# Компьютерный инструмент работы с флюидами: построение диаграмм

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

$\leftarrow$ (	С https://www.smath.com/ru-RU/view/SMathStudio/ска	чать
Скач	ать SMath Studio Версия 1.1. Стабильная (опубликовано 29.12.2 Автор: ООО "Эсм	8763 2023) Иат"
i 🕞	Windows installer of SMath Studio Installation package for computers running Windows OS.	Размер: <b>3.32 МБ</b> <b>85611</b> из <b>1446587</b> загрузок
Universo TAR 07 (g2)	Mono package of SMath Studio Application package to use with Mono runtime.	Размер: <b>2.14 МБ</b> <b>4275</b> из <b>290633</b> загрузок
Linux (appimage)	SMath Studio for Linux (Ubuntu Desktop) Application package to run on Ubuntu Desktop 22.04 LTS, Fedora 36.	Размер: <b>12.6 МБ</b> <b>5546</b> из <b>15351</b> загрузок
(appimage)	SMath Studio for Linux (Astra Linux) Application package to run on Astra Linux "Орёл" 1.7.	Размер: <b>10.14 МБ</b> <b>3200</b> из <b>7474</b> загрузок
Android	SMath Studio for Android (32-bit ARM) Android app package for 32-bit ARM CPUs. SMath Studio for Android (64-bit ARM)	Размер: <b>14.35 МБ</b> <b>7236</b> из <b>15019</b> загрузок Размер: <b>13 МБ</b>
	Android app package for 64-bit ARM CPUs.	<b>8954</b> из <b>19191</b> 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.

$\leftrightarrow \rightarrow$ C	Небезопасно   www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html A 🏠 👶 📴 🔇 🖨 😪 …							
Home Releases and Guidelines Technical Guidance Documents								
IAPWS Certified Research Needs	IAPWS R7-97(2012)							
Meetings	Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam							
Working Groups	August 2007							
National Contacts	PDF of document							
Main Thermodynamic Formulations	Description							
IAPWS Awards	This formulation is recommended for industrial use (primarily the steam power industry) for the calculation of thermodynamic properties of ordinary water in its fluid phases,							
Education	The formulation is a close approximation to the IAPWS-95 formulation for general and scientific use, but is designed for much greater computational speed. The range of							
FAQs about Water and Steam	validity is divided into several regions (with close tolerances for consistency at region boundaries), each of which is represented by a different fundamental equation. Appropriate combinations of derivatives from this equation can produce any thermodynamic property desired (density or specific volume, sound speed, heat capacity, enthalpy, entropy, etc.). The formulation is valid from 273.15 K to 1073.15 K at pressures to 100 MPa, and there is a high-temperature region extending to 2273.15 K at pressures to 50 MPa. There is a lask a segmet equation for metastable steam at pressures un to 10 MPa.							
EAQs about IAPWS								
IAPWS News	The release also contains "backward" equations to allow calculations with certain common sets of independent variables to be made without iteration; these equations may also be used to provide good initial guesses for iterative solutions. Since the release was first issued, it has been supplemented by several additional "backward" equations that are available for use if desired; these are for $p(h,z)$ in Regions 1 and $(p,T)$ in Region 3, $n(h,z)$ in Region							
Tributes								
Contact us								
	The development of the formulation is described in detail in a scientific article.							
	Online Calculation							
	The Russian National Committee of IAPWS (through Moscow Power Engineering Institute) has provided facilities for online calculation, which may be useful in program development and verification. Note that IAPWS is not responsible for the content of these online calculation pages.							
	<ul> <li><u>Region 1 formulation</u> (backward equations <u>T(p, h)</u>, <u>T(p, x)</u>, and <u>p(h, x)</u>)</li> <li><u>Region 2 formulation</u> (backward equations <u>T(p, h)</u>, <u>T(p, x)</u>, and <u>p(h, x)</u>)</li> <li><u>Region 3 formulation</u> (backward equations <u>T(p, L)</u>, <u>T(p, k)</u>, and <u>T(p, x)</u>)</li> <li><u>Region 4 (saturation curve) equation</u></li> <li><u>Region 5 formulation</u></li> <li><u>Region 2 metastable vapor formulation</u></li> <li><u>Region 2 boundary equation</u></li> </ul>							

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

← С ⋒ ▲ Небез	юпасно   www.iapws.org/relguide/IAPWS-95.html 🕺 🖓 🖓 🖓 🖓 🖓 🖓					
Home Releases and Guidelines Technical Guidance Documents	la seconda de					
IAPWS Certified Research Needs	IAPWS R6-95(2018) Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific					
Working Groups	Use September 2018					
Main Thermodynamic Formulations	PDF of document					
<u>IAPWS Awards</u> <u>Education</u>	Description This formulation is recommended for the calculation of thermodynamic properties of ordinary water in its fluid phases, including vapor-liquid equilibrium. The formulation (commonly referred to as IAPWS-95) is for the Helmholtz energy as a function of temperature and density: appropriate combinations of derivatives can produce					
FAQs about Water and Steam	any thermodynamic property desired (pressure, sound speed, heat capacity, enthalpy, entropy, etc.). The formulation is valid in the entire stable fluid region from the melting curve to 1273 K at pressures to 1000 MPa. It extrapolates in a physically reasonable way outside this region. The development of the formulation and comparisons to available data are described in detail in a <u>scientific article</u> .					
IAPWS News						
<u>Tributes</u> <u>Contact us</u>	Online Calculation The Russian National Committee of IAPWS (through Moscow Power Engineering Institute) has provided an <u>online calculation page</u> , which may be useful in program development and verification. Note that IAPWS is not responsible for the content of these online calculation pages.					

# 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::H20". Для работы с формуляцией 1995 кода необходима укороченная такая запись wm:="H20".

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.

SMath Solver - [h-s-diagram-Steam.sm\*]

🖹 Файл Правка Вид Вставка Вычисление Сервис Листы Помощь						
$\square \supseteq \square \square$	r 🏆 [	=	5	8	Ш	2
$T_0 := 550$ °C $p_0 := 12.8$ MPa $p_c := 5$ kPa $wm := "IF97::H20"$						
h и Сарадината ( ЦЦЦ ЦШЦ Л. ЦПЦ и цт) - 2472 kJ Арифметика [						Ξ
$\begin{bmatrix} n_0 \\ \vdots \\ $	$\infty$	П	i	±	•	←
$s_{\star} := \text{CoolProp} \operatorname{Props} \left( "S", "T", T_{\star}, "P", p_{\star}, wm \right) = 6.618 \frac{kJ}{k}$	7	8	9	+	(•)	
$b_0 = 0.00110 \text{ pm} \left( b_1 + 1 + b_0 $	_	√	V			
$h_c \coloneqq \text{CoolProp}_{Props}\left(\text{"H", "S", } s_c \coloneqq s_0, \text{"P", } p_c, \text{ wm}\right) = 2017 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	1	2	3	×	,	$\rightarrow$
	•	0	!	/	:=	=
$x_c := \text{CoolProp}_{Props}("Q", "S", s_c := s_0, "P", p_c, wm) = 77.57 \%$						

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°С) 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 (у 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.

$$\begin{split} T_{cr} &\coloneqq \text{CoolProp\_Props} \left( \text{"Tcrit", "", 0, "", 1, wm} \right) = 373.95 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{tr} &\coloneqq \text{CoolProp\_Props} \left( \text{"Ttriple", "", 0, "", 1, wm} \right) = 0.01 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ p_{cr} &\coloneqq \text{CoolProp\_Props} \left( \text{"Pcrit", "", 0, "", 1, wm} \right) = 22.064 \text{ MPa} \\ s_{cr} &\coloneqq \text{CoolProp\_Props} \left( \text{"S", "T", } T_{cr}, \text{"P", } p_{cr}, \text{ wm} \right) = 4.4255 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ T_{c} &\coloneqq \text{CoolProp\_Props} \left( \text{"T", "P", } p_{c}, \text{"Q", 1, wm} \right) = 32.88 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{split}$$

Saturated line

$$\begin{split} T_{sat} &\coloneqq \left[ T_{tr}, T_{tr} + \frac{T_{cr} - 0.0001 \text{ K} - T_{tr}}{1000} \cdots \left( T_{cr} - 0.0001 \text{ K} \right) \right] \\ s_{sats} &\coloneqq \text{CoolProp_Props} \left( \text{"S", "T", } T_{sat}, \text{"Q", } 1, \text{ wm} \right) \\ s_{satW} &\coloneqq \text{CoolProp_Props} \left( \text{"S", "T", } T_{sat}, \text{"Q", } 0, \text{ wm} \right) \\ \end{split}$$

Isobar

$$s_{p} \coloneqq \left[ \left( 4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left( 4.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \cdot \cdot \left( 6.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right]$$
$$T_{p} \coloneqq \overline{\text{CoolProp}_Props} \left( \text{"T", "S", } s_{p}, \text{"P", } p_{0}, \text{ wm} \right)$$

x - const

$$s_{x} \coloneqq \text{CoolProp}_{Props} \left( "S", "Q", x_{c}, "T", T_{sat}, wm \right)$$

h - const

$$\begin{split} s_h &\coloneqq \left[ \left( 6 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right), \left( 6.01 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \cdot \cdot \left( 8 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right) \right] \\ T_h &\coloneqq \overline{\text{CoolProp}\_\text{Props}\left( \text{"T", "S", } s_h, \text{"H", } h_0, \text{ wm} \right)} \qquad T_h \coloneqq \overline{\text{wspTHS}\left( h_0, \ s_h \right)} \end{split}$$

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 соответствие 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 тоски 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 о или символы х, +, . (точка), то эти символы отображаются на месте отмеченной точки.

$$\begin{bmatrix} \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{sat}}{1000}, \frac{T_{sat}}{K} - 0 \right] "Линия насыщения по воляному пару Q=1" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{satW}}{1000}, \frac{T_{sat}}{K} - 273.15 \right] "Линия насыщения по воде Q=0" \right]_{1} \\ \left[ \left[ \frac{s_{0}}{1000}, \frac{T_{0}}{K} - 273.15 \right] "Расширение пара в турбине" \right]_{1} \\ \left[ \frac{s_{0}}{1000}, \frac{T_{c}}{K} - 273.15 \right] "Расширение пара в турбине" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{x}}{1000}, \frac{T_{sat}}{K} - 273.15 \right] "Линия постоянной влажности" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{x}}{1000}, \frac{T_{cx}}{K} - 273.15 \right] "Линия постоянной влажности" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{x}}{1000}, \frac{T_{cx}}{K} - 273.15 \right] "Линия постоянной влажности" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{x}}{1000}, \frac{T_{cx}}{K} - 273.15 \right] "Изобара давления свежего пвра" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара давления свежего пвра" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара давления свежего пара" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара давления свежего пара" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара давления свежего пара" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара тальпа свежего пара" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара тальпа свежего пара" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] "Изобара тальпа свежего пара" \right]_{1} \\ \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] = 273.15 \\ \operatorname{concat} \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{P_{0}}{MPa}, \operatorname{and} \right], \operatorname{and} \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] \right] = 273.15 \\ \operatorname{concat} \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] \right] = 273.15 \\ \operatorname{concat} \left[ \operatorname{augment} \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] \right] \right] = 273.15 \\ \operatorname{concat} \left[ \operatorname{augment} \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] \right] \right] = 273.15 \\ \operatorname{concat} \left[ \operatorname{augment} \left[ \operatorname{augment} \left[ \frac{s_{h}}{1000}, \frac{T_{h}}{K} - 273.15 \right] \right] \right] = 273.15 \\ \operatorname{concat} \left[ \operatorname{augment} \left[ \operatorname{augme$$

Рис. 7. Формирование аргумента графика

На рисунке 8 показана диаграмма, формирование которой зафиксировано операторами, отображенными на рис. 5 и 6.





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

	Редактор коллекции Series			?	×		
<ul> <li>Formatting X-Y Plot</li> <li>2 ↓ □</li> <li>Bнешний вид</li> <li>Grid</li> <li>Labels</li> <li>Legend</li> <li>Name</li> <li>Points</li> <li>Properties source</li> </ul>	Члены: 0 Тгасе 1 Тгасе 2 Тгасе 3 Тгасе 4 Тгасе 5 Тгасе 6 Тгасе 7 Тгасе 8 Тгасе 9 Тгасе 9 Тгасе Добавить Удалить		Свойства Trace:	e Black White Отме	на		
Style							
Title							
	()						
Traces	< List	>					
X-AXIS	()						
Y 2-AXIS	()						
Y-AXIS	()						
Traces							
				ОК			

## 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.

Редактор коллекции Series	? ×	
Члены:		Свойства Trace:
0 Trace 1 Trace 2 Trace 3 Trace 4 Trace 5 Trace 6 Trace 7 Trace 8 Trace 9 Trace	CB	<ul> <li>Внешний вид IsY2Data True</li> <li>LineStyle () AntiAlias True LineColor Red Method Lines Pattern Solid Thickness 2</li> </ul>
		Visible True

## 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 шкалою Цельсия по оси абсцисс и графика со шкалою Фаренгейта по оси абсцисс. Но если к пакету SMath подгрузить приложение Maxima, то можно иметь реальную, а не пририсованную вторую ось абсцисс. Это было описано на сайте пользователей SMath по

адресуhttps://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  $\eta_{oi}$  – внутренний (i) относительный (o) КПД ( $\eta$ ) 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, a WaterSteamPro.

$$\begin{split} T_{0} &:= 550 \ ^{\circ}\text{C} \qquad p_{0} := 12.8 \text{ MPa} \qquad p_{c} := 5 \text{ kPa} \qquad \eta_{oi} := 78 \text{ k} \\ h_{0} &:= \text{wspHPT} \left( p_{0} , T_{0} \right) = 3473 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \qquad s_{0} := \text{wspSPT} \left( p_{0} , T_{0} \right) = 6.618 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\ h_{c} &:= \text{wspHEXPANSIONPTPEFF} \left( p_{0} , T_{0} , p_{c} , \eta_{oi} \right) = 2338 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ x_{c} &:= \text{wspXEXPANSIONPTPEFF} \left( p_{0} , T_{0} , p_{c} , \eta_{oi} \right) = 90.79 \text{ k} \\ T_{cr} &:= 373.95 \ ^{\circ}\text{C} \qquad T_{tr} := 0.01 \ ^{\circ}\text{C} \qquad p_{cr} := 22.064 \text{ MPa} \\ h_{cr} &:= \text{wspHPT} \left( p_{cr} , T_{cr} \right) = 2132 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ s_{cr} &:= \text{wspSPT} \left( p_{cr} , T_{cr} \right) = 4.4803 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \end{split}$$

Saturated line

$$\begin{split} T_{Sat} &:= \left[ T_{tr}, T_{tr} + \frac{T_{cr} - T_{tr}}{1000} \cdots \left( T_{cr} - 0.0001 \text{ K} \right) \right] \\ s_{SatS} &:= \overrightarrow{\text{wspSSST} \left( T_{Sat} \right)} \quad h_{SatS} &:= \overrightarrow{\text{wspHSST} \left( T_{Sat} \right)} \\ s_{SatW} &:= \overrightarrow{\text{wspSSWT} \left( T_{Sat} \right)} \quad h_{SatW} &:= \overrightarrow{\text{wspHSWT} \left( T_{Sat} \right)} \end{split}$$

Isobar

$$s_{p} \coloneqq \left[ \left( 5 \frac{kJ}{kg K} \right), \left( 5.01 \frac{kJ}{kg K} \right), \cdot \left( 7 \frac{kJ}{kg K} \right) \right]$$

$$h_{p} \coloneqq \overrightarrow{wspHPS} \left( p_{0}, s_{p} \right)$$

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

$$h_{pc} \coloneqq \overrightarrow{wspHPS} \left( p_{c}, s_{pc} \right) \qquad T_{c} \coloneqq wspTSP \left( p_{c} \right) = 32.88 \text{ °C}$$

Isotherm

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

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

$$x \cdot \text{const}$$

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

$$Turbine$$

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

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

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

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