

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ «НУЛЕВОГО» ИЗДАНИЯ КНИГИ	4
ПРЕДИСЛОВИЕ К ДАННОМУ ИЗДАНИЮ КНИГИ	6
ГЛАВА 1. SMATH STUDIO И COOLPROP	8
1.1. Установка CoolProp Wrapper в среду SMath Studio	8
1.2. Основные функции пакета CoolProp Wrapper	10
1.3. Влажный воздух	17
ГЛАВА 2. SMATH STUDIO И WATERSTEAMPRO	19
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА РЕНКИНА НА ЭТАНОЛЕ..	35
ГЛАВА 4. ПРОДУВКА КОТЛА.....	46
ГЛАВА 5. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ФЛЮИДОВ	54
5.1. Этанол.....	54
5.2. Пропан-бутан.....	64
5.3. О размерностях, концентрациях и инновациях в физико-математических расчетах.....	68
ГЛАВА 6. РАСЧЕТ ОЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА	74
ГЛАВА 7. ПОСТРОЕНИЕ T-S-ДИАГРАММЫ ИЗОБУТАНА	84
7.1. Построение линий насыщения.....	84
7.2. Построение линий изобар.....	92
7.3. Построение линий удельных изоэнтальпий	94
7.4. Наименование линий	98
ГЛАВА 8. РАСЧЕТ ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	101
8.1. Определение ТФС веществ в характерных точках установки	102
8.2. Расчет испарителя и конденсатора.....	104
8.3. Расчет компрессора.....	104
8.4. Расчет процессов установки на T - s -диаграмме	106
ГЛАВА 9. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ	114
9.1. Холодный период.....	115
9.2. Теплый период.....	118
ГЛАВА 10. ПРОЦЕСС ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В НАСАДОЧНОМ СКРУББЕРЕ	128
ГЛАВА 11. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ СТЕНКЕ	138
ГЛАВА 12. ТЕМПЕРАТУРА: МЕТАМОРФОЗЫ В РУЧНЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ.....	146
ГЛАВА 13. ПОСЛЕСЛОВИЕ. ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛА В ИНЖЕНЕРНОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ МЕГАПОЛИСА	160

ПРЕДИСЛОВИЕ «НУЛЕВОГО» ИЗДАНИЯ КНИГИ

(М. : Энергоатомиздат, 1989)

Сборник задач «Установки для трансформации тепла и охлаждения» составлен применительно к книге доктора техн. наук, проф. Е. Я. Соколова и доктора техн. наук, проф. В. М. Бродянского «Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения».

Сборник задач состоит из десяти глав, соответствующих таким же разделам учебника. В каждой главе задачника вначале приводятся примеры с подробными мотивированными решениями, а затем даются задачи для самостоятельной работы студентов.

Именно самостоятельной работе студентов в свете перестройки высшей школы для повышения качества подготовки специалистов уделяется все возрастающее внимание. Поэтому одной из целей, которая преследовалась изданием задачника, было вооружить студентов пособием для такой работы.

Самостоятельная работа закрепляет полученные навыки по расчету процессов и схем различных трансформаторов тепла.

В результате изучения курса и самостоятельной работы над задачником студенты должны:

- знать принцип работы и условия применения трансформаторов тепла различных типов;

- уметь применять свои знания для расчета схем и анализа работы трансформаторов тепла с целью определения оптимальных режимов работы при максимальной эффективности, определяемой эксергетическим КПД.

В сборник задач вошли примеры и задачи, связанные с вопросами расчета конкретных теплонасосных, холодильных и других типов трансформаторов тепла, применяемых в различных отраслях промышленности, например таких, как энергетическая, холодильная, химическая, нефтехимическая, авиационная, металлургическая, газовая, пищевая и др.

Сборник задач рассчитан на студентов энергетических, политехнических и других институтов, где читаются курсы лекций по предметам, связанным с теплоэнергетикой, холодильной, низкотемпературной и криогенной техникой, и спецкурсы, в которых рассматриваются системы производства и распределения энергоносителей, а также вопросы оптимизации режимов этих систем.

Задачник может быть полезен студентам-заочникам, а также аспирантам и инженерно-техническим работникам, связанным по роду своей деятельности с вопросами энергосбережения. Особый интерес для них могут представлять вопросы применения теплонасосных установок для целей теплохолодоснабжения в свете реализации энергетической программы и экономии топливно-энергетических ресурсов.

При подготовке задачника использовалось большое количество литературных источников, перечень которых приводится в учебнике «Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения».

В конце задачника даны ответы к задачам и приложения, включающие термодинамические диаграммы рабочих веществ и таблицы газодинамических функций.

Автор выражает глубокую благодарность доктору техн. наук, проф. Е. Я. Соколову и доктору техн. наук, проф. В. М. Бродянскому за ценные указания и советы, сделанные во время работы над рукописью.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ДАННОМУ ИЗДАНИЮ КНИГИ

(СПб. : Лань, 2024)

Мы даем тепло зимой, прохладу летом и свет круглый год!

История написания данного издания такова.

В Московском энергетическом институте есть расчетный сервер по адресу: http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_Book_New/mas/index.html, на одной из страниц которого (<http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/martynov.html>) размещены расчеты из задачника А. В. Мартынова, выпущенного в 1989 г. (см. выше). Вот перечень этих задач:

- расчет схемы аммиачной одноступенчатой компрессионной холодильной установки;
- расчет схемы аммиачной одноступенчатой холодильной установки с охладителем хладагента;
- расчет схемы одноступенчатой компрессионной холодильной установки, работающей на хладоне R-12;
- расчет схемы одноступенчатого парокомпрессионного теплового насоса;
- подбор поршневого компрессора для холодильной установки. Определение его объемных и энергетических коэффициентов. Рабочий агент — аммиак;
- определение объемной производительности и индикаторного КПД вертикального непрямоточного бессальникового компрессора ФВ-6;
- в нерасчетном режиме компрессионной холодильной установки определить холодопроизводительность, давление в испарителе, температуры паров хладагента и хладоносителя на выходе из испарителя;
- определение параметров в характерных точках процесса и построение процесса в h – ξ -диаграмме;
- расчет схемы водоаммиачной абсорбционной установки периодического действия;
- расчет схемы бромисто-литиевой абсорбционной установки;
- определение основных геометрических размеров пароструйного компрессора;
- определение основных геометрических размеров струйного эжектора;
- расчет схемы воздушного рефрижератора с детандером;
- расчет дроссельного оживителя воздуха, работающего по схеме Линда;
- расчет схемы Гейландта оживителя воздуха, работающего по схеме Линда;
- расчет схемы трехступенчатой компрессионной установки для производства твердого диоксида углерода CO_2 ;
- расчет схемы идеальной газовой холодильной установки, работающей по циклу Джоуля;

—определение конечного давления сжатия воздуха, его температуры в характерных точках процесса, тепловых нагрузок аппаратов, мощности компрессора и детандера, холодильного коэффициента и эксергетического КПД реальной газовой холодильной установки, работающей по циклу Джоуля;

—расчет схемы реальной газовой (воздушной) холодильной установки с регенерацией;

—определение параметров в характерных точках процесса, мощности машин и тепловых нагрузок аппаратов, холодильного коэффициента, удельных затрат энергии и эксергетического КПД воздушной регенеративной холодильной установки, работающей по разомкнутой схеме;

—определение параметров в характерных точках процесса, потребляемой мощности, удельных затрат энергии, холодильного коэффициента и эксергетического КПД газовой (воздушной) установки Гиффорда — Макмагона с вытеснителем;

—определение холодопроизводительности, расхода гелия, затраченной работы и мощности, эксергетического КПД газовой машины, работающей по обратному циклу Стирлинга.

На сайте после названия задачи даны ее сканы и «живое» решения с помощью Mathcad-сервера. Посетитель сайта мог изменить исходные данные и получить новый ответ.

Наступили новые сложные времена, заставившие отказаться от зарубежных программ и обратиться к отечественным разработкам. В связи с этим и по другим причинам задачи пособия, а также новые задачи были решены в среде отечественной свободно распространяемой физико-математической программы SMath Studio (далее SMath) с прикрепленными к ней приложениями CoolProp Wrapper и WaterSteamPro для определения теплофизических свойств рабочих тел. Это стало главной причиной появления данной книги, которую читатель держит в руках или открыл на своем компьютере.

В пособии даны также сведения о решении в среде SMath алгебраических и дифференциальных уравнениях, оптимизации, работе с единицами измерения, программировании, построении графиков и диаграмм и многом другом.

ГЛАВА 1. SMATH STUDIO И COOLPROP

В данной главе будут кратко описаны функции из приложения CoolProps Wrapper по теплофизическим свойствам (далее — ТФС) теплоносителей и рабочих веществ, которые будут использоваться в вычислениях, описанных в последующих главах.

1.1. Установка CoolProp Wrapper в среду SMath Studio

Для того чтобы использовать в расчетах функции пакета CoolProp Wrapper, необходимо установить данное дополнение (плагин) в программу SMath Studio (далее просто SMath).

Для этой операции достаточно на панели управления SMath зайти во вкладку «Сервис» → «Дополнения» (откроется «Менеджер расширений») → «Галерея онлайн». Далее в «Галерее онлайн» необходимо прокруткой или через строку «Быстрый поиск» найти позицию CoolProp Wrapper и кликнуть по ней два раза левой кнопкой мыши для установки — см. рис. 1.1–1.3.

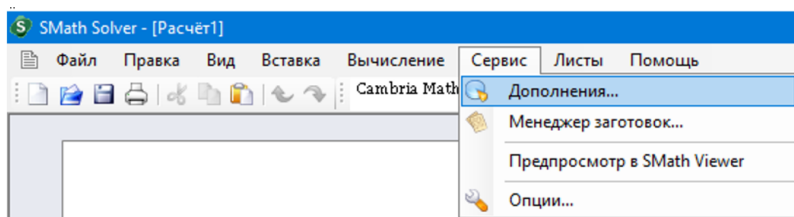


Рис. 1.1

Вкладка «Сервис» и «Дополнения»

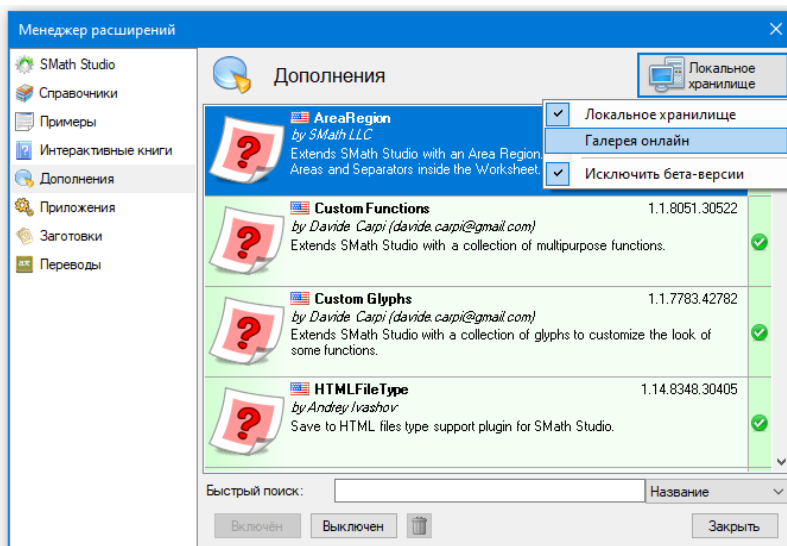


Рис. 1.2

Открытие раздела «Галерея онлайн» в «Менеджере расширений»

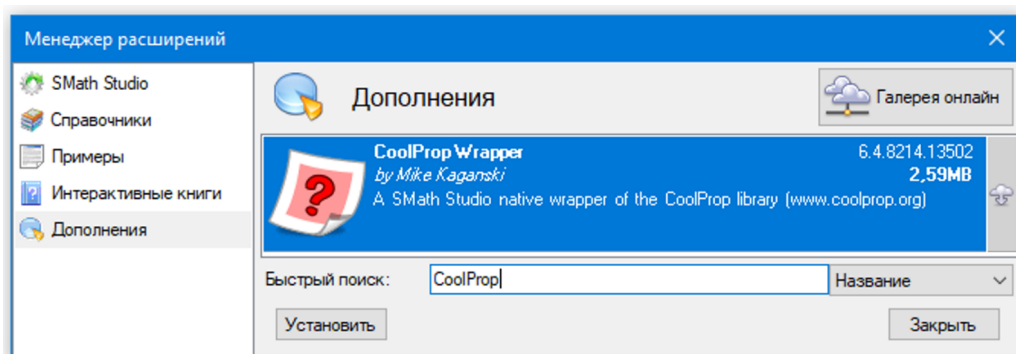


Рис. 1.3

Поиск пакета CoolProp Wrapper

После установки дополнения оно появится во вкладке «Локальное хранилище» (рис. 1.4) и пропадет во вкладке «Галерея онлайн» (рис. 1.2).

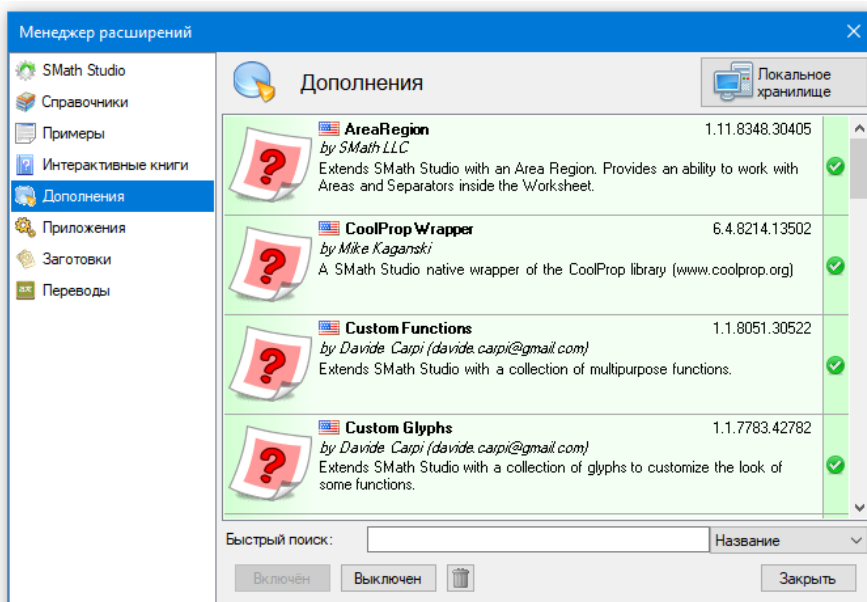


Рис. 1.4

*CoolProp Wrapper в разделе «Локальное хранилище»
в «Менеджере расширений» после установки*

После этого можно начинать пользоваться функционалом данного дополнения.

Убедиться в том, что данный пакет установлен на вашем компьютере можно и так — набрать на клавиатуре латинские буквы соо и увидеть выпавший список функций, имена которых начинаются на эти буквы (рис. 1.5).

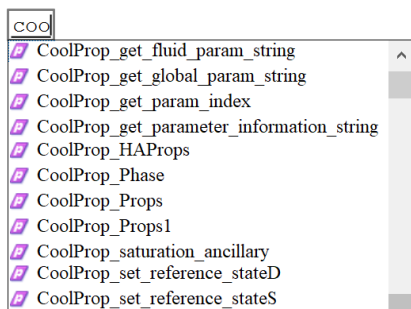


Рис. 1.5

Выпадающий список функций пакета CoolProp Wrapper

1.2. Основные функции пакета CoolProp Wrapper

Многим пользователям будет достаточно вызова только «главной» функции `CoolProp_Props()` для нахождения ТФС чистых и псевдоочищенных жидкостей, а также их смесей.

К примеру, на рисунке 1.6 показано, как можно определить температуру насыщения воды и водяного пара при давлении 1 атм. Температура выдается в кельвинах, которые можно заменить на другие единицы и шкалы температуры. Допустимо также изменить число значащих цифр в ответе (см. рис. 2.3 в главе 2).

Пример. Нахождение температуры насыщения воды при давлении 1 атм, выраженная в К

```
CoolProp_Props("T"; "P"; 1 атм; "Q"; 0; "Water")=373,124 К
```

Рис. 1.6

Определение температуры насыщения воды через функцию CoolProp Props

В данном примере вызова функции первый аргумент — это выходное свойство, которое будет возвращено из дополнения CoolProp, — температура. Второй и четвертый аргументы — это входная пара ТФС, определяющая точку состояния, в которой будет вычисляться выходное свойство — давление и степень сухости. Выходное свойство и свойства входной пары являются текстовыми строками и должны быть заключены в кавычки. Третий и пятый аргументы являются конкретными значениями свойств входной пары и будут определять точку состояния. В данном примере пятым аргументом (степень сухости) может быть числовое значение в интервале от нуля (жидкость на линии насыщения) до единицы (насыщенный пар). Шестой (последний) аргумент — это указание на жидкость (вещество), для которой будет рассчитываться выходное свойство. Это тоже строка в кавычках. В данном случае нас интересует вода, поэтому там записано "Water". Можно также записать здесь "water", "H₂O" или "R718".

В приложении CoolProp Wrapper используются уравнения формуляции Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара IAPWS-95 для общих и научных целей и IAPWS-IF97 для промышленных целей. Необходимо отметить, что в России, в частности в отечественной программе WaterSteamPro (см. главу 2), используются уравнения формуляции IAPWS-IF97 для промыш-

ленных целей, так как она является стандартной у нас в стране для теплотехнических расчетов. В связи с этим результаты расчетов воды и водяного пара по CoolProp Wrapper могут незначительно отличаться от значений, указанных, например, в таблицах воды и водяного пара [1, 2].

Если, например, необходимо возвратить параметры не воды, а других веществ, скажем фреонов, то на месте шестого параметра необходимо указать имя (маркировку) данного вещества. Например, если необходимо при данных параметрах узнать температуру насыщения изобутана (R600a), то запись будет выглядеть так (см. рис. 1.7).

Пример. Нахождение температуры насыщения изобутана при давлении 1 атм, выраженная в К

```
CoolProp_Props("T"; "P"; 1 атм; "Q"; 0; "isobutane") = 261,401 К
```

или

Пример. Нахождение температуры насыщения изобутана при давлении 1 атм, выраженная в К

```
CoolProp_Props("T"; "P"; 1 атм; "Q"; 0; "R600a") = 261,401 К
```

Рис. 1.7

Определение температуры насыщения изобутана через функцию CoolProp Props

Узнать имена веществ для возврата их ТФС из пакета CoolProp можно на официальном сайте программы CoolProp Wrapper [3].

Если входная пара (скажем, P и T — давление и температура) определяет точку состояния, лежащую в области пара, то будет возвращено свойство пара в этой точке. Аналогичным образом если точка состояния находится в жидкой фазе, то будет возвращено свойство жидкого состояния в этой точке. Если точка состояния, определяемая входной парой, находится в пределах 0.0004% от давления насыщения, то функция из пакета CoolProp может вернуть ошибку, поскольку и жидкость, и пар определяются вдоль кривой насыщения (данная ошибка влияет также и на построение диаграмм состояния теплотехнических процессов, о чем будет сказано в следующих соответствующих разделах).

Для того чтобы получить свойства пара или жидкости вдоль кривой насыщения, необходимо предоставить входную пару, которая включает либо температуру насыщения T , либо давление насыщения P наряду со степенью сухости пара Q .

Например, при давлении насыщения 1 атм удельные массовые энтальпии жидкости и пара можно вернуть следующим образом (см. рис. 1.8).

Можно узнать информацию о веществе, используя функцию CoolProp_get_fluid_param_string(;) / "formula" ; "CAS" ; "aliases" ; "ASHRAE34" ; "REFPROP_name" ; "pure" ; "INCHI" ; «INCHI_Key" ; "CHEMSPIDER_ID" (см. рис. 1.9).

Для получения тривиальных входных данных, т. е. тех данных, которые не зависят от термодинамического состояния, можно также воспользоваться функцией CoolProp_Props1(;).

Удельная энтальпия насыщенного пара

$$h_v := \text{CoolProp_Props} ("H"; "P"; 1 \text{ атм}; "Q"; 1; "Water") = 2675,529 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная энтальпия насыщенной жидкости

$$h_L := \text{CoolProp_Props} ("H"; "P"; 1 \text{ атм}; "Q"; 0; "Water") = 419,058 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Теплота парообразования при давлении 1 атм

$$r := h_v - h_L = 2256,472 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Рис. 1.8

Определение температуры насыщения воды через функцию CoolProp

```
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "formula")="C_{2}F_{5}H_{1}"
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "CAS")="354-33-6"
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "aliases")=""
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "ASHRAE34")="UNKNOWN"
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "pure")="true"
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "INCHI")="InChI=1S/C2HF5/c3-1(4)2(5,6)7/h1H"
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "INCHI_Key")="GTLACDSXYULKMZ-UHFFFAOYSA-N"
CoolProp_get_fluid_param_string("R125"; "CHEMSPIDER_ID")="9256"
```

Рис. 1.9

Возврат информации о веществе через функцию CoolProp_get_fluid_param_string

Тривиальный параметр — это критическая температура и давление (см. рис. 1.10).

Критическая температура воды:

$$\text{CoolProp_Props1} ("H_2O"; "T_{crit}") = 373,946 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Критическое давление воды:

$$\text{CoolProp_Props1} ("H_2O"; "P_{crit}") = 22,064 \text{ МПа}$$

Рис. 1.10

Определение критической температуры и давления воды через функцию CoolProp_Props1

Также можно использовать фантомные величины в функции CoolProp_Props(; ; ; ;) (см. рис. 1.11).

В пакете SMath функция CoolProp_Props возвращает значения величин всегда в системе СИ. Поэтому при определении, например, температуры, ответ будет выводиться автоматически в кельвинах. Если определяется величина давления — то в паскалях.

Критическая температура воды:

```
CoolProp_Props ("Tcrit"; ""; 0; ""; 0; "Water") = 647,096 K
```

Критическое давление воды:

```
CoolProp_Props ("Pcrit"; ""; 0; ""; 0; "Water") = 2,206 · 107 Па
```

Рис. 1.11

Определение критической температуры и давления воды через функцию CoolProp_Props с помощью фантомных величин

Для того чтобы отобразить необходимые величины с небазовой единицей, нужно в поле ответа вручную ввести те единицы измерения, в которых необходимо выдать ответ. Пример на рисунке 1.12.

Критическая температура воды:

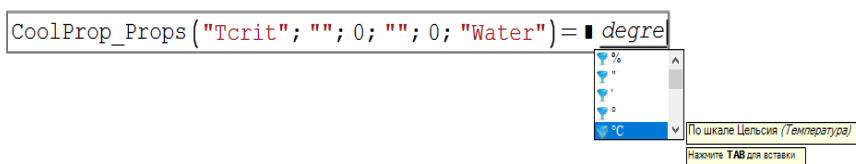


Рис. 1.12

Указание необходимой размерности при расчете в SMath Studio на примере функции CoolProp_Props

После выбора нужных единиц измерения программа выдаст нужное значение (см. рис. 1.13).

Критическая температура воды:

```
CoolProp_Props ("Tcrit"; ""; 0; ""; 0; "Water") = 373,946 °C
```

Критическое давление воды:

```
CoolProp_Props ("Pcrit"; ""; 0; ""; 0; "Water") = 22,064 МПа
```

Рис. 1.13

Определение критической температуры и давления воды через функцию CoolProp_Props в нужных размерностях

Стоит также отметить, что при переводе значения температуры из минусовых градусов Цельсия в кельвины в среде SMath может происходить следующее (см. рис. 1.14).

```
t := - 25 °C = - 298,15 K
```

Рис. 1.14

Некорректный перевод отрицательных значений градусов Цельсия в кельвины в SMath Studio

Исправить такой некорректный ответ помогут скобки (см. рис. 1.15).

$$t := (-25) \text{ } ^\circ\text{C} = 248,15 \text{ K}$$

Рис. 1.15

Перевод отрицательных значений градусов Цельсия в кельвины в SMath Studio

Функция CoolProp_Phase(; ; ;) используется для нахождения фазового состояния вещества (см. рис. 1.16).

```
CoolProp_Phase("P"; 1 атм; "T"; 300 K; "Water")="liquid"
CoolProp_Phase("P"; 1 атм; "T"; 500 K; "Water")="gas"
```

Рис. 1.16

Определение фазового состояния вещества через функцию CoolProp_Phase

Функция возвращает фазовое состояние в виде строки (текст в кавычках) с соответствующим обозначением на английском языке.

Определить фазовое состояние вещества при заданных параметрах можно также в численном виде через функцию CoolProp_Props(; ; ;) с первым аргументом "Phase" (см. рис. 1.17).

Линия насыщения (0)

```
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "Q"; 0; "water")=6
```

Линия насыщения (1)

```
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "Q"; 1; "water")=6
```

Газ

```
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "T"; 500 K; "water")=5
```

Жидкость

```
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "T"; 300 K; "water")=0
```

Двухфазная область +

```
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "Q"; 0,5; "water")=6
```

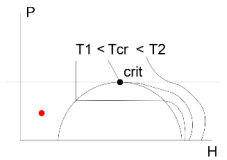
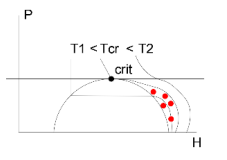
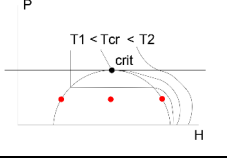
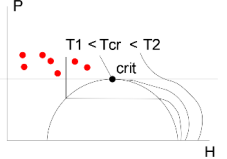
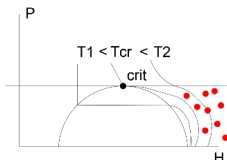
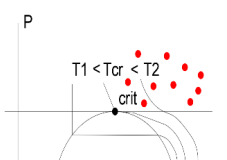
Рис. 1.17

Определение фазового состояния вещества (воды) через функцию CoolProp_Props в численном виде

Соответствующие числа, относящиеся к конкретному состоянию вещества, указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1

**Соответствие числовых индикаторов агрегатного состояния вещества
при использовании функции CoolProp_Props**

Агрегатное состояние вещества	Область	Цифровое значение фазового состояния через функцию CoolProp_Props	Вид точки состояния на принципиальном рисунке $P-h$ -диаграммы
Жидкость	$<P_{crit} ; <T_{crit}$	0	
Газ	$<P_{crit} ; <T_{crit}$	5	
Двухфазное	$<P_{crit} ; <T_{crit}$	6	
Сверхкритическая жидкость	$>P_{crit} ; <T_{crit}$	3	
Сверхкритический газ	$<P_{crit} ; >T_{crit}$	2	
Сверхкритическое состояние вещества	$>P_{crit} ; >T_{crit}$	1	

В таблице 1.2 показаны некоторые возможные входные и выходные параметры в функции CoolProp_Props. Узнать обо всех наименованиях входных и

выходных параметров можно на официальном сайте пакета [3] на странице <http://www.coolprop.org/coolprop/HighLevelAPI.html>.

Таблица 1.2

Некоторые входные и выходные параметры функции CoolProp_Props

Параметр	Единица измерения (СИ)	Возможность использовать как входные данные (<i>I</i>) / как выходные данные (<i>O</i>)	Для данного вещества константа — True	Описание (русское в разработке)
DELTA, Delta	0	<i>IO</i>	False	Reduced density (rho/rhoc) (Редуцированная плотность. Отношение плотности вещества к плотности вещества в критической точке)
DMOLAR, Dmolar	$\frac{mol}{m^3}$	<i>IO</i>	False	Molar density (Молярная плотность)
D, DMASS, Dmass	$\frac{kg}{m^3}$	<i>IO</i>	False	Mass density (Массовая плотность)
HMOLAR, Hmolar	$\frac{J}{mol}$	<i>IO</i>	False	Molar specific enthalpy (Молярная удельная энтальпия)
H, HMASS, Hmass	$\frac{J}{kg}$	<i>IO</i>	False	Mass specific enthalpy (Удельная энтальпия по массе)
P	Pa	<i>IO</i>	False	Pressure (Давление)
Q	mol / mol	<i>IO</i>	False	Molar vapor quality (Молярная степень сухости (показатель состояния вещества / степень сухости))
SMOLAR, Smolar	$\frac{J}{mol \cdot K}$	<i>IO</i>	False	Molar specific entropy (Молярная удельная энтропия)
S, SMASS, Smass	$\frac{J}{kg \cdot K}$	<i>IO</i>	False	Mass specific entropy (Массовая удельная энтропия)

Примечание: *I* — Input; *O* — Output.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru