right) = 6.618 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$h_c := \text{wspHEXPANSIONPTPEFF} \left(p_0, T_0, p_c, \eta_{oi} \right) = 2338 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_c := \text{wspXEXPANSIONPTPEFF} \left(p_0, T_0, p_c, \eta_{oi} \right) = 90.79 \%$$

$$T_{cr} := 373.95 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{tr} := 0.01 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad p_{cr} := 22.064 \text{ MPa}$$

$$h_{cr} := \text{wspHPT} \left(p_{cr}, T_{cr} \right) = 2132 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_{cr} := \text{wspSPT} \left(p_{cr}, T_{cr} \right) = 4.4803 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Saturated line

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

$$s_{satS} := \overrightarrow{\text{wspSSST} \left(T_{sat} \right)} \quad h_{satS} := \overrightarrow{\text{wspHSST} \left(T_{sat} \right)}$$

$$s_{satW} := \overrightarrow{\text{wspSSWT} \left(T_{sat} \right)} \quad h_{satW} := \overrightarrow{\text{wspHSWT} \left(T_{sat} \right)}$$

Isobar

$$s_p := \left[\left(5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left(5.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \cdot \left(7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right]$$

$$h_p := \overrightarrow{\text{wspHPS} \left(p_0, s_p \right)}$$

$$s_{pc} := \left[\left(5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left(5.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \cdot \left(9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right]$$

$$h_{pc} := \overrightarrow{\text{wspHPS} \left(p_c, s_{pc} \right)} \quad T_c := \text{wspTSP} \left(p_c \right) = 32.88 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Isotherm

$$pp := \left[(1 \text{ kPa}), 10 \text{ kPa} \dots (50 \text{ MPa}) \right]$$

$$h_T := \overrightarrow{\text{wspHPT} \left(pp, T_0 \right)} \quad s_T := \overrightarrow{\text{wspSPT} \left(pp, T_0 \right)}$$

x - const

$$h_x := \overrightarrow{\text{wspHSTX} \left(T_{sat}, x_c \right)} \quad s_x := \overrightarrow{\text{wspSSTX} \left(T_{sat}, x_c \right)}$$

Turbine

$$p_{Turb} := \left[p_0, p_0 - \frac{p_0 - p_c}{1000} \cdot p_c \right]$$

$$h_{Turb} := \overrightarrow{\text{wspHEXPANSIONPTPEFF} \left(p_0, T_0, p_{Turb}, \eta_{oi} \right)}$$

$$s_{Turb} := \overrightarrow{\text{wspSEXPANSIONPTPEFF} \left(p_0, T_0, p_{Turb}, \eta_{oi} \right)}$$

Рис. 13. Операторы, формирующие векторы с параметрами необратимого расширения пара в турбине