Техническая термодинамика: расчеты на SMath

Издательство Лань, 2025 г.

Авторы

к.т.н., доцент Егорова Наталья Владимировна

д.т.н., профессор Очков Валерий Федорович

к.т.н., зав. каф. Щацких Юлия Владимировна

кафедра Теоретических основ теплотехники НИУ «МЭИ»

Аннотация книги

В учебном пособии изложена методика и приведены примеры использования отечественной свободно распространяемой физико-математической программы SMath для решения задач технической термодинамики. Учебное пособие будет полезно студентам и аспирантам, обучающимся по направлениям «Фундаментальная информатика и информационные технологии», «Теплоэнергетика и теплотехника», «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», «Ядерная энергетика и теплофизика», «Энергетическое машиностроение», «Материаловедение и технологии материалов», «Баллистика и гидроаэродинамика» и др., а также для специалистов, связанных с проблемами энергосбережения и энергоэффективности при производстве и потреблении тепловой энергии и холода.

Рецензенты:

Е.Н. БУШУЕВ – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина

К.И. КУЗНЕЦОВ, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ»

Оглавление

Предисловие 2
Глава 1 Пакет WaterSteamPro Или Обратная сторона воды 23
Глава 2. Пакет CoolProp Wrapper Или Доверяй, но проверяй! 47
Глава 3. Двигатель внешнего удаленного сгорания Или Решаем задачи термодинамики по-новому 61
Глава 4. Двигатель внутреннего сгорания Или Рисуем новые диаграммы и вспоминаем об ИИ 88
Глава 5. Расчет процесса вентиляции и кондиционирования влажного воздуха 113
Глава 6. Расчет процесса ожижения природного газа 132
Глава 7 Расчет парокомпрессионной холодильной установки 149
Глава 8. Диаграммы цикла паротурбинной установки 165
Глава 9. Паротурбинный цикл АЭС Или Считаем снизу вверх 189
Глава 10. Внутренняя теплофикация паротурбинной установки 227
Глава 11. Циклы парогазовых установок 251
Глава 12 Энергетические циклы на неводных теплоносителях 279

Предисловие

В 2024 году издательство МЭИ выпустило учебник по технической термодинамике [1], авторами которого являются А.А. Александров, В.С. Охотин и К.А. Орлов – преподаватели кафедры Теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича МЭИ. Книгу можно скачивать с сайта данного учебного пособия (см. рис. П1) http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath, которое по праву можно считать продолжением и развитием учебника [1].

www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath/

Сайт учебного поссобия "Техническая термодинамика: расчеты на SMath"

Последняя правка 13 августа 2024 г.

Примеры из учебника "Техническая термодинамика", выполненные в среде SMath Studio

№	Название	png	Оригинал	WaterSteamPro	CoolProp
1.1	Определение удельной энтальпии смеси газов	>>>	SMath pdf	SMath pdf	SMath pdf
2.1	Расчёт изменения энтропии диоксида углерода	>>>			
2.2	Расчёт вероятности самопроизвольного перехода теплоты	>>>			
2.3	Определение среднего времени повторяемости флуктуации	>>>			
3.1	Определение мощности газовой турбины	>>>	>>>	>>>	>>>
3.2	Определение степени сжатия воздуха в цикле Дизеля	>>>	>>>		>>>
5.1	Определение давления насыщения и теплоту парообразования фреона	>>>			
5.2	Определение температуры и степени сухости пара, количество сухого насыщенного пара и занимаемый им объем барабана	>>>	>>>	>>>	>>>
5.3	Определение конечного давления пара и количество отведенной теплоты	>>>	>>>		
16.3	Определить тепловой эффект реакции горения метана при p = 0,1 МПа и температуре T = 1200 K.				

Рис. П1 Главная страница сайта МЭИ

Столбец с заголовком png хранит рисунки (сканы) задач учебника [1] в виде графического файла формата **png**. Столбец с заголовком **Оригинал** хранит заархивированные (rar) SMath-файлы и их pdf-копии. Если при решении задачи были использованы пакеты WaterSteamPro и/или CoolProp Wrapper, то соответствующая ссылка на расчётный файл помещена одноименных столбцах.
После таблицы, показанной на рис. П1, на сайте идет список SMath-файлов задач данного учебного пособия.

Почти все главы учебника [1] дополнены решенными задачами (примерами), превращающими книгу в некий решебник. Вот список этих примеров по главам книги:

Глава 1. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Пример 1.1 Определение удельной энтальпии смеси газов

Глава 2. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Пример 2.1 Расчёт изменения энтропии диоксида углерода

Пример 2.2 Расчёт вероятности самопроизвольного перехода теплоты

Пример 2.3 Определение среднего времени повторяемости флуктуации

Глава 3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Пример 3.1 Определение мощности газовой турбины

Пример 3.2 Определение степени сжатия воздуха в цикле Дизеля

Глава 5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Пример 5.1 Определение давления насыщения и теплоту парообразования фреона

Пример 5.2 Определение температуры и степени сухости пара, количество сухого насыщенного пара и занимаемый им объем барабана

Пример 5.3 Определение конечного давления пара и количество отведенной теплоты

Пример 5.4 Определение изменения удельной внутренней энергии, затраченную удельной работу и количество удельной теплоты

Пример 5.5 Нахождение коэффициентов для уравнения в вириальном виде

Пример 5.6 Определение удельного объема четыреххлористого углерода

Глава 6. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Пример 6.1 Определение парциального давления водяного пара в воздухе

Пример 6.2 Определение термодинамических свойства влажного ненасыщенного воздуха

Пример 6.3 Определение изменения максимального влагосодержания воздуха

Пример 6.4 Расчет значения влагосодержания, относительной влажности, энтальпии и точки росы влажного воздуха

Пример 6.5 Определение мощности нагревателя калорифера

Глава 7. ЭКСЕРГИЯ

Пример 7.1 Определение эксергии углекислого газа

Пример 7.2 Определение потери эксергии и эксергетический КПД газовоздушного подогревателя

Глава 9. ТЕРМОДИНАМИКА ПОТОКА ВЕЩЕСТВА

Пример 9.1 Определение скорости истечения и площади выходного сечения сопла

Пример 9.2 Определение площади минимального и выходного сечений сопла

Пример 9.3 Определение давления и температуры воздуха на выходе из диффузора

Пример 9.4 Определение давления фреона перед дросселем и его состояние

Глава 10. ПРОЦЕССЫ В КОМПРЕССОРАХ

Пример 10.1 Определение мощности привода воздушного компрессора

Пример 10.2 Определение мощности привода аммиачного компрессора

Пример 10.3 Определение мощности и изотермического КПД компрессора

Пример 10.4 Определение мощности привода, температуру сжатого воздуха и количество теплоты, отводимой от компрессора

Глава 11. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Пример 11.1 Определение работы паровой турбины и питательного насоса, а также термического КПД цикла

Пример 11.2 Определение энергетического и эксергетического показателя паротурбинной установки

Пример 11.3 Определение термического КПД паротурбинного цикла с промперегревом

Глава 12. ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Пример 12.1 Определение термического КПД обратимого цикла простой ГТУ

Пример 12.2 Определение термического и внутреннего КПД цикла, мощности турбины, компрессора и всей ГТУ

Пример 12.3 Определение мощности, термического и внутреннего КПД ГТУ в схеме ГТУ-ТЭЦ

Глава 13. ЦИКЛЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Пример 13.1 Определение массового расхода пара, температуры уходящих газов, количества теплоты, передаваемой за единицу времени котлом-утилизатором паротурбинной установке и КПД КУ

Пример 13.2 Определение мощности и КПД ГТУ, ПТУ и ПГУ

Глава 14. ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Пример 14.1 Определение термического КПД цикла ДВС

Пример 14.2 Определение удельной работы цикла ДВС

Пример 14.3 Определение температуры в характерных точках цикла ДВС

Глава 15. ОБРАТНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ И ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Пример 15.1 Определение максимально возможной холодопроизводительности холодильной установки

Пример 15.2 Определение минимально возможного уровня потребляемой мощности холодильной установкой

Пример 15.3 Определение минимального значения мощности, которую будет потреблять холодильная установка

Пример 15.4 Определение максимально возможного количества теплоты, которое холодильная установка может передавать воде

Глава 16. ЭЛЕМЕНТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Пример 16.1 Виды записи теплового эффекта для одной и той же химической реакции

Пример 16.2. Определение теплового эффекта реакции сгорания метана

В главах 4, 7 и 8 примеров нет.

В учебнике «Техническая термодинамика» [1] задачи решены традиционным способом – записью математических выражений с помощью редактора формул (рис. П5 – см. ниже), подстановкой в формулы числовых значений переменных (см. рисунок П14) и подсчетом ответа на калькуляторе – отдельном или входящим в состав Windows (рис. П12). Свойства рабочих тел при этом брались либо из справочника [2], либо через специализированные калькуляторы – см. рис. П2 и П3, поставляемые пользователям вместе с авторским пакетом WaterSteamPro [3].

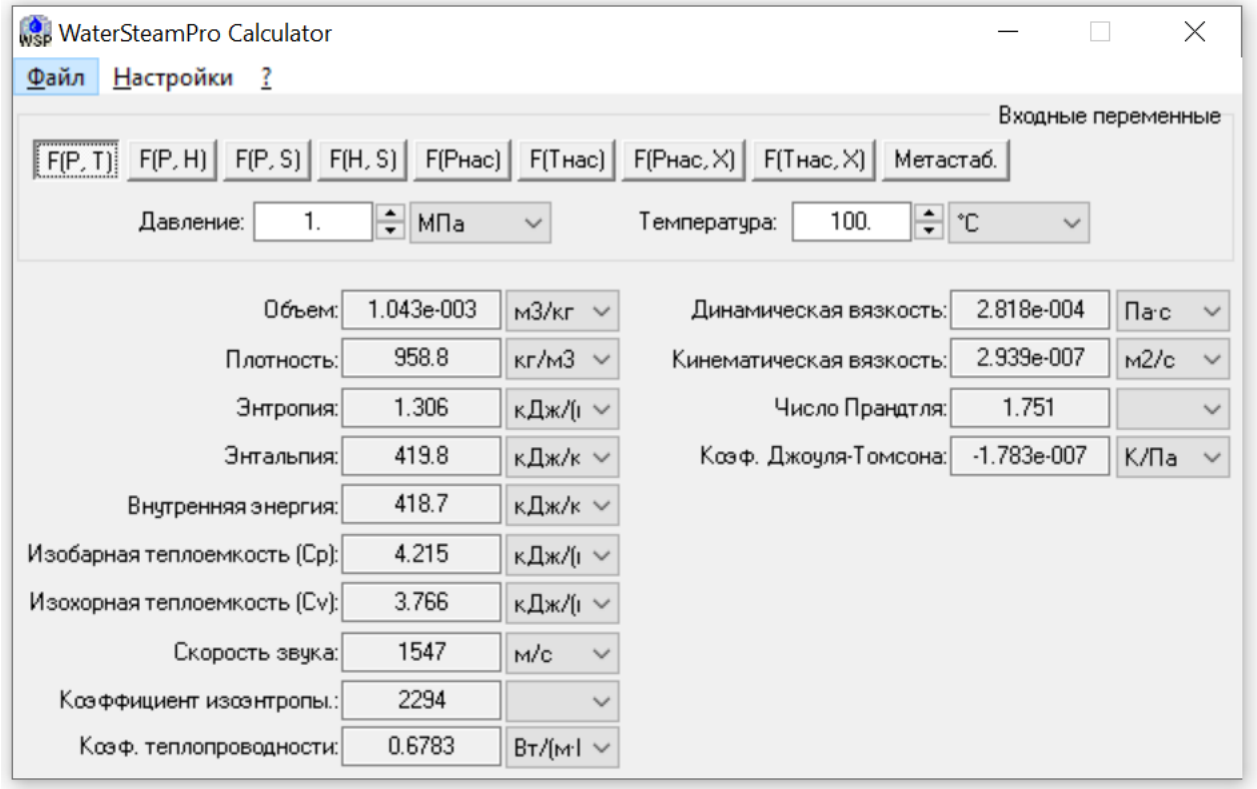


Рис. П2 Калькулятор свойств воды и водяного пара

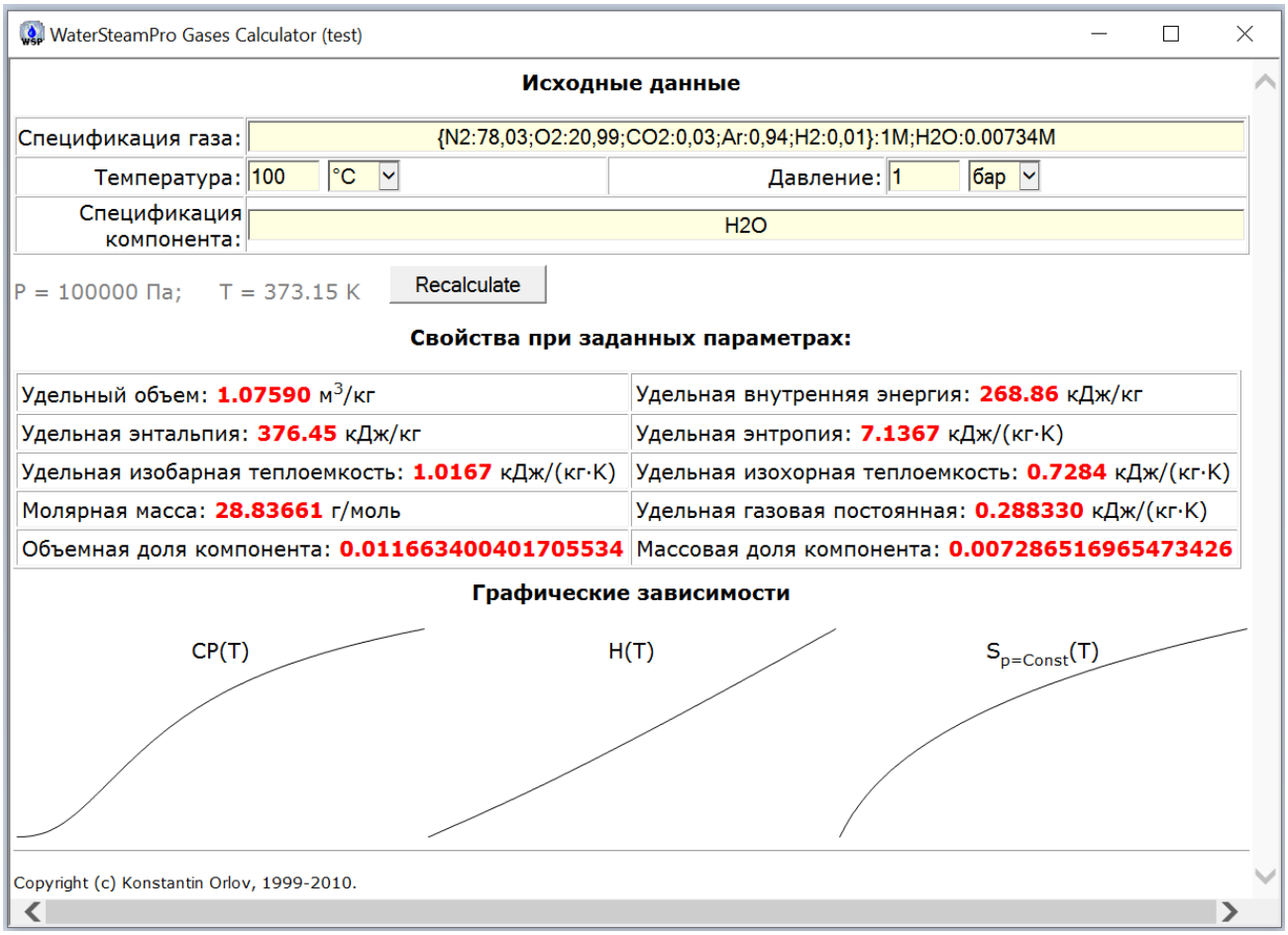


Рис. П3 Калькулятор свойств газов

Авторы данного учебного пособия с разрешения авторов учебника [1] по-новому решили вышеперечисленные задачи в среде отечественного свободно распространяемого физико-математического пакета SMath Studio (далее SMath) [4] и разместили решения на сайте http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath, который, повторяем, является сайтом и данного учебного пособия, где читатель также найдет файлы решений новых задач.

В обновленные решения учебника [1] были вставлены функции, возвращающие свойства рабочих тел (см. главы 1 и 2), а также графика, что послужило некой отправной точкой данного учебного пособия. Это второй подобный книжный теплотехнический проект – см. [5, 6]. При этом было особо акцентировано внимание на следующих перечисленных моментах, вносящих некоторые различия и в описании, и в ответах старых и новых решений.

1. Температура и давление

В ручных расчетах при работе с температурой строчную букву t отводят под хранение этой физической величины по шкале Цельсия (t = 18, например), а затем сразу вводят такой оператор T = t + 273.15, переходя тем самым к абсолютной температурной

шкале – к кельвинам. При работе с SMath с подключенным механизмом размерностей это действие будет лишним, что поясняет рис. П4: значение температуры, введенное по любой шкале, в частности, по шкале Цельсия, сразу вводится в переменную с именем T, которая будет хранить значение по абсолютной шкале. Более эмоционально эта особенность компьютерных расчетов описана в главе 3.

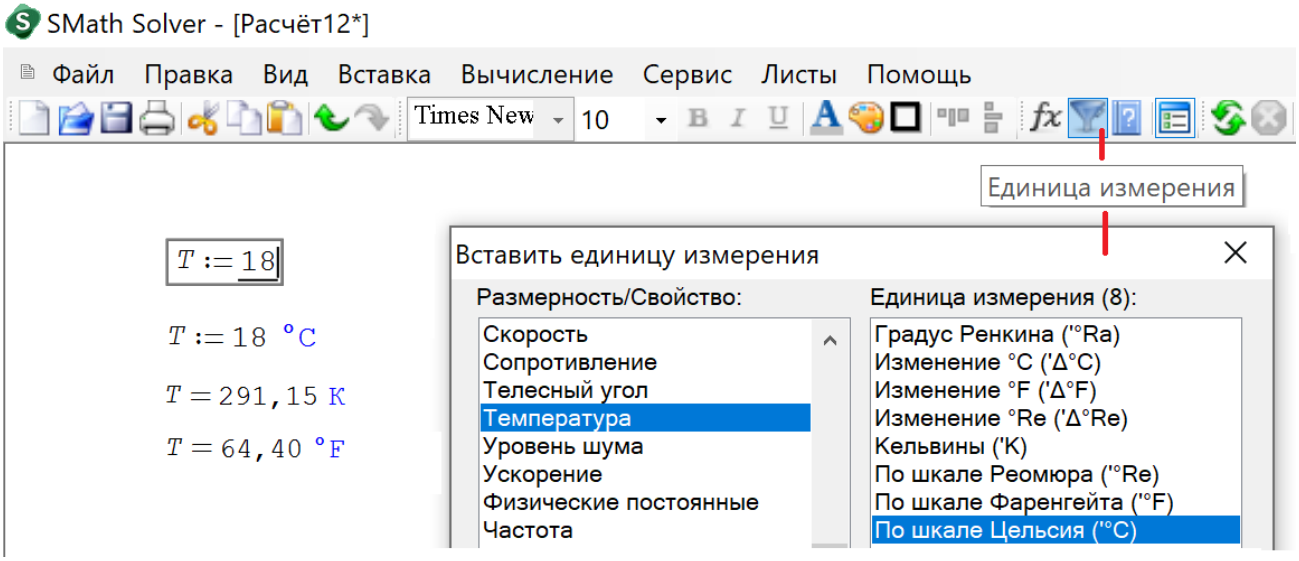


Рис. П4 Работа с температурой в среде SMath

Эта особенность наименования температуры каким-то боком касается и давления. Иногда в расчетах под хранение избыточного давления отводят прописную букву p, а под хранение абсолютного давления – заглавную P. Этот нюанс проявился и этой книге – в главе 6 абсолютное давление маркируется заглавной буквой P, а в других главах прописной p. По-видимому, мы находимся в некоем переходном периоде, когда температура и давление – самые используемые параметры в термодинамических расчетах маркируются и так, и эдак – прописными и заглавными буквами [7]. Но, как правило, давление обозначают прописной буквой p. Но если оно избыточное или вакуумное, то на это указывают в нижнем индексе. Заметим также, что пара букв h-H используются для обозначения удельной[1] (кДж/кг) и общей (кДж) энтальпий. Это касается и энтропии, и никаких вопросов и разночтений тут не наблюдается.

Авторы просят у читателей прощения за разное написание (прописная/заглавная) букв в задачах.

[1] В одном солидном теплотехническом журнале проскочила такая опечатка – удельная теплопроводность.

2. Имена переменных

В ручных расчетах пользовать волен давать именам переменных сложные конструкции с верхним и нижним индексами, пользуясь, например, вкладкой Уравнения текстового редактора Word (см. рис. П5) или каким-либо другим инструментом – программой LaTex, например. Так, к примеру, имя одной переменной в Примере 10.2 (см. список выше) оказалось таким $\eta_{ex}^{\text{ПП}}$. При расчетах же в среде SMath эту переменную приходится переименовывать примерно так – $\eta_{ПП\ ex}$. Для этого в расчет вводится греческая буква η (h+Ctrl g – Greek), за которой ставится точка, означающая начало нижнего текстового индекса. Далее вводятся две буквы $ПП$ (промежуточный пароперегреватель) и нажимается аккорд клавиш Shift-Ctrl-k, изменяющий цвет курсора с синего на красный. Красный цвет означает некий аварийный режим, позволяющий ввести в имя переменной спецсимволы – пробел, например. Затем после пробела в нижнем индексе дописываются две буквы ex (эксергия) – и переменная готова. Повторное нажатие аккорда клавиш Shift-Ctrl-k возвращает курсору синий цвет, что позволяет задействовать оператор (: =) для ввода нужного значения в переменную $\eta_{ПП\ ex}$. Без изменения цвета курсора с красного на синий к имени переменной будет приписан символ «:», т. е. будет продолжаться редактирование такого усложненного имени переменной.

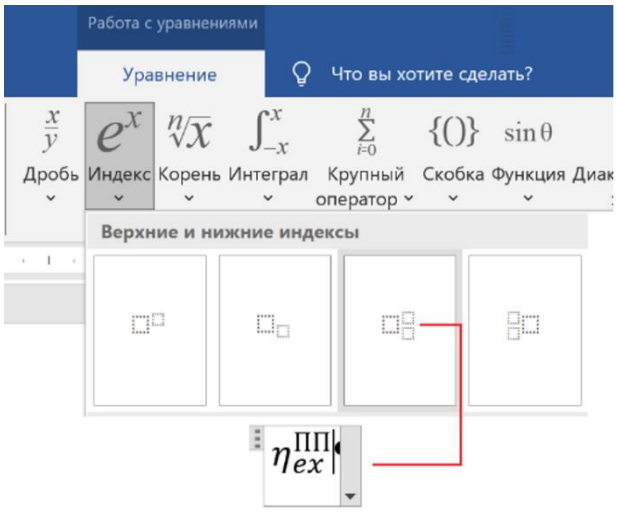


Рис. П5 Вод сложной переменной в среде Word

Аккорд клавиш Shift-Ctrl-k в среде SMath позволяет создавать такие сложные имена единиц измерения, востребованные в термодинамике: `kJ/kg (кДж/кг)` и `kJ/(kg K)`[2], в которых четыре спецсимвола: деление, открывающаяся круглая скобка, закрывающаяся

[2] Единице измерения J/(mole K) планировалось дать имя Md (Мд) в честь Д.И. Менделеева. Но этот проект, увы, не прошел.

круглая скобка и пробел, означающий знак умножения. Эти переменные можно связать со встроенными единицами измерения (килоджоуль, килограмм[3] и кельвин) и использовать их в теплотехнических расчетах. Пакет SMath по умолчанию выводит значение удельной энтальпии в греях (Gy или Гр – единица измерения поглощённой дозы радиации), которые сразу нужно заменить на kJ/kg или кДж/кг. А лучше на Дж/г – см. сноску 3.

Следует подчеркнуть, что верхний индекс у переменной в среде SMath воспринимается как показатель степени, что вносит неопределенность при изучении расчётов. Да и нижний индекс тоже несет в себе некую двусмысленность. Это и часть имени переменной, сдвинутая вниз (текстовый индекс, появляющийся после проставления точки – см., например, обозначения входного и выходного значения давления на рис. П16[4]). Но нижний индекс также это и оператор работы с элементом массива, когда вместо точки проставляется открывающаяся квадратная скобка или нажимается соответствующая скобка на панели инструментов. Это одна из причин, почему индексами в компьютерных расчетах злоупотреблять не стоит. Но без них трудно обойтись, принимая во внимание традиционные обозначения переменных и констант, возникших задолго до появления компьютеров.

Стандарты написания рукописей статей и книг предписывают латинские имена переменных прописывать курсивом, а русские – прямым шрифтом[5]. Это правило вступает в противоречие с современными информационными технологиями, описанными, в частности, в этой книге. В среде SMath встроенные имена переменных и функций имеют прямой шрифт, а пользовательские подобные идентификаторы прописаны курсивом. И это не зависит от того, используем ли мы буквы кириллицы или латиницы. Единицы измерения имеют прямой шрифт, но зеленый цвет. Это позволяет, в частности, не смешивать в расчетах пользовательскую переменную *m* (масса) и встроенную единицу длины m (см., например рис. 3.3 в главе 3, где m – это и метр, и масса воды).

Есть некоторые ограничения на использование букв кириллицы в идентификаторах – в именах переменных и функций. Так, к примеру, при аналитических преобразованиях в среде SMath с помощью приложения Maple (см. пример на рис. 3.14 в главе 3) замена букв в индексах *W* и *S* на *B* и *П* (вода и водяной пар) приведет к ошибке в ответе – русские

[3] Можно рекомендовать для экономии памяти компьютера использовать не единицу кДж/кг, а единицу Дж/г. Суть дела это не меняет, зато выговаривать все это будет проще. Но, привычка – вторая натура! Теплотехников к такому разумному сокращению уже не приучишь!

[4] Это не 16 в степени 3, а верхний индекс, указывающий на ссылку.

[5] Этим, например, визуально отличают латинскую букву це (C-c – си в английской транскрипции), от русской буквы эс (С-с).

буквы будут заменены на непонятные символы. Здесь можно порекомендовать задействовать латинскую букву B и греческую заглавную букву пи Π. Но это может превратить расчёт в головоломку, так что лучше сразу работать с латинскими буквами.

Для ввода сложных имен переменных и функций с разного рода крышечками и степенями, можно обратиться к команде Вставка / Символ текстового редактора Word – см. рис. П6. Цифра 2 в форме нижнего индекса, подсвеченная на рис. П6, может, к примеру использоваться для формирования переменной H_2O, хранящую маркировку флюида – воды и водяного пара для функций пакетов CoolProp Wrapper и WaterSteamPro.

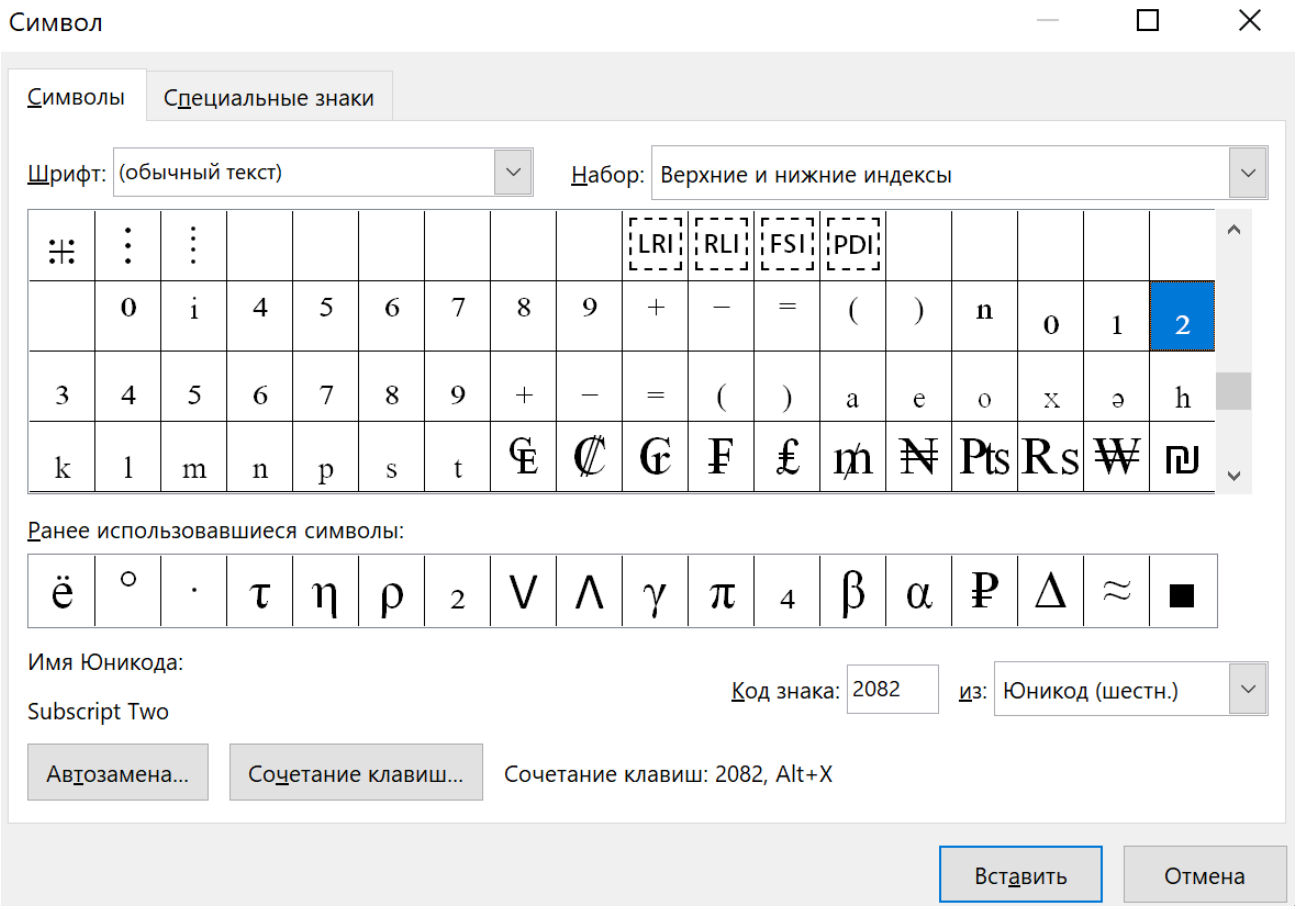


Рис. П6 Таблица символов

Перефразируя известную поговорку, можно сказать так: «Покажи мне твои ранее использованные символы, и скажу тебе, какой текст ты сейчас пишешь!».

Разработчики программ и пользователи компьютеров в этом отношении идут навстречу друг к другу. В математических программах вводятся новые инструменты формирования имен переменных, а специалисты в различных областях знаний изменяют написание некоторых обозначений – отказываются от того, чего нельзя использовать в

расчетной программе. Но это сделать не всегда удается, т.к. некоторые переменные и константы имеют устоявшиеся имена с нижними и верхними индексами, а также с разного рода «крышечками» и штрихами. Это позволяет быстро понять, что это за величина без всяких дополнительных комментариев. В термодинамике, например, штрих у имени переменной означает, что речь идет о параметрах насыщенной воды, а два штриха – о параметрах насыщенного пара.

3. Число выводимых знаков в ответе

В ручных расчетах пользовать сам произвольно устанавливает количество значащих цифр в числовом ответе. Каких-то общих правил на этот счёт нет. Считается, что в ответах достаточно иметь 4 значащие цифры. А вот в таком примере этого недостаточно. Пользователь вводит в расчет значение температуры и тут же для контроля выводит его на печать: T := 20°C = 293.2 K. Четырех знаков в этом примере будет явно недостаточно: здесь нужны 5 знаков: T := 20°C = 293.15 K. Такой ответ подчеркивает тот факт, что температурные шкалы Кельвина и Цельсия сдвинуты на 273.15 градусов. А другом примере – при выводе на печать температуры в конденсаторе турбины даже четыре знака будут излишними, не говоря уже о пяти: T = 28.784°C – здесь вполне достаточно и трех знаков T = 28.8°C, учитывая точность измерения температуры в целом.

В среде же SMath можно зафиксировать такую настройку – см. рис. П7.

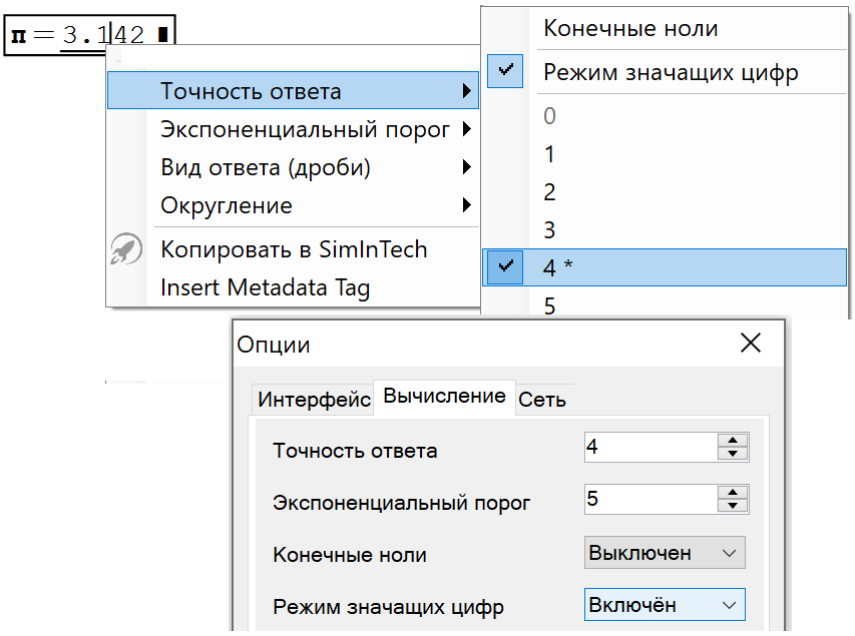


Рис. П7 Округление ответа в среде SMath

Настройка, показанная на рис. П7, позволяет, к примеру так выводить значения плотности и удельного объема воды при нормальных условиях (пакет WaterSteamPro) – см. рис. П8.

$$\text{wspVPT}(1\ \text{atm},\ 18\ °\text{C}) = 0.001001\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{wspDPT}(1\ \text{atm},\ 18\ °\text{C}) = 998.6\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Рис. П8 Подсчет удельного объема и плотности воды

Ответы, выводимые на печать, могут смущать пользователей пакета SMath и в таком плане. На рисунке П9 показаны значения удельной энтропии сухого воздуха в двух состояниях – при разных значениях температуры и давления. Подсчет ведется по двум пакетам – CoolProp Wrapper (глава 3) и WaterSteamPro (глава 2, которые выдали совершенно разные ответы для значений удельной энтропии, но практически одинаковые ответы для разности этих величин.

$T_0 := 20\ °C \qquad p_0 := 1\ atm$

$s_{0CoolProp} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T_0, "P", p_0, "Air") = 3.863\ \frac{kJ}{kg\ K}$

$s_{0WSP} := \text{wspgSGSPT}("Air", p_0, T_0) = 6.844\ \frac{kJ}{kg\ K}$

$T_1 := 500\ °C \qquad p_1 := 10\ atm$

$s_{1CoolProp} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T_1, "P", p_1, "Air") = 4.205\ \frac{kJ}{kg\ K}$

$s_{1WSP} := \text{wspgSGSPT}("Air", p_1, T_1) = 7.185\ \frac{kJ}{kg\ K}$

$\Delta s_{CoolProp} := s_{1CoolProp} - s_{0CoolProp} = 0.3410\ \frac{kJ}{kg\ K}$

$s_{WSP} := s_{1WSP} - s_{0WSP} = 0.3411\ \frac{kJ}{kg\ K}$

Рис. П9 Вывод «на печать» значений удельной энтропии

Дело в том, что у отмеченных пакетов разные базовые точки – разные значения нижнего предела интеграла, для подсчета удельной энтропии, энтальпии и внутренней энергии газов. По большому счету значения этих величин ни о чем не говорят – важно знать только разности этих величин, когда точка отсчета (нуль по шкале Цельсия или нуль по абсолютной шкале, например) не играют никакой роли. Кстати, в ответе при подсчете разности удельных энтальпий по пакету CoolProp Wrapper специально показан нуль в конце: `0.3410`. Это достигается установкой «галочки» у позиции Конечные нули в диалоговом окне, показанном на рис. П7.

4. Проблема округления

Результаты ручных и компьютерных расчетов могут отличаться из-за того, что пользователь часто оперирует предыдущими округленными до 3-4 знаков ответами, а компьютер ответами, округленным до пятнадцатого знака после запятой. Эту особенность поясняет рис. П10, где переменная c подсчитывается дважды – с использованием 15 знаков после запятой и с использованием 4 знаков после запятой. Погрешность оказалась

незначительной, но в ряде случаев она может накапливаться и приводить к ощутимым различиям в ответах ручных и компьютерных вычислений.

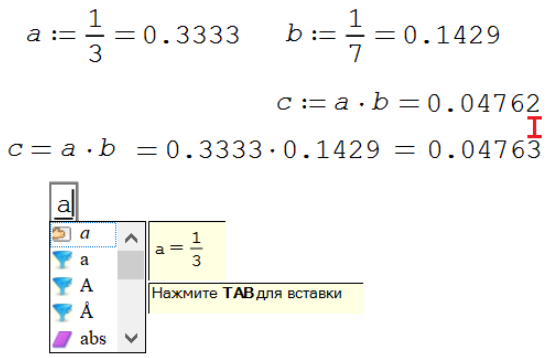


Рис. П10 Округление ответа в среде SMath

Причины отличий в ответах ручных и компьютерных вычислений заключаются и в том, что пользователь может обращаться к таблицам [2], где значения округлены, а в ряде случаев нужно делать довольно грубую интерполяцию или решать обратную задачу. В бумажном справочнике есть, например, значения плотности, в зависимости от давления и температуры, а нужно узнать температуру при известной плотности и давлении. Автоматическая такая работа показана на рис. В3 во Введении (обращение к SMath-функции `solve`). В такой ситуации лучше обратиться к Калькулятору WaterSteamPro (см. рис. П2), где есть некоторые обратные функции.

Попутно заметим, что в переменных пакета SMath числовые могут хранится с абсолютной точностью – не 0,3333, а 1/3 – см. нижнюю часть рис. П10 с выпадающей подсказкой о том, что на самом деле хранит переменная *a*. Арифметика пакета SMath не численная, а символьная. Это несколько замедляет расчеты, но делает их более точными. Сами же переменные выводить «на печать» можно двояко – см. рис. П11.

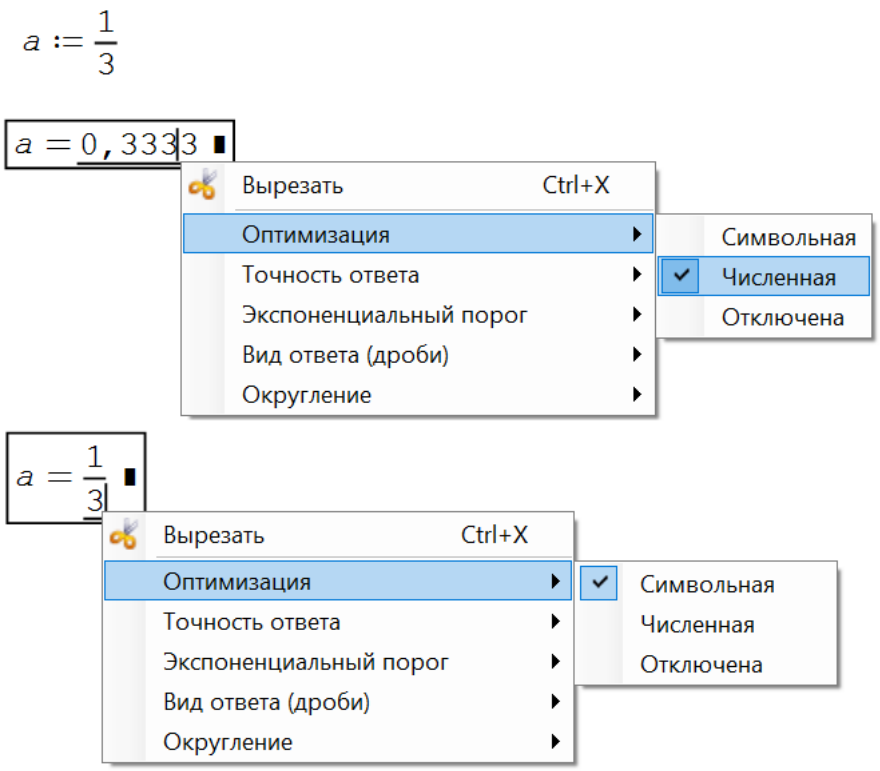


Рис. П11 Числовой и символьный вывод ответа на печать

5. Дублирование формул с числовыми значениями переменных

На рисунке П6 можно видеть такое выражение (см. также рис. П14):

$c = a \cdot b = 0.3333 \cdot 0.1429 = 0.04763.$

Пользовать ввел формулу $a \cdot b$, а затем повторил ее, заменив переменные на то, что они хранят. Это делается для того, чтобы кто-то посторонний (проверяющий) смог проконтролировать правильность арифметических вычислений в расчете с помощью, например, калькулятора, встроенного в Widows – см. рис. П12.

Рис. П12 Калькулятор Windows

Пользователи пакета SMath на своем форуме обсуждали такое дублирование формул – см. [8], и второй автор этого учебного пособия высказал там свое мнение. Оно такое.

В докомпьютерную эру в НИИ, проектных организациях и инженерных бюро были специально назначенные люди или целые отделы, где сидели сотрудники и чисто механически перепроверяли на арифмометрах, логарифмических линейках или электронных калькуляторах сделанные в других отделах ручные расчёты. Равняется ли двойка, помноженная на двойку, четвёрке, а не пятёрке или тройке, грубо говоря. Ошибка в ответе могла произойти и из-за промаха при переносе числа со счетного устройства (см. рис. П12) на бумагу. Для этих-то проверяющих и приходилось дублировать формулы, подставляя вместо переменных числа[6]. Компьютер же с сертифицированной расчетной программой – с SMath, например, не делает арифметических ошибок. Тем не менее, устаревшие стандарты публикации расчетов требует такого дублирования. Современный проверяющий расчёт – преподаватель, например, может при возникновении сомнений просто вывести «на печать» переменные, записанные в формуле. Тем не менее, многие преподаватели требуют от студентов придерживаться устаревших правил – дублировать числа в формулах. Из-за этого студентам приходиться дублировать весь SMath-расчет – переписывать его вручную (ручкой на бумаге) или в среде Word, т.е. идти на некий обман – надувательство преподавателя (см. рис. В1 во Введении). Переписывать расчёта студентам приходится и потому, что требования по оформлению впускных квалификационных работ не разрешают вставлять в тексты сканы расчетов, как это, например, делается в данном учебном пособии. Хотя в ГОСТ 7.32-2017, регламентирующим оформление отчетов по НИР, нет прямого запрета на это.

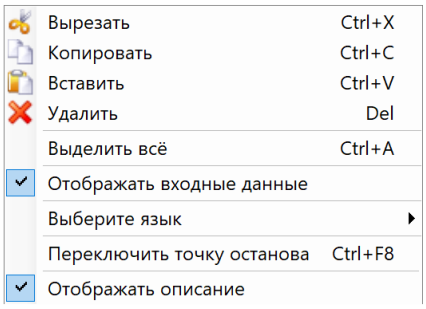
Выводить численные значения переменных, записанных в формуле, можно и так – см. рис. П13.

[6] В среде пакета Mathcad (американский SMath) такую работу проводит оператор символьной математики explicit, который в протоколе расчета можно скрыть – см. https://community.ptc.com/t5/Mathcad/Explicit-Issue-Prime-10-0/m-p/950903

$S := 123\ \mathrm{km}$ Расстояние

$t := 2\ \mathrm{hr} + 45\ \mathrm{min}$ Время в пути

$v := \frac{S}{t} = 44.73\ \mathrm{kph}$ Скорость



где

$\mathrm{description}(S) = \text{"Расстояние"} \qquad S = 1.23 \cdot 10^5\ \mathrm{m}$

$\mathrm{description}(t) = \text{"Время в пути"} \qquad t = 9900\ \mathrm{s}$

Проверка $\qquad \frac{1.23 \cdot 10^5}{9900} \cdot \frac{3600}{1000} = 44.73$

Рис. П13 Вывод численных значений переменных формулы

В приведенном примере расчёта скорости комментарии введены не текстовой вставкой, а командой локального меню «Отображать описание». Текстовые вставки вводятся в расчет после нажатия клавиши «кавычки», а желтые описания – после отдачи команды из списка, показанного на рис. П13, появляющегося после нажатия на формуле правой кнопки мыши. Кстати, в текстовые комментарии можно вставлять формулы. Этой возможностью авторы книги часто пользовались – см., например, начало рис. 3.3 в главе 3.

Дублировать численное значение переменных в формулах можно и так, как показано на рис. 11.3 в главе 11: писать под формулой слово «где» и выводить «на печать» значения переменных, записанных в формуле.

6. Промахи и неточности в ручных расчетах

В ручных расчетах человек может о чем-то умалчивать, что-то не договаривать. Компьютер же такие умолчания и недоговорённости не пропускает. Конкретный пример.

На рисунке П14 показан фрагмент ручного и компьютерного расчета из Примера 11.2 учебника по технической термодинамике [1]. Компьютерный расчет выявил то обстоятельство, что переменная s_4 пустая. Тем не менее, откуда-то взялось её численное

значение (9,1476), которое было подставлено в формулу расчета (третья строка на рис. П14). При конвертировании же этого расчета в среду SMath появилось сообщение об ошибке (четвертая строка), которую пришлось исправлять – отдельно рассчитывать значение переменной s_4 (9,1297). Разница в значениях удельной энтропии в точке 4 (9,1476 и 9,1297) объясняется нюансами, описанными выше в п. 4.

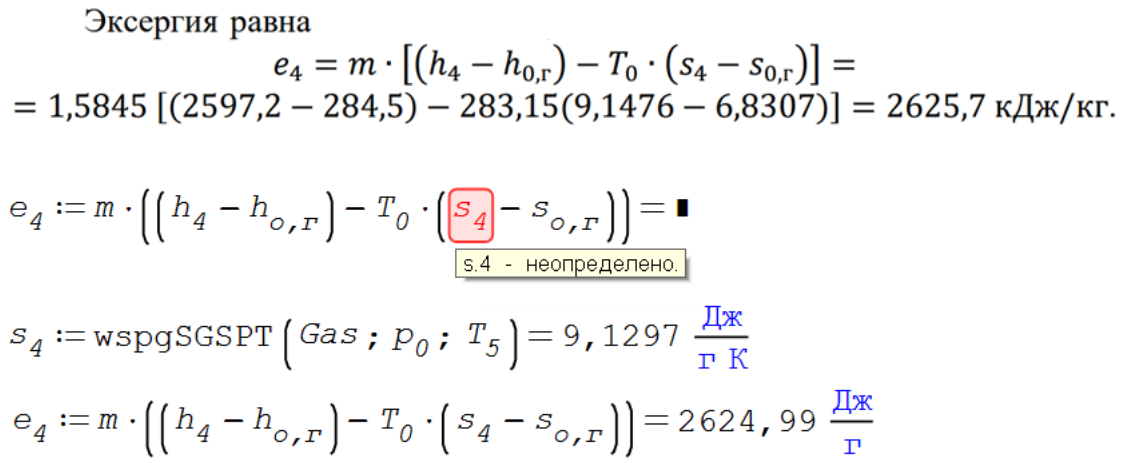


Рис. П14 Переменная в расчете на определена

Ситуацию, когда переменную намерено не определяют в расчете, описана в главе 9 – см. рис. 13.6-13.9. Вернее, так – сначала вводят в расчет, а потом определяют.

7. Точка и запятая, русские и английские имена единиц измерения

Пакет SMath позволяет иметь в качестве разделителя целой и дробной части десятичного числа либо точку, либо запятую. На рисунке П15 помещена картинка из Википедии [9], отмечающая, как эта особенность отображения числовой информации распространена в мире. В России принято в качестве разделителя использовать запятую, что идет вразрез с мировой тенденцией[7]. Дело в том, что карта Мира на рис. П15 устарела – в настоящее время почти вся Европа перешла на точку в числах. Это связано со стандартами в информационных технологиях.

[7] Как писал Фёдор Тютчев
«Умом Россию не понять,
Аршином общим не измерить:
У ней особенная стать —
В Россию можно только верить.»

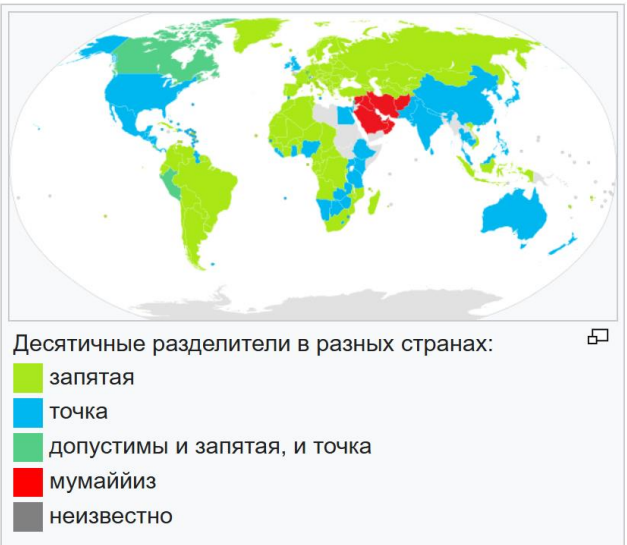


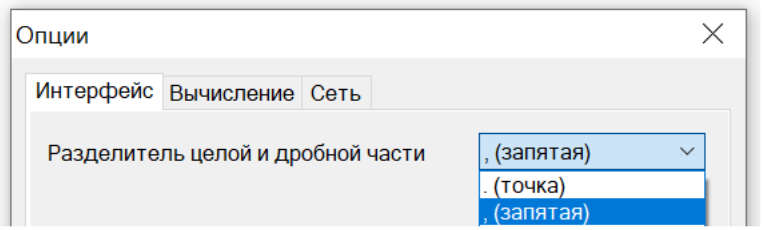
Рис. П15 Точка или запятая?

Рисунок П16 показывает этапы русификации расчета мощности насоса (человеческого сердца) в среде SMath. Действия с командами меню Сервис / Опции позволяют в готовом расчете заменить точку в числах на запятую и наоборот. Дополнительно теми же командами можно русифицировать единицы измерения и индексы в именах переменных, что отмечено в середине рис. П16. Единицы измерения меняются автоматически, а индексы вручную.

$q := 70\ \frac{mL}{s}$ $p_{in} := 80\ mmHg$ $p_{out} := 120\ mmHg$ $\eta := 95\ \%$

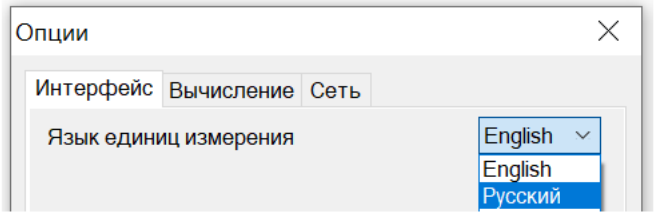
$N := q \cdot \frac{p_{out} - p_{in}}{\eta} = 0.393\ W$

$N := q \cdot \frac{p_{out} - p_{in}}{\eta} = 0,393\ W$



$q := 70\ \frac{мл}{с}$ $p_{in} := 80\ мм\ рт.ст.$ $p_{out} := 120\ мм\ рт.ст.$ $\eta := 95\ \%$

$N := q \cdot \frac{p_{out} - p_{in}}{\eta} = 0,393\ Вт$



$q := 70\ \frac{мл}{с}$ $p_{вх} := 80\ мм\ рт.ст.$ $p_{вых} := 120\ мм\ рт.ст.$ $\eta := 95\ \%$

$N := q \cdot \frac{p_{вых} - p_{вх}}{\eta} = 0,393\ Вт$

Рис. П16 Русификация расчета

Рекомендуется создавать новый расчет, используя точку как разделитель в числах и латинские написания единиц измерения. Это ускорит создания расчета и избавит от лишних переключений латинской и русской раскладки клавиатуры, что, кстати, чревато неприятными ошибками – ввод, например, в имя переменной русской, а не латинской буквы эс. Так часто происходит после ввода в расчет русского комментария.

Если разделителем в числах будет запятая, то разделителем аргументов функции автоматически станет точка с запятой – стиль русской версии электронных таблиц Excel.

В данном учебном пособии в расчетах встречаются разные знаки препинания в качестве разделителях чисел и разделителя аргументов функций. Авторы не видят в этом большой беды, тем не менее просят у читателей извинения за такое отсутствие единообразия, связанного с индивидуальными предпочтениями отдельных авторов данной книги.

В заключение можно отметить, что данное учебное пособие не так строго систематизировано, как [1], а является неким собранием этюдов – теплотехнических этюдов (литературный прием второго автора [10-12]). Книгу можно начинать читать с любого этюда – с любой главы. Достаточно много задач по термодинамики выложено для интерактивного использования на авторском сайте по адресу http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/tdc.html.

Авторы надеются, что тандем «Учебник [1] и данное учебное пособие» станет хорошим инструментом для изучения технической термодинамики с использованием современных информационных технологий.

Литература и ссылки:

1. Александров А.А., Охотин В.С., Орлов К.А. Техническая термодинамика. — М.: Издательство МЭИ, 2023. — 457 с. (http://www.twt.mpei.ac.ru/TTHB/TT-AOO.pdf)

2. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. М.: Издательский дом МЭИ. 2009 (http://www.twt.mpei.ac.ru/rbtpp/index.html)

3. http://www.wsp.ru

4. www.smath.com

5. Мартынов А.В. Установки для трансформации тепла и охлаждения. Сборник задач. – М.: Энергоатомиздат, 1989 (https://djvu.online/file/NpJSsAw2E1kOp?ysclid=lxh413pzx570603070)

6. Установки для трансформации тепла и охлаждения: расчеты на SMath : учебное пособие для вузов / Н. Л. Бударин, А. В. Мартынов, В. Ф. Очков [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 184 с. — ISBN 978-5-507-49252-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/414824 (дата обращения: 15.06.2024).

7. Севрюков П.Ф. Стандарты, обозначения, определения // Физика в школе. № 5. 2024. с. 63-64 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/fizika_v_shkole_2024_05.pdf)

8. https://en.smath.com/forum/yaf_poststt25241_Showing-Substitutions---Optimized-Manual-Method.aspx

9. https://ru.wikipedia.org/wiki/Десятичный_разделитель

10. Очков В.Ф., Пухначев Ю.В. 24 этюда на Бейсике. М.: Финансы и статистика, 1988 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/24/index.htm)

11. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / Под общ. ред. В.Ф. Очкова. Издательство БХВ-Петербург. 2014. – 336 с. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html)

12. Очков В.Ф., Богомолова Е.П., Иванов Д.А. Физико-математические этюды с Mathcad и Интернет. Издательство Лань. 2016 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/T-2018/PhysMathStudies.pdf)

Глава 1 Пакет WaterSteamPro
Или
Обратная сторона воды

В октябре 1959 году, когда второму автору этого учебного пособия было всего 11 лет, его очередной раз охватила безмерная гордость за свою страну. В газете «Правда» была опубликована фотография обратной стороны Луны (рис. 1.1), сделанная советской космической станцией «Луна-3» (рис. 1.2). А до этого был 1957 год с запуском первого искусственного спутника Земли. А потом был 1961 год с полетом Юрия Гагарина. Автор тогда часто думал о себе так: «Как мне несказанно повезло! Я родился в СССР, да еще и в столице – в Москве!». Но и в наше время эта гордость не до конца потеряла своей детской наивности, несмотря на то что автор уже в зрелые годы много чего разного узнал о своей стране [1] и повидал (в том числе и для сравнения) практически весь мир. В частности, автор посетил ежегодные рабочие встречи Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (iapws.org) в Швейцарии, Германии, США, Великобритании, Нидерландах и Чехии. Формуляции этой организации и прописаны в названии главы.

Рис. 1.1 Фотография обратной стороны Луны

Рис. 1.2 Почтовая марка, выпущенная в ознаменования полета «Луны-3»

Обратная сторона Луны вспомнилась, когда авторами было нарисовано на компьютере изображение, показанное на рис. 1.3. Что это такое!? Как это связано с названием книги и с названием данной главы?

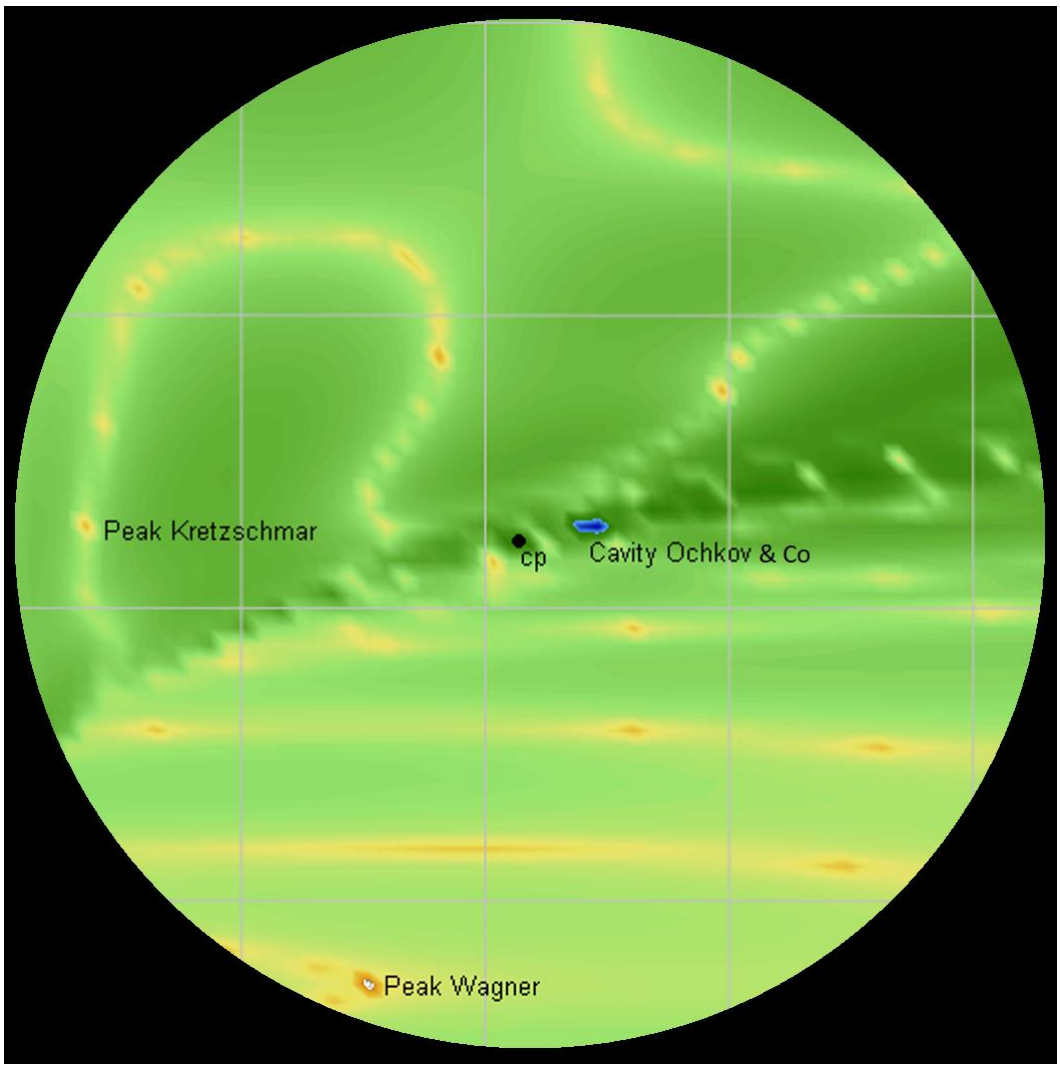


Рис. 1.3 Обратная сторона теплофизических свойств воды – контурная карта

Основным рабочим телом и теплоносителем тепловых, атомных и гидравлических электростанций (а это почти 90% всей электроэнергетики мира) являются вода и водяной пар. Тепловые сети, как правило, заполнены водой. Нельзя спроектировать и эксплуатировать эти энергетические объекты без знания теплофизических свойств воды, играющей огромную роль в жизни на Земле. Кстати, во многих европейских языках нет одного слово, означающего эту субстанцию. Мы говорим вода, водяной пар (сухой или влажный), водяной пар при сверхкритических параметрах (флюид). Так в языках некоторых народов, нет одного обобщающего слова «лес», а есть отдельные слова для разных видов леса: тайга, роща, бор, джунгли и т.д. Далее мы под словом вода будем понимать воду в разных ее состояниях, при разных параметрах. Кстати, международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара когда-то называлась международная ассоциация по свойствам воды, но потом её переименовали, упомянув в названии и водяной пар.

Эта ассоциация, в которой работает второй авторы этой книги, выпустила в виде pdf-файлов две формуляции[8] для расчета термодинамических свойств воды: формуляцию IAPWS-95 (http://iapws.org/relguide/IAPWS-95.html – см. рис. 1.4) и формуляцию IAPWS-IF97 (http://iapws.org/relguide/IF97-Rev.html – см. рис. 1.5 [2]). Российский национальный комитет по свойствам воды и водяного пара сделал эти формуляции живыми (online calculation). Можно поменять исходные данные и получить новый ответ со всеми промежуточными вычислениями и графиками – см. рис. 1.4 и 1.5.

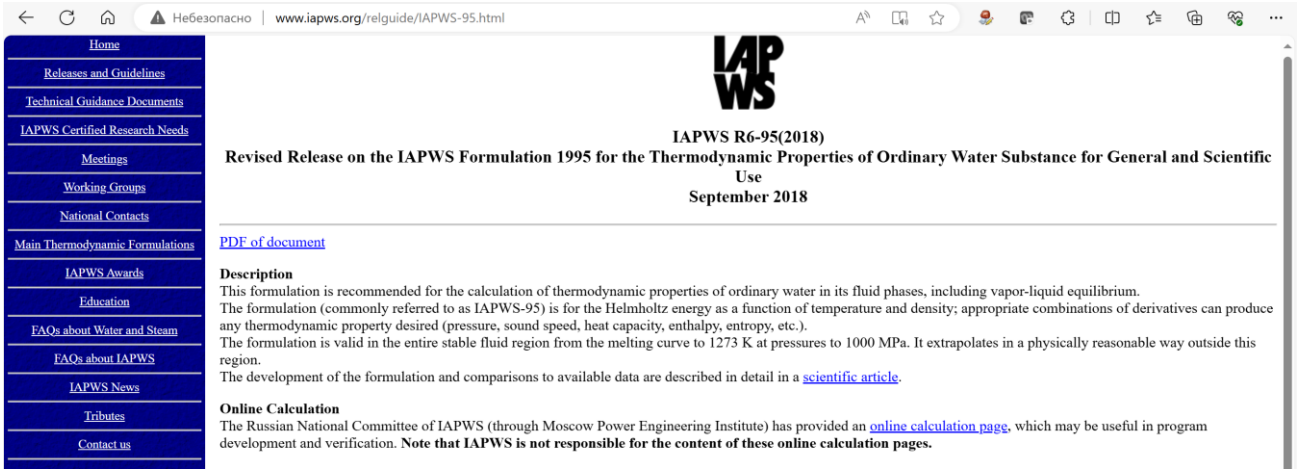


Рис. 1.4 Сайт http://www.iapws.org/relguide/IAPWS-95.html (формуляция 1995 года)

Скачать SMath-файл, по которому рассчитываются свойства воды и водяного пара по формуляции IAPWS-95, можно с сайта http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/iapws1995.rar.

[8] Слово формуляция, несколько непривычное для русского уха, означает набор формул и описаний условий их применения, а также ряд контрольных примеров.

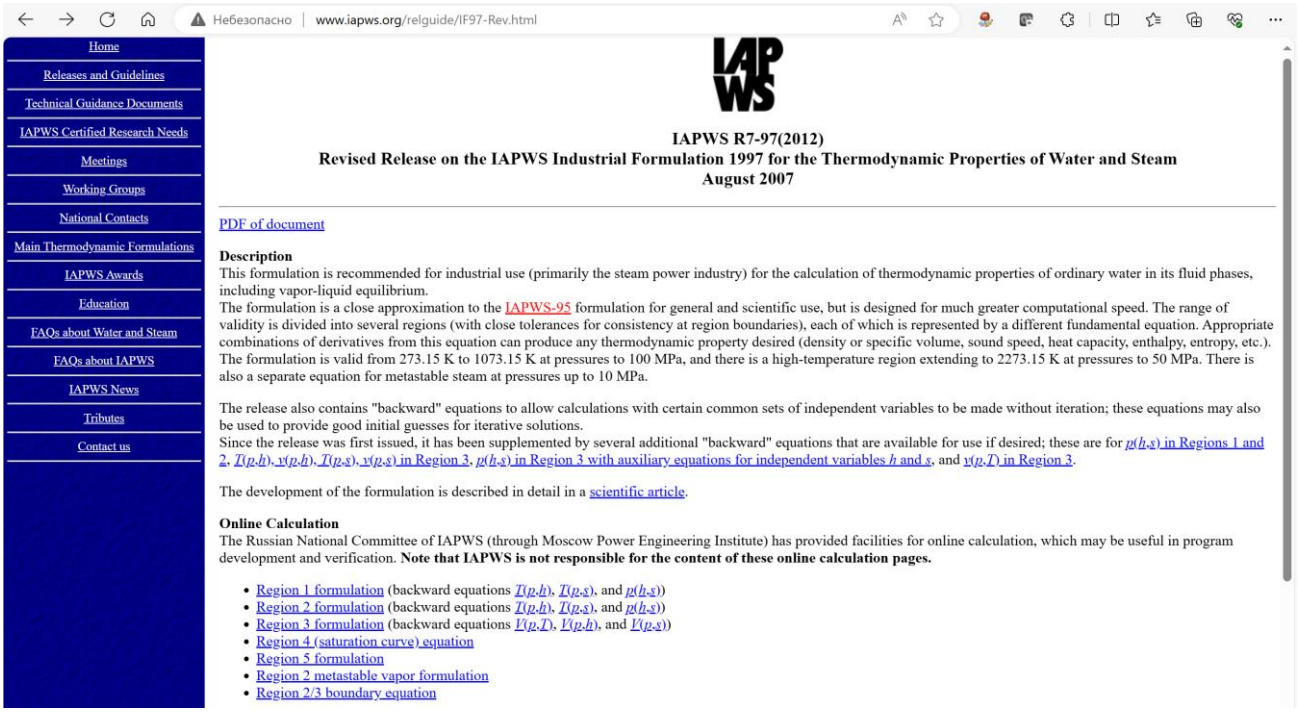


Рис. 1.5 Сайт http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html (формуляция 1997 года)

Есть соответствующие формуляции для вычисления свойств воды не только обычной, но и тяжелой (см. рис. 9.21 в главе 9), а также воды, содержащей соли (морская вода – см. рис. 9.32 в главе 9). Не забыты и транспортные свойства воды – вязкость, например – см. рис. 9.31 в главе 9). Отдельные формуляции касаются метастабильных состояний – перегретая вода и переохлажденный водяной пар, который образуется, например, при попадании такого пара в конденсатор. Вода же перегревается (опять метастабильное состояние) при попадании в барабан котла или в трубах прямоточного котла.

Формуляция 1995 с обновлением 2018 года позволяет вести расчеты свойств воды и водяного пара в зависимости от плотности и температуры. Это не очень удобно, так как в лабораториях и на промышленных объектах у воды измеряют не плотность, а давление – там манометры есть, а приборов для измерения плотности нет. Поэтому в 1997 году была создана альтернативная формуляция IAPWS-IF97 (с обновлением в 2012 году), где исходными данными являются не плотность и температура, а давление и температура. Буква I в названии этого руководящего документа (формуляции – F) означает industrial, промышленный. Формуляция же 1995 года предназначена для общих и научных целей. Отказ от плотности и переход к давлению потребовал и отказа от единой формуляции на всем диапазоне исходных данных. В формуляции IAPWS-IF97 выделяются отдельные области со своими формулами для:

- воды (п. 1 на рис. 1.6 – http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-

Region1.xmcd),

- водяного пара (п. 2 – http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-Region2.xmcd),

- околокритического состояния (п. 3 – http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-Region3.xmcd)

- водяного пара с высокой температурой (п. 5 – http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-Region5.xmcd).

Пункт 4 фиксирует не область, а линию насыщения (http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-Region4.xmcd), исходящую из тройной точки воды и заканчивающуюся в критической точке. Для этих четырех областей и одной кривой были созданы отдельные формуляции, которые не совсем точно состыковываются в приграничных зонах. Кроме того, есть довольно заметные отличия в результатах счета по формуляциям 1995 и 1997 годов – один из примеров на рис. 1.21. Обозначение g(p, T) и f(p, T) на рис. 1.6 – это свободные энергии Гиббса (Gibbs) и Гельмгольца (Helmholtz). Нужно было, конечно, написать в формуляции не f(p, T), а h(p, T), но буква h уже занята под обозначение удельной массовой энтальпии. Эти два вида энергий (термодинамических потенциалов) рассчитываются для отдельных областей через многочлены высокой степени. Коэффициенты этих многочленов были рассчитаны после сложной статистической обработкой многочисленных экспериментальных данных.

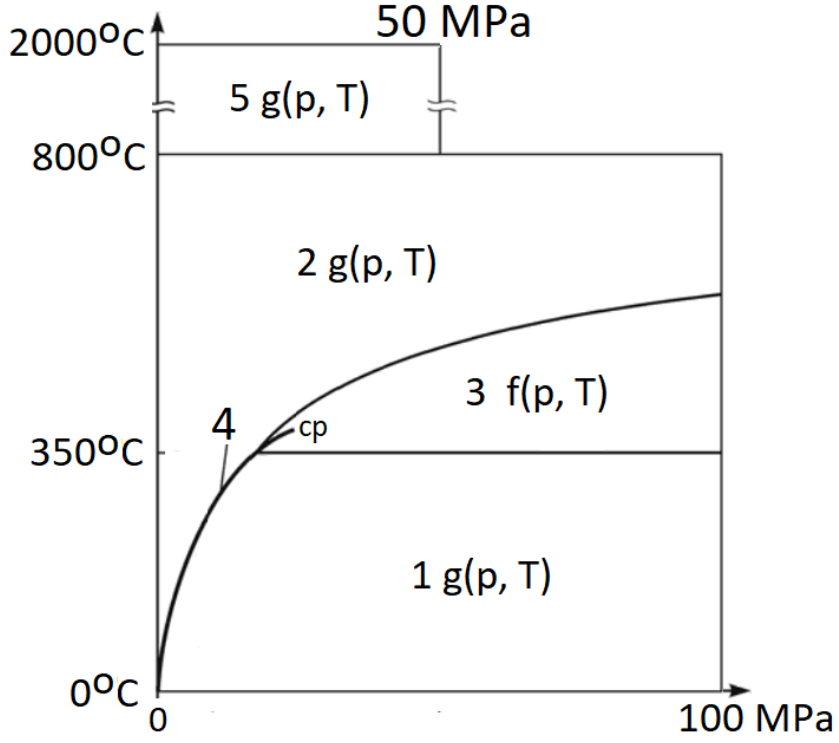


Рис. 1.6 Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «давление-температура»: 1 – вода, 2 водяной пар, 3 – околокритическая область, 4 – линия насыщения и 5 – водяной пар высокой температуры

Область 2 (водяной пар) отделяется от околокритической области 3 двумя кривыми линиями – линией насыщения 4 (см. надпись "Region 4 (saturation curve)" на рис. 1.5) и линией, строящейся по функции, ссылку на которую хранит надпись "equation Region 2/3 boundary equation" на том же рисунке.

На рисунках 1.7, 1.8, 1.9 и 1.10 показаны области формуляции IAPWS-IF97 в других координатах, используемых для построения диаграмм термодинамических циклов.

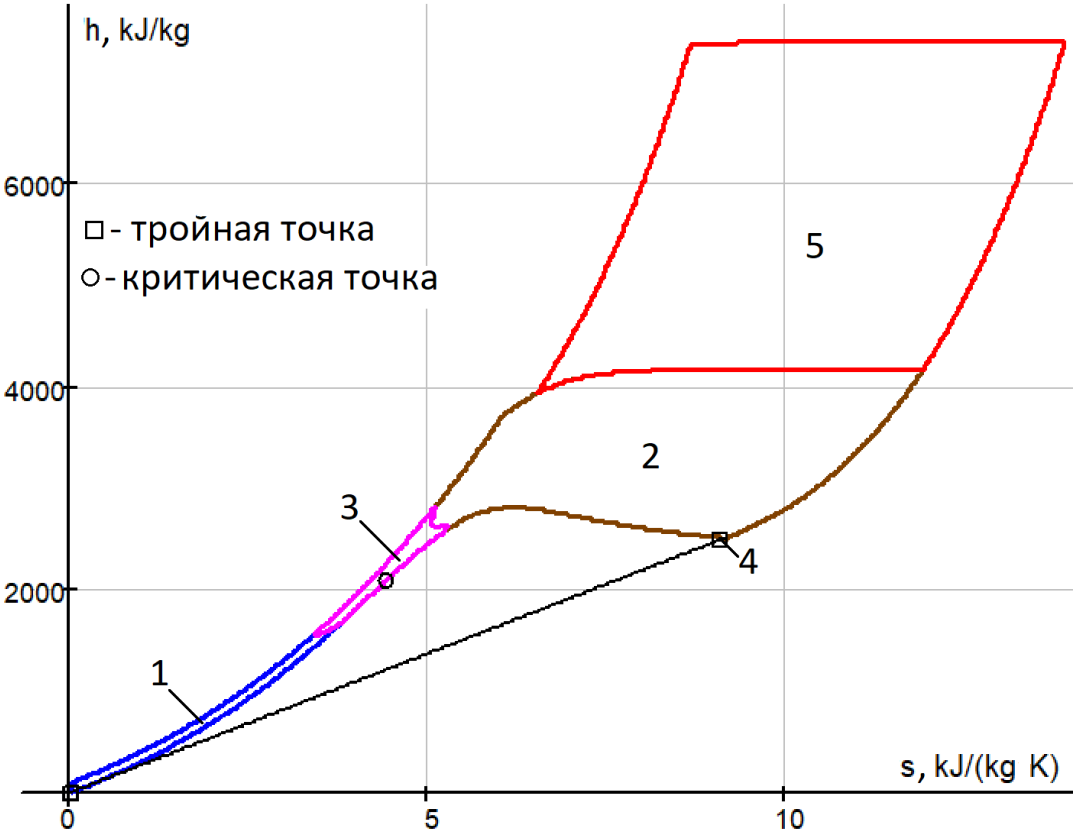


Рис. 1.7 Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «энтальпия-энтропия»

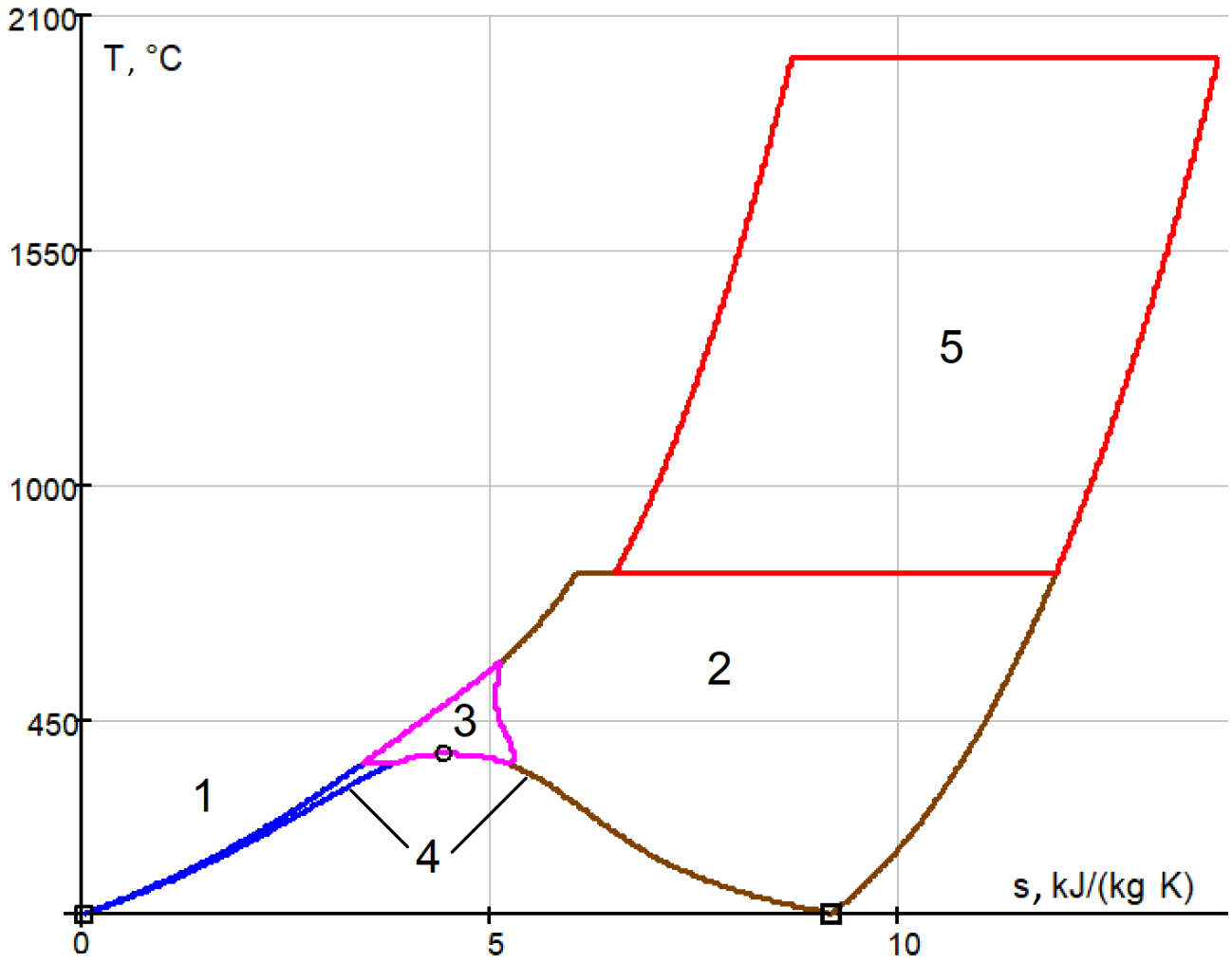


Рис. 1.8 Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «температура-энтропия»

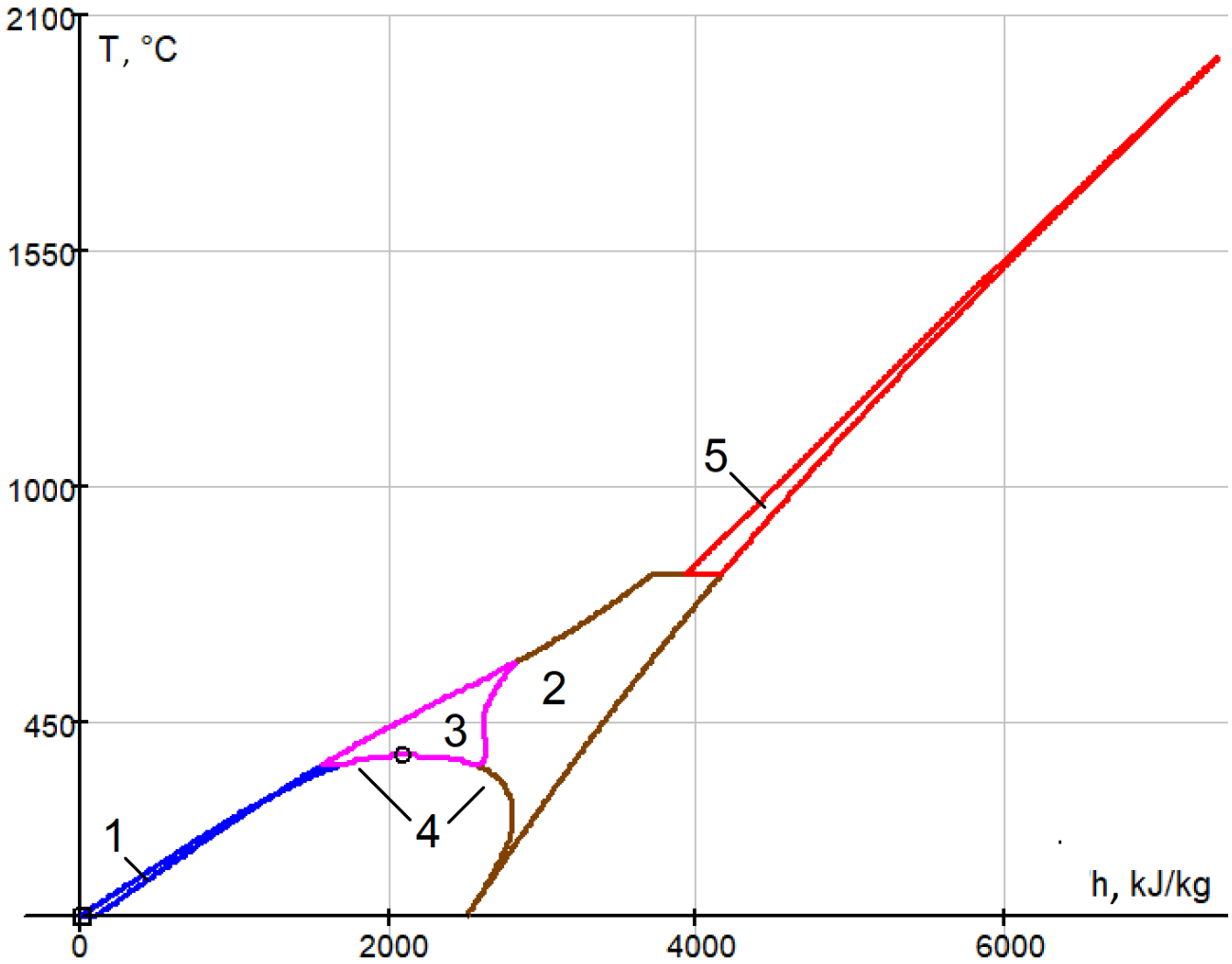


Рис. 1.9 Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «температура-энтальпия»

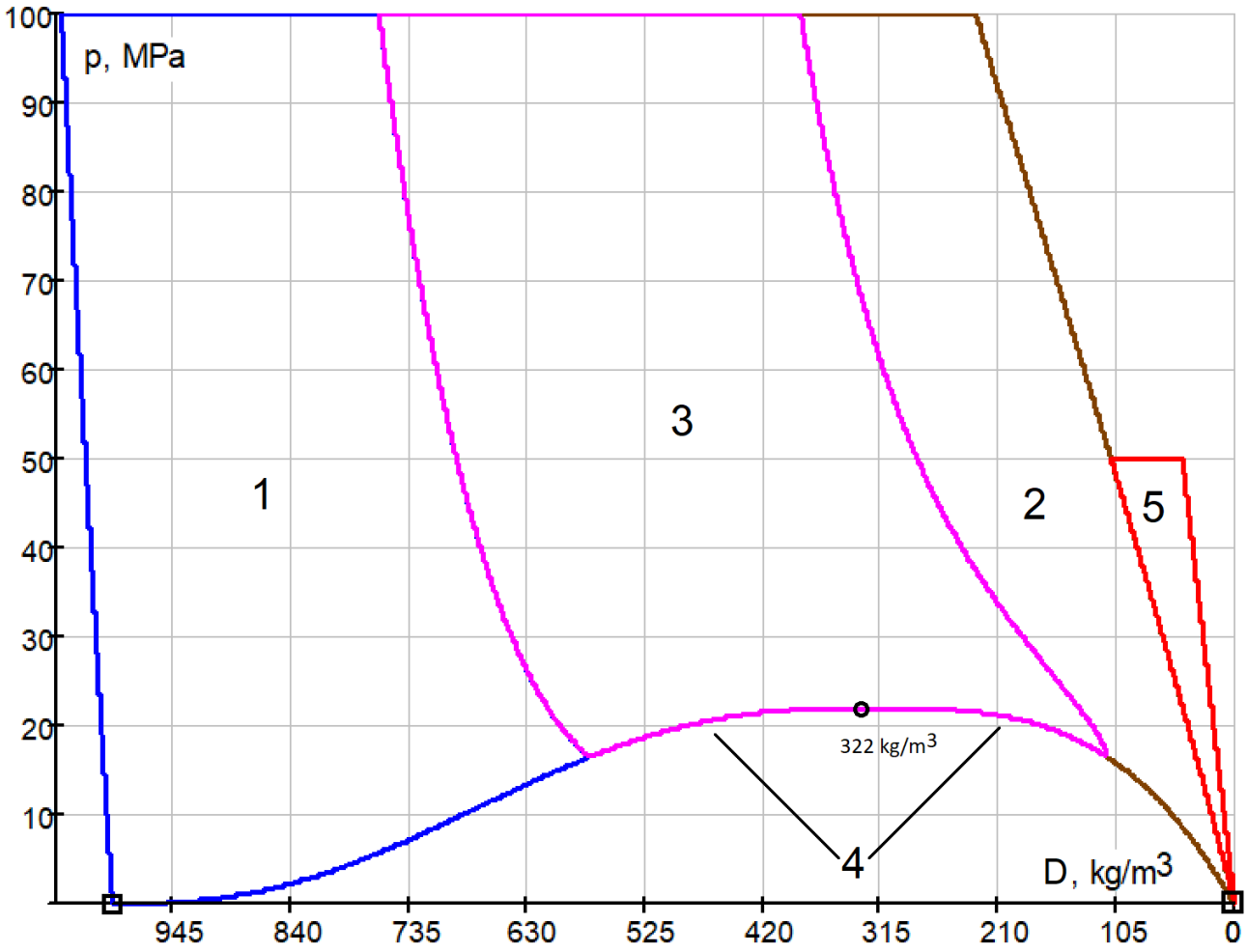


Рис. 1.10 Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «давление-плотность»

Интересно взглянуть на области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «коэффициент сжимаемости-плотность» (рис. 1.11). Коэффициент сжимаемости[9] – это дополнительный параметр Z, превращающий уравнение идеального газа [3] p v = T в уравнение реального газа p v = Z T, где Z – это не константа, а довольно сложная функция, зависящая от давления и температуры (или от давления и удельного объема – см. левую часть уравнения идеального газа). Она меняется от нуля (несжимаемая вода – область 1), до единицы и даже сверх единицы у пара с высокой температурой (область 5). Тройная точка разбивается на две точки – справа внизу точка для воды и слева вверху точка для водяного пара. Но это тройная, а не двойная точка – где-то там присутствует и лед, твердая фаза воды. Тройная точка – это состояние, где одновременно присутствует жидкая, газообразная и твердая фазы. Интересно также на этих необычных диаграммах и то, что

[9] Не путать с просто сжимаемостью – способностью жидкости или газа под действием внешнего давления изменять свой объём.

вода (область 1) и водяной пар (область 2) не соприкасаются. На обычной диаграмме (рис. 1.6) эти области соприкасаются через линию насыщения.

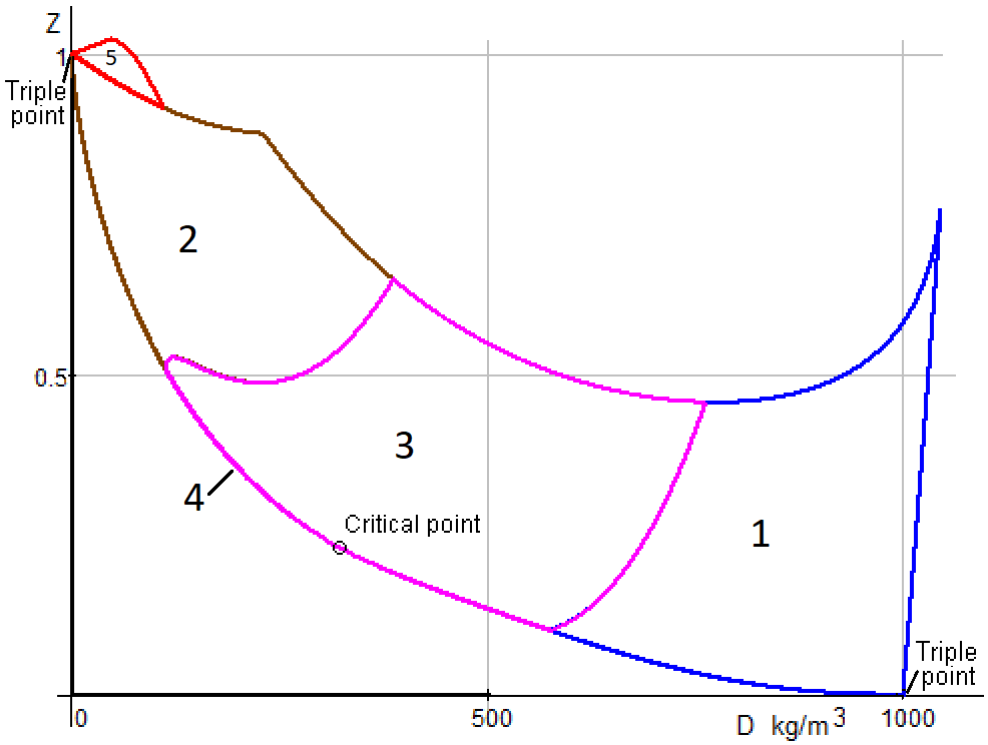


Рис. 1.11 Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах «коэффициент сжимаемости-плотность»

Пакет программ WaterSteamPro по расчету теплофизических свойств воды и водяного пара, основанный на формуляции IAPWS-IF97 (см. рис. 1.3и), а также газов (основные рабочие тела теплоэнергетики) является дополнением (плагином) к пакету SMath. Это дополнение прикрепляется к установленной на компьютере пользователя программе SMath через цепочку команд меню Сервис / Дополнения / Галерея онлайн – см. рис. 1.12.

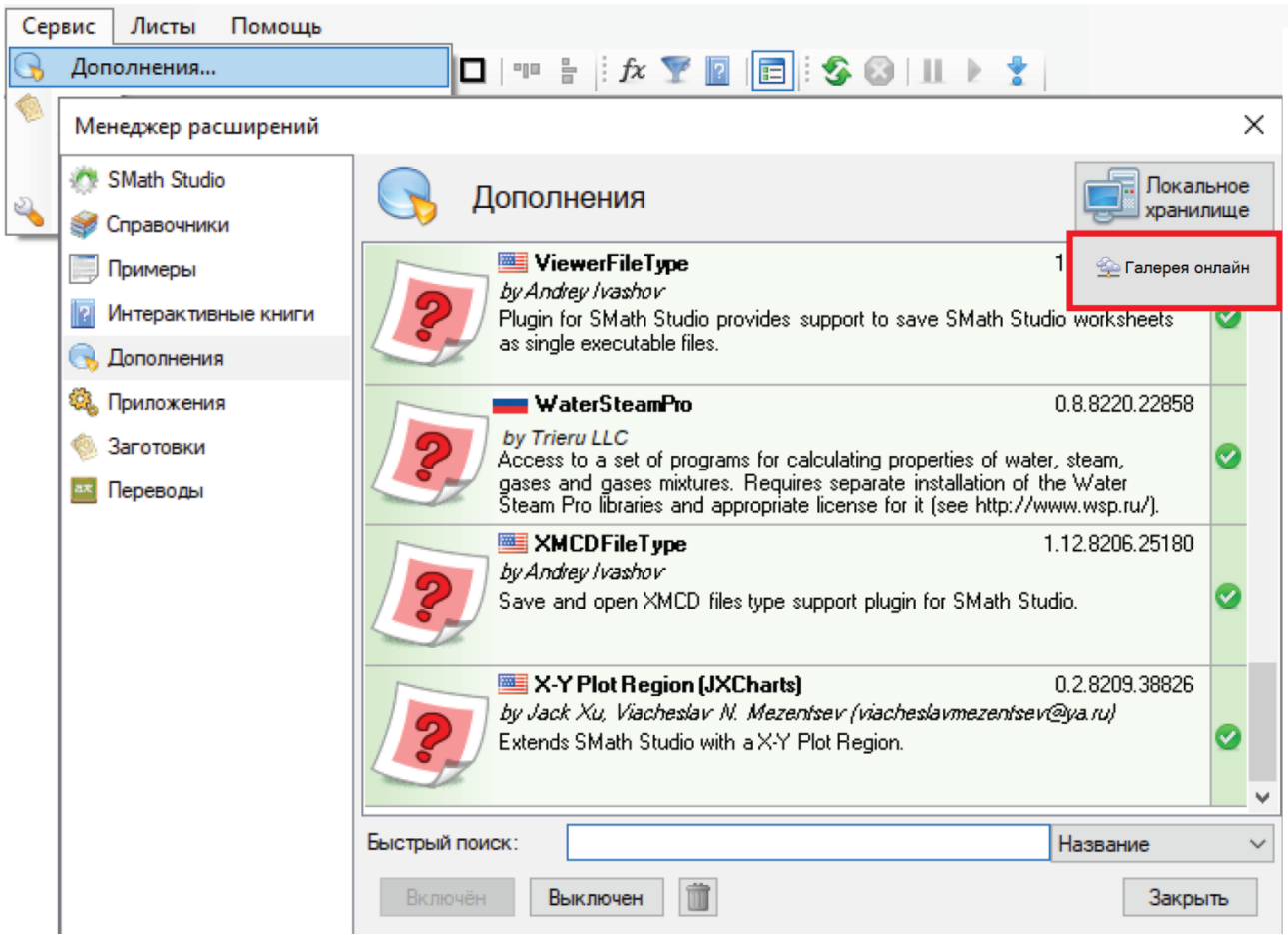


Рис. 1.12 Дополнение (плагин) WaterSteamPro, подключенное к среде SMath

После подключения и последующего лицензирования пакета WaterSteamPro к программе SMath (см. http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/SMath-WSP.pdf) в среде этого научно-технического калькулятора станут доступны 353 функции (см. рис. 1.13), возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара (префикс wsp), а также (дымовых) газов и их смесей (префикс wspg), необходимых для расчета, например, газотурбинных и парогазовых установок (см. главы 3, 8 и 11).

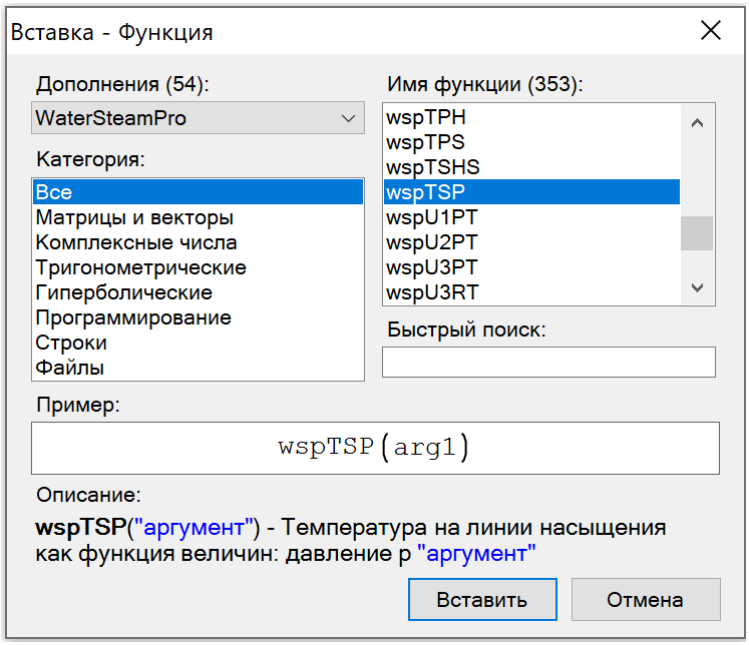


Рис. 1.13. Диалоговое окно ввода функций WaterSteamPro

Без лицензирования пакета WaterSteamPro окно Имя функции, показанное на рис. 1.13, будет пустым.

После описанного подключения и лицензирования можно подсчитать, например, значение удельной энтальпии (теплосодержания) воды или водяного пара в зависимости от давления и температуры. Для этого необходимо и достаточно в среде SMath набрать на клавиатуре символы `wspH` (см. верхний левый угол на рис. 1.14). После этого выпадет список функций пакета WaterSteamPro, имя которых начинается с этих четырех букв. Эти функции имеют разные аргументы — разные параметры воды и водяного пара, зафиксированные в последующих буквах. Буква S в имени функции будет означать, что ведется расчет на линии насыщения. При этом имеется ввиду либо вода (W), либо водяной пар (S), либо их смесь (X). Вся эта информацию размещена на сайте www.wsp.ru. Числа 1, 2, 3 и 5, прописываемые за буквами wspH, означают, что имеется ввиду вода (1), водяной пар (2), околокритическая область (3) или пар при высокой температуре (5) формуляции 1997 года Международной ассоциации по свойствам воды и водяного паре – см. выше рис. 1.6-1.11.

На рисунке 1.14 показаны последующие этапы работы с выбранной функцией `wspHPT`: ввод значений двух аргументов с единицами давления и температуры, корректировка единиц измерения у выданного значения удельной энтальпии (замена единицы грей на килоджоули на килограмм) и, наконец, корректировка формата численного ответа. Пакет SMath по умолчанию выдает четыре знака после запятой. Мы же отметили, что нужно выдавать четыре значащие цифры (галочка у позиции Режим значащих цифр).

Отметим, что командами меню Сервис / Опции / Язык единиц измерения можно заменить русские имена единиц измерения на английские. Эта и другая также полезная опция – замена запятой на точку в разделителе целой и дробной части в десятичных числах делает удобной подготовку расчетных документов для англоязычных и прочих изданий. При этом точку с запятой в списках аргументов функций следует заменить на запятую.

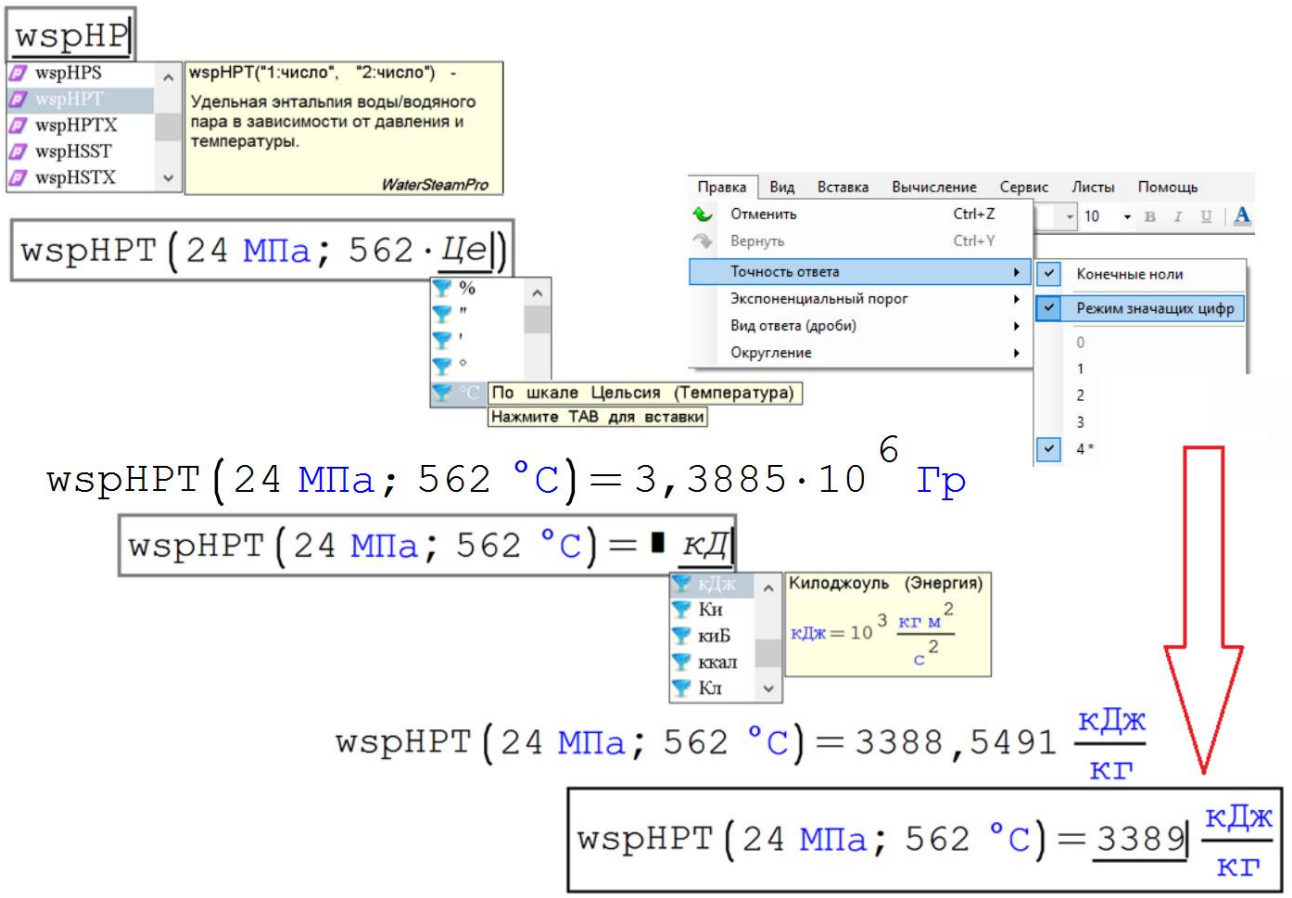


Рис. 1.14 Шаги ввода в расчет значения удельной энтальпии водяного пара

Особо подчеркнем, что пакет WaterSteamPro в среде SMath работает с единицами измерения, что полностью соответствует современным стандартам компьютерных вычислений. С другой стороны, лицензируя пакет WaterSteamPro, пользователь получает возможность работать с ним и в других вычислителях – в табличном процессоре Excel (см. рис. 9.14 и 9.15 в главе 9), например, где нет поддержки единиц измерения.

Мы не будем описывать все функции пакета WaterSteamPro – это всё можно найти на вышеотмеченном сайте. Мы приведем конкретный несложный пример теплоэнергетического расчета в среде SMath с опорой на эти функции, который покажет читателю удобства такого комплекса.

Дополнение (плагин) WaterSteamPro к программе SMath, повторяем, позволяет пользователю работать с отдельными областями по свойствам воды и водяного пара, показанными на рис 1.6-1.11. Если, например, пользователь наберёт в среде SMath буквосочетание wspD, то выпадет список имён функций `wspD1PT`, `wspD2PT`, `wspD3PT` и `wspD5PT` (см. рис. 1.15 – левая часть), возвращающих плотность воды или водяного пара в четырех разных областях.

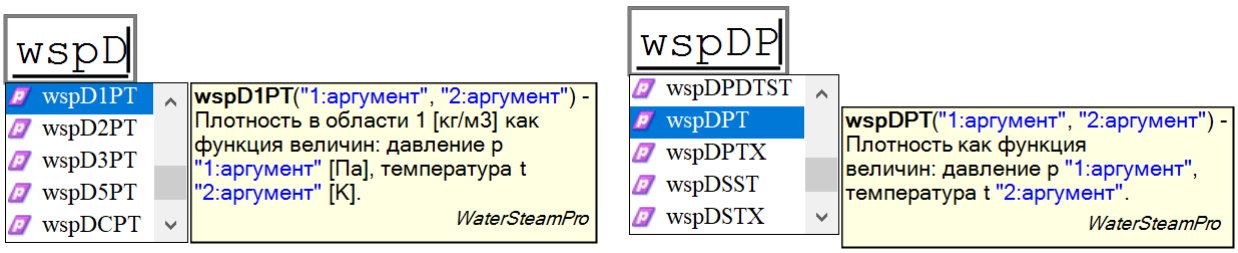


Рис. 1.15 Выпадающие списки имён функций WaterSteamPro

Если же за буквосочетанием wspD набрать на клавиатуре латинскую букву P (правая часть рисунка 1.15), то можно выйти на функцию `wspDPT`, которая сама с опорой на функции `if` (если) выберет, с какой функцией – `wspD1PT`, `wspD2PT`, `wspD3PT` или `wspD5PT` нужно будет иметь дело. Такое же деление по областям сделано и для других параметров воды и водяного пара – температура, давление, удельная энтальпия, удельная энтропия и проч.

Если заранее известно, в какой области будет вестись расчёт, то для ускорения расчёта предпочтительней использовать функции пакета WaterSteamPro с номерами 1, 2, 3 или 5. Четвертая область, напоминаем, это не область, а линия от тройной до критической точки. Как она проводится, описано на интерактивном расчетном сайте http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-Region4.xmcd. Если в этом адресе цифру 5 заменить на цифры 1, 2, 3 или 5, то можно прийти к описаниям формуляций для остальных областей.

В формуляции 1995 года, как уже отмечено, область одна. Она охватывает значения температуры от температуры тройной точки (0.01°C) до 1000°C и давления от давления той же тройной точки (611 Па) до 1000 МРа, где по многочлену чуть ли не сотой степени высчитывается свободная энергия Гельмгольца f(D, T), а по ней остальные термодинамические параметры – давление, удельная энтальпия, удельная энтропия, изобарная и изохорная теплоемкости, скорость звука и т.д. (см. http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS95.xmcd). На рисунке 1.16 прорисованы

эти две изотермы[10] и две изобары, ограничивающие область формуляции IAPWS-95. Область формуляции IAPWS-IF95 в таких же координатах показана на рис. 1.7.

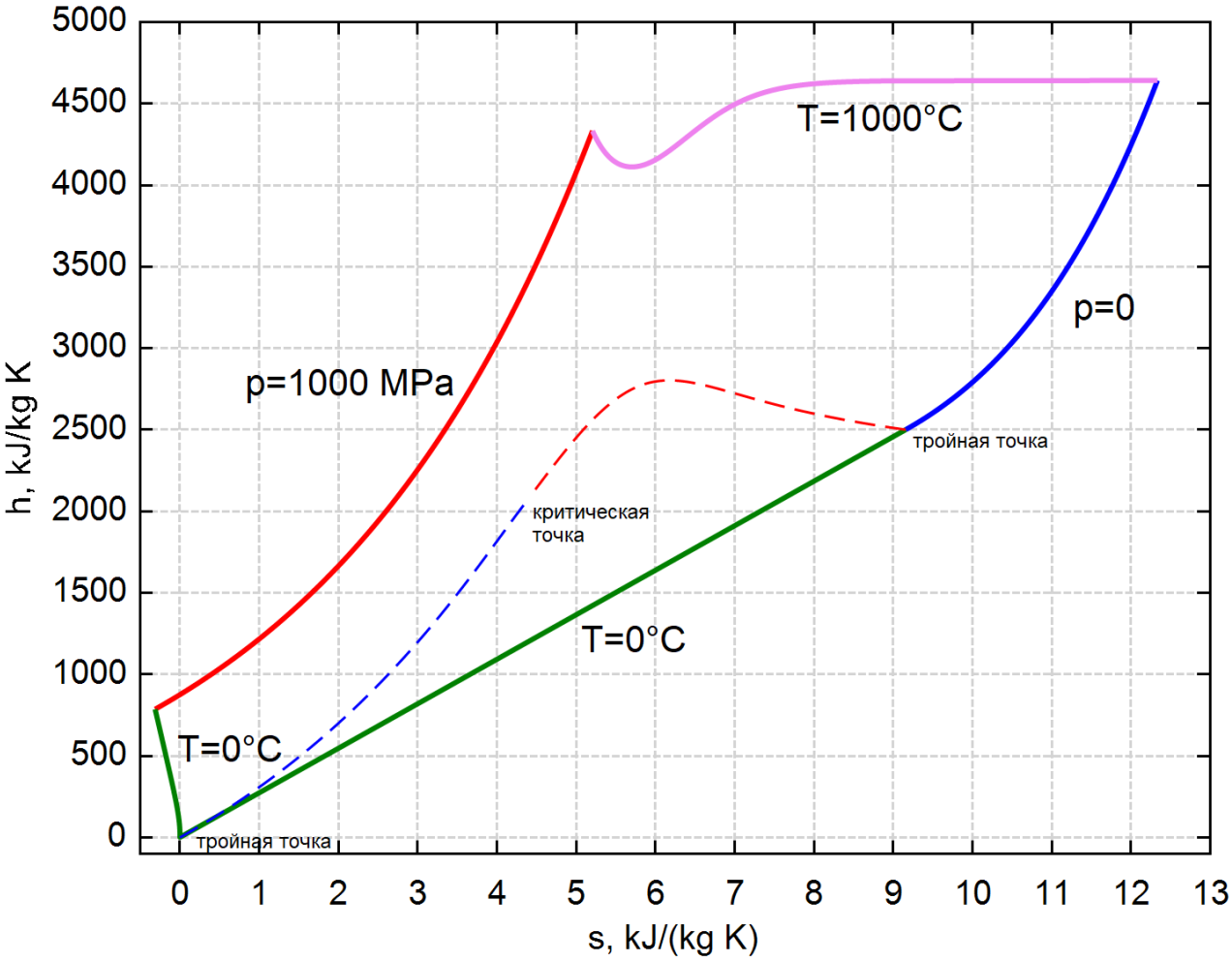


Рис. 1.16 h, s область формуляцииIAPWS-95

Так вот, «физическая географическая карта» на рис. 1.3 визуально отображает, насколько отличаются значения плотности воды, рассчитанные по формуляциям 1995 и 1997 годов в зависимости от давления т температуры. Черная точка с подписью **ср** в центре рисунка – это критическая точка воды, от которой влево и вниз до тройной точки идет линия насыщения – некий «горный хребет». О других трех помеченных точках мы скажем чуть позже.

Формуляции IAPWS охватывают также и метастабильное состояние переохлажденного водяного пара и перегретой воды – см. рис. 1.17.

[10] Зеленая изотерма тройной точки имеет необычную форму галочки с крыльями разной длины.

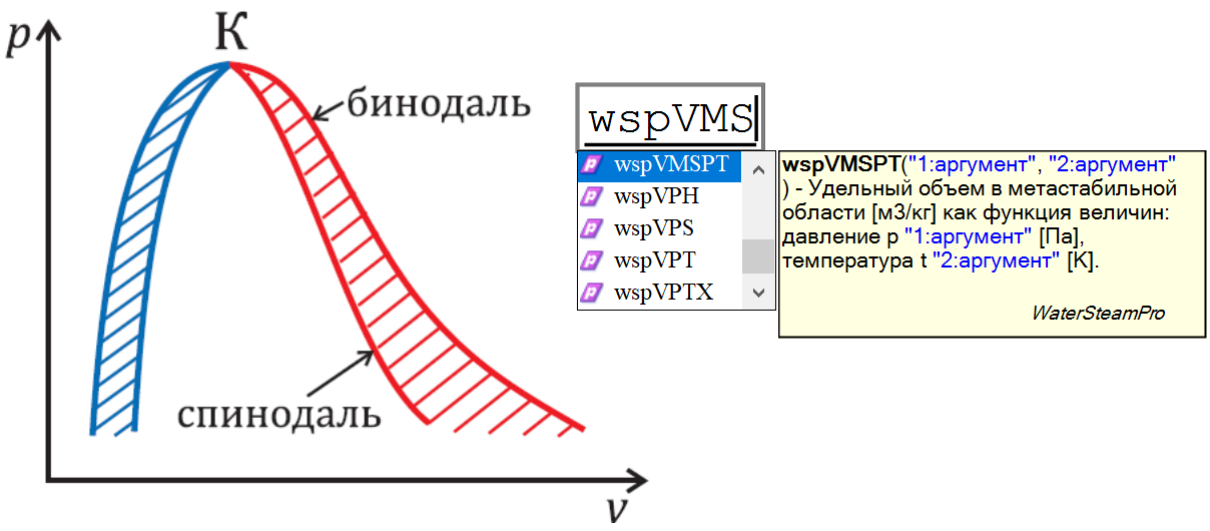


Рис. 1.17 Области метастабильных состояний (синим цветом выделена перегретая жидкость, красным цветом — переохлажденный пар [5]) и одна из функций программного комплекса SMath+WaterSteamPro

Водяной пар оказывается переохлажденным тогда, когда он, к примеру, выходит из турбины и попадает в конденсатор. Более подробную информацию о метастабильной области воды можно получить здесь http://twt.mpei.ac.ru/rbtpp/RegionMS (см. надпись "Region 2 metastable vapor formulation" на рис. 1.5.

Вернемся к началу главы!

Термин «обратная сторона» не только означает противоположную сторону чего-либо, Луны, например (рис. 1.1), но и имеет некий негативный оттенок. Например, отсутствие единства в определении свойств воды и, как следствие, расхождение в расчетах – вода одна, а формуляций две. Можно тут порассуждать и о темных пятнах на биографии человека, на поверхности Луны и Солнца, а также о "пятнах" на рисунке 1.3.

Плоская «контурная карта», показанная на рис. 1.3, была преобразована в трехмерный рельеф – см. рис. 1.18, на котором четко видны "горные вершины, ущелья, каньоны и долины". Две вершины и одна впадина, а также две долины поименованы! Поговорим о них, вернувшись на время к обратной стороне Луны.

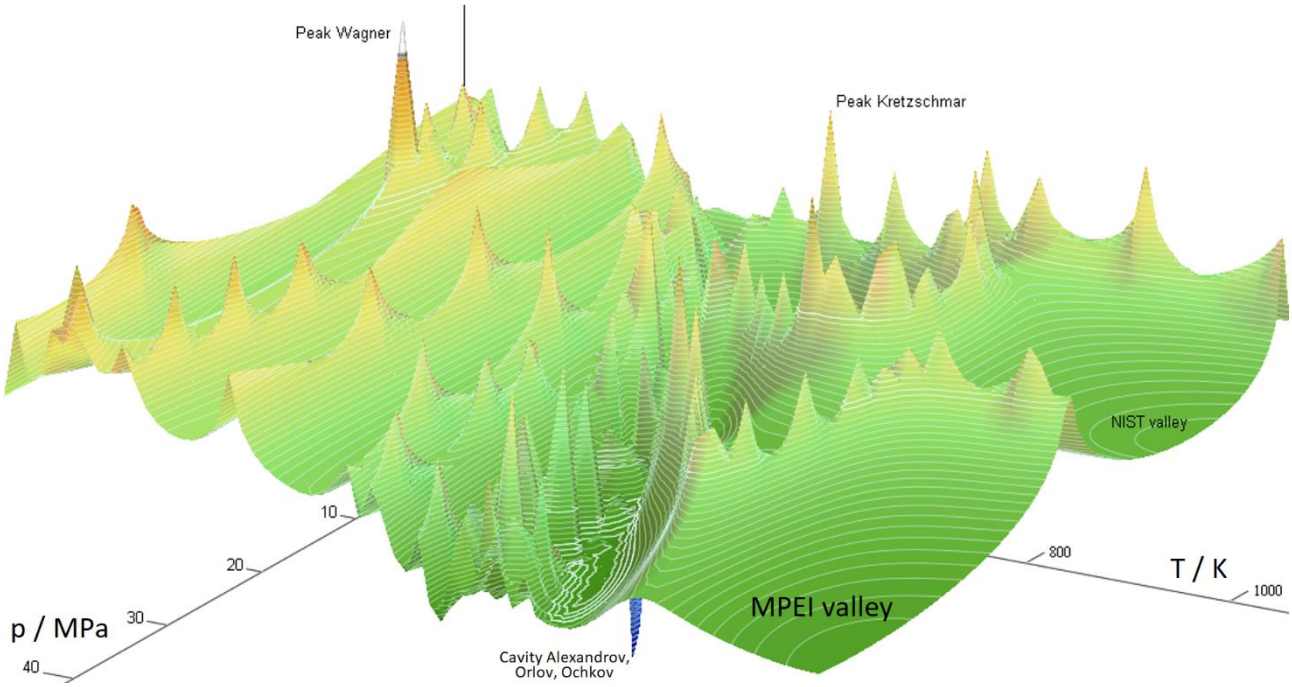


Рис. 1.18. Обратная сторона теплофизических свойств воды – трехмерный рельеф

Когда был сделан первый снимок обратной стороны Луны, то в СССР в порыве эйфории и на волне патриотизма всем морям, кратерам и другим лунным объектам были даны имена советских ученых, партийных и государственных деятелей, а также некоторых «прогрессивных иностранцев». Такая поименованная круглая карта также была опубликована в газете «Правда». Но большинство этих новых топонимов не было утверждено Международным астрономическим союзом. Мол, новый космический или географический объект недостаточно сфотографировать – нужно и ступить на него ногой! Да и лишний раз здесь проявилась традиционная западная русофобия[11]. Оставили только бесспорные имена Юрия Гагарина, Сергея Королева, Льва Ландау и Дмитрия Менделеева (кратеры диаметром более 200 км).

Вернемся к «обратной стороне воды», вернее, к ее двум формуляциям, отражающим некое двоевластие.

Когда первый второй автор этого учебного пособия впервые «сфотографировал обратную сторону» воды», то он тоже на волне эйфории дал двум высочайшим горным вершинам имена своих немецких коллег по IAPWS Вагнера и Кречмара – авторов немецкого

[11] Это хроническая болезнь Европы с периодами рецессий и обострений. Правда, на Западе эту болезнь называют по-другому и считают, что ею болеет не Запад, а Россия. Но истина, как всегда, находится посередине. Одна из причин сегодняшнего глубочайшего кризиса в международных отношениях – это двойные стандарты, определяемые пословицей «Правда хорошо, а счастье лучше!». Только вот счастье одних людей и стран оборачивается несчастьем других людей и стран.

справочника по свойствам воды. А глубочайшей впадине в порыве патриотизма было дано имя авторов российского подобного справочника [4].

Отечественный справочник выгодно отличается от зарубежных аналогов тем, что он дополнен, как сейчас говорят, цифровым двойником [2, 4]. В бумажном справочнике исходными данными для расчетов могут быть только давление и температура. Цифровой же двойник работает и с такими парами: «давление-удельная энтальпия», «давление-удельная энтропия», «удельная энтальпия- удельная энтропия» и др. (см. рис. П2 в Предисловии). Кроме того, он позволяет строить разного рода диаграммы – диаграмму расширения водяного пара в турбине, например.

Есть идея присвоить имена людей, внесших большой вклад в исследование свойств воды, объектам на карте, показанной на рис. 1.3 и 1.18. И не только отдельных персон, но и целых организаций. Так на рисунке 1.18 можно увидеть долины МЭИ и НИСТ (Национальный институт стандартов и технологий, США), отделенные горным хребтом. Хорошо бы где-то отметить долину VTI – Всесоюзного, ныне Всероссийского теплотехнического института. Когда-то давно в ходу были две таблицы свойств воды и водяного пара – таблицы ВТИ и таблицы М.П. Вукаловича. Имя Михаила Петровича Вукаловича (1898-1969) носит кафедра Теоретических основ теплотехники МЭИ, где работают авторы этой книги. На «обратной стороне воды» имя Вукаловича будет смотреться вполне логично.

Рисунки 1.3 и 1.18 были сделаны с помощью физико-математической программы Mathcad, от которой в настоящее время по известным причинам приходится отказываться (см. сноску 4) и переходить на вполне достойный отечественный продукт SMath (www.smath.com). В этот пакет плагином можно встроить функции программы CoolProp Wrapper – см www.coolprop.org и главу 2 данной книги, возвращающие свойства не только воды, но и других рабочих тел и теплоносителей – хладагентов, например. Но беда в том, что в этот пакет не сертифицирован, не протестирован – см., например, рис. 4.12 в главе 4). Вторым автором этой книги совместно с Константином Орловым и разработчиком SMath Андреем Ивашовым удалось встроить пакет WaterSteamPro в «русский Mathcad» – в программу SMath. На рисунках 1.19 и 1.20 показано графическое сопоставление (линии одной погрешности) плотности воды и водяного пара, выдаваемое обеими пакетами – WaterSteamPro и CoolProp Wrapper в широкой области давления и температуры (рис. 1.19), и у «Марианской впадины» Александрова-Орлова-Очкова (рис. 1.20). Глубина этой впадины еще до конца не замерена!

$$\Delta D(p, T) := \left| \begin{array}{l} D_{IF97} := \text{wspDPT}(p, T) \\ D_{95} := \text{CoolProp_Props}(\text{"D"}, \text{"T"}, T, \text{"P"}, p, \text{"H2O"}) \\ \dfrac{D_{IF97} - D_{95}}{D_{IF97}} \end{array} \right.$$

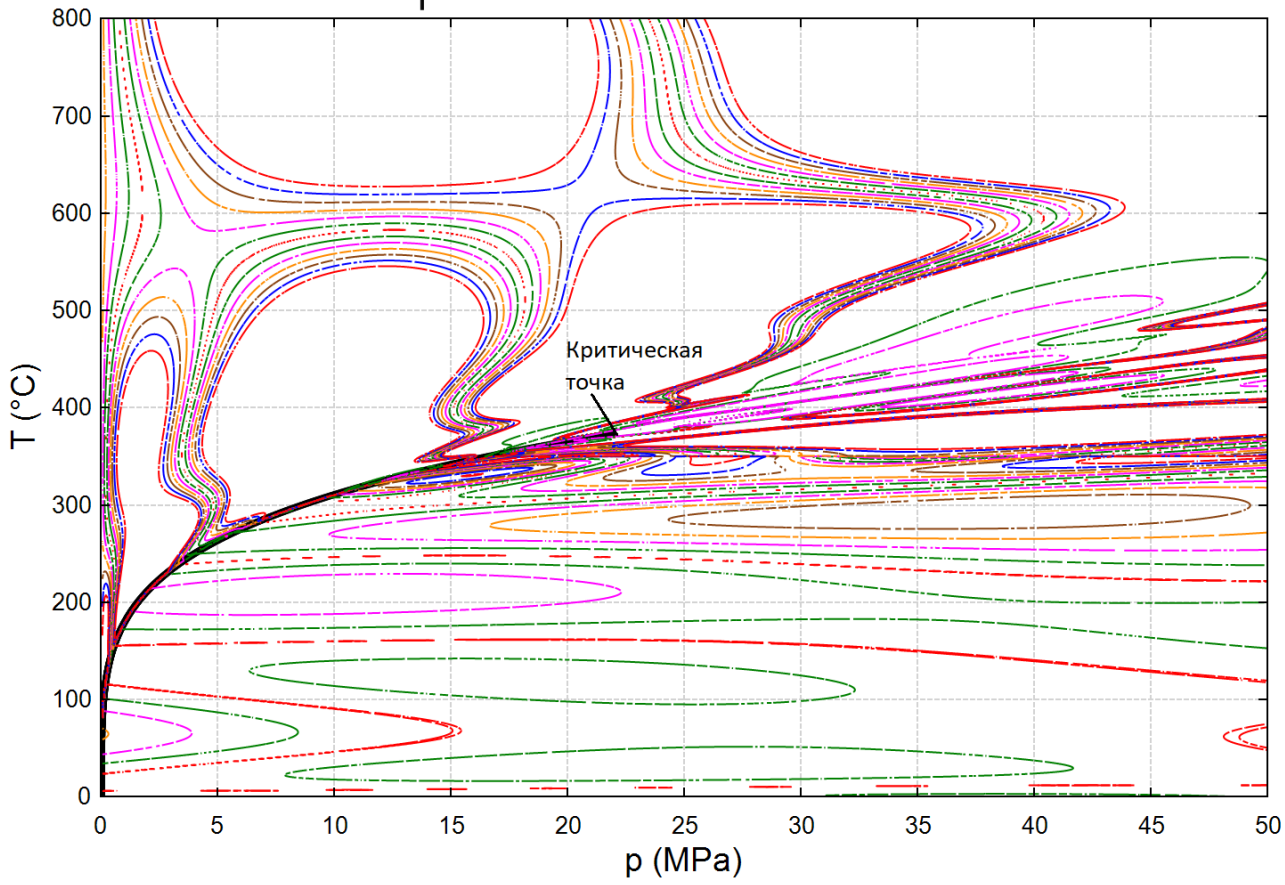


Рис. 1.19. Обратна сторона воды, нарисованная в среде SMath

Замечание. В расчете, показанном на рис. 1.19, задействована функция `CoolProp_Props` из пакета, который будет описан в главе 2.

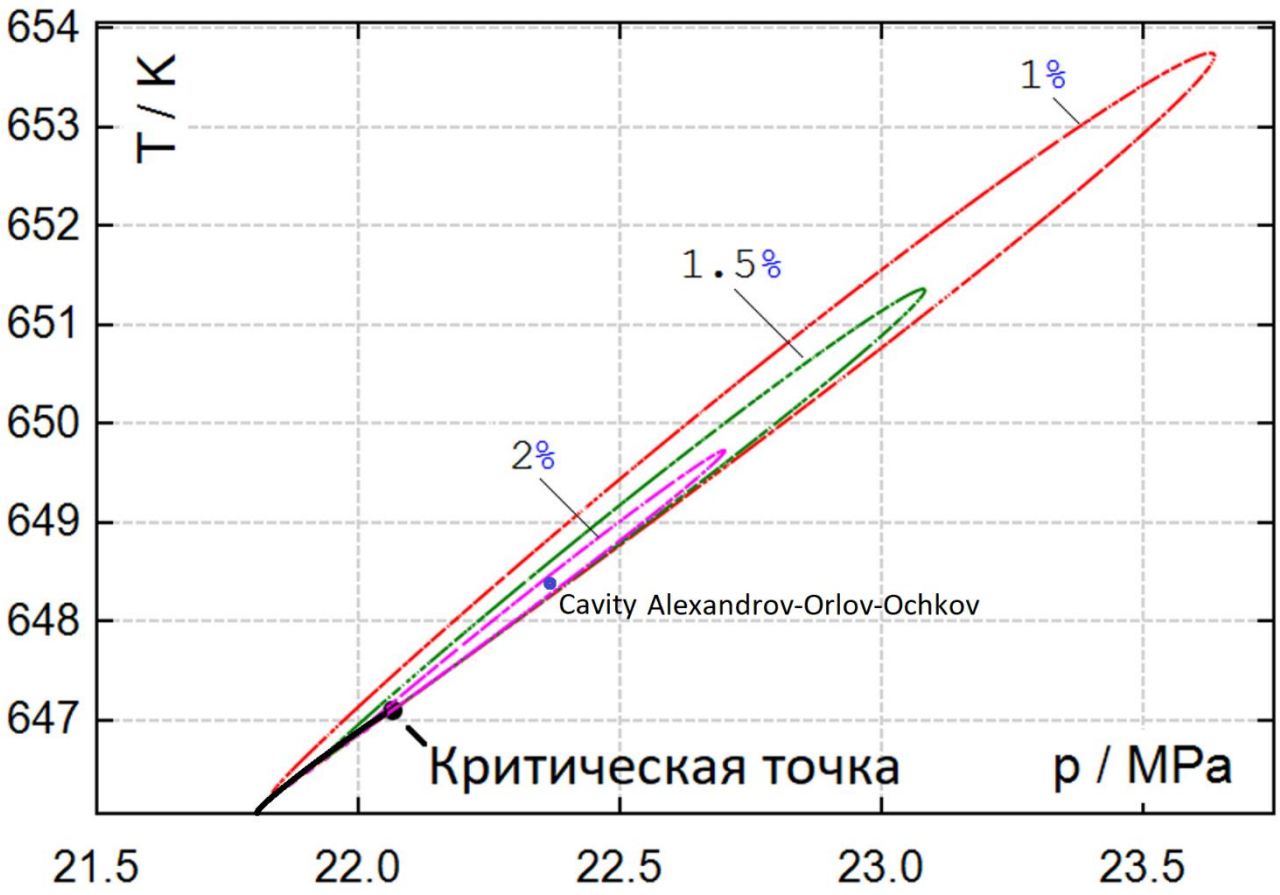


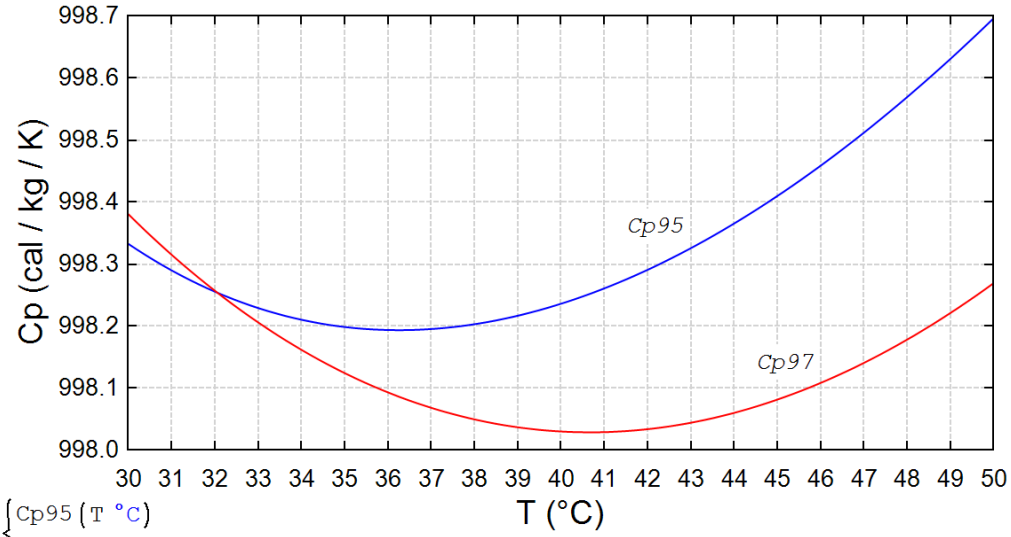
Рис. 1.20. Топография водной впадины (пучины) Александрова-Орлова-Очкова

На рисунке 1.21 показаны графики с синими и красными кривыми зависимости удельной изобарной массовой теплоемкости воды C_p от температуры T при атмосферном давлении. Первый график построен по формуляции 1995 года (синяя кривая), а второй 1997 года (красная кривая). Отличия существенные, но только при температурах 30-50°C. Если температуру повышать, то при 100°C вода превратится в пар (см. также график на рис. 9.21 в главе 9), у которого удельная изобарная теплоемкость вдвое ниже. Тем не менее, мы видим, что нагревать воду на один градус Цельсия (на один кельвин), затрачивая минимум энергии, нужно при температуре 36-39°C. А на сколько процентов человек состоит из воды!? Вот вам одна из возможных причин, почему у теплокровных животных температура тела находится в пределах 36-39 градусов по шкале Цельсия. Или это просто совпадение? Уж очень отличия незначительные! Но график в чём-то поучителен.

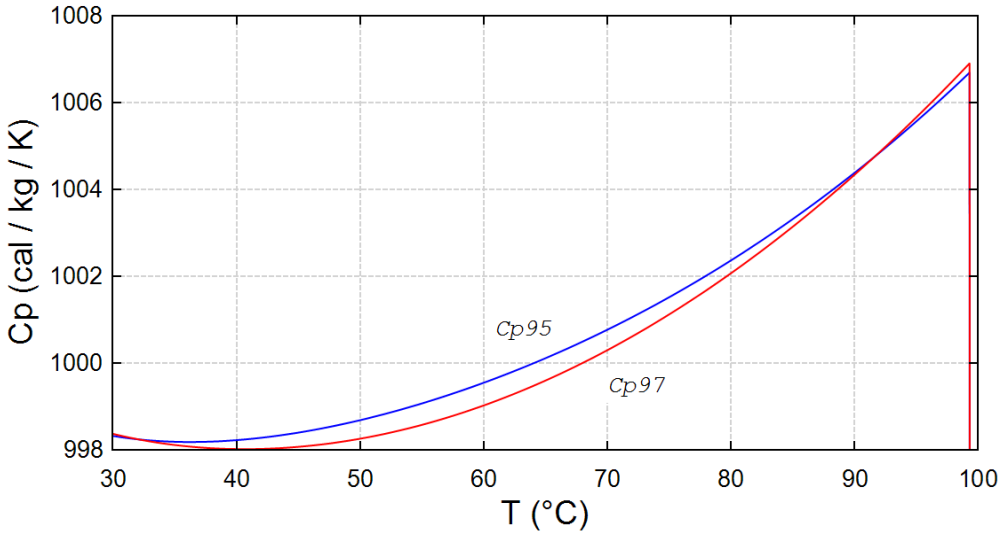
$$IAPWS95 := \text{"H2O"} \qquad IAPWS97 := \text{"IF97::H2O"}$$

$$Cp95(T) := \text{CoolProp_Props}(\text{"CPMASS"}, \text{"P"}, 1\ \text{atm}, \text{"T"}, T, IAPWS95)\ \frac{\text{kg K}}{\text{cal}}$$

$$Cp97(T) := \text{CoolProp_Props}(\text{"CPMASS"}, \text{"P"}, 1\ \text{atm}, \text{"T"}, T, IAPWS97)\ \frac{\text{kg K}}{\text{cal}}$$



$$\begin{cases} Cp95(T\ °C) \\ Cp97(T\ °C) \end{cases}$$



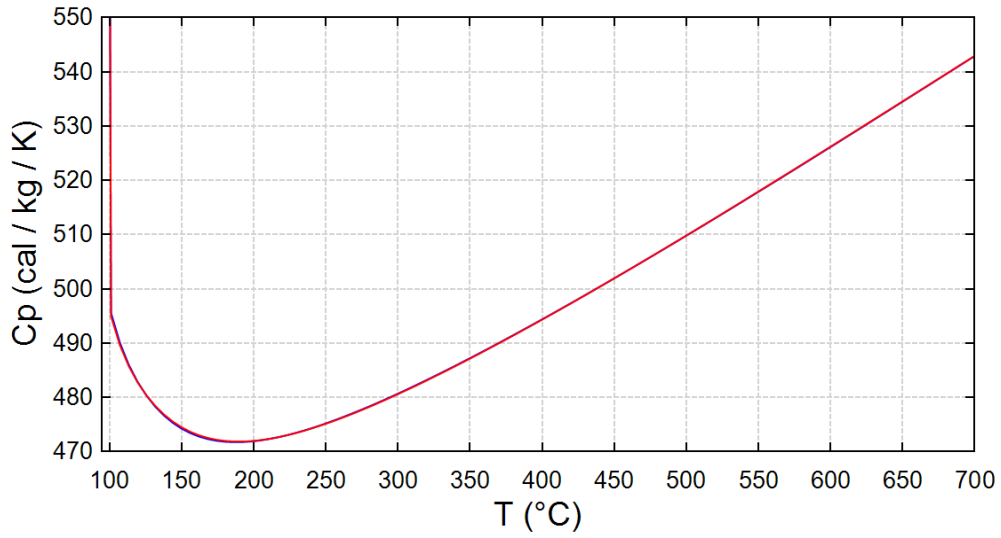


Рис. 1.21 Зависимость изобарной массовой теплоемкости воды от температуры при атмосферном давлении: две формуляции IAPWS (на нижнем графике две кривые практически совпали)

Кстати, об упомянутой в самом начале главы газете «Правда». В 70-годы прошлого века в МЭИ появилась первая в СССР аудитория, оборудованная телевизорами для дополнительной иллюстрации лекционных материалов. В наше время это стало рутиной – почти все учебные помещения имеют компьютерные проекторы с цветным качественным изображением. Более того, можно напустить в аудитории «дыму» и показывать поверх голов студентов лазерное шоу трехмерных объектов – парового котла, турбины, да и всей электростанции в целом. Но в прошлом веке это произвело фурор. Так вот, одну из лекций в новой аудитории МЭИ посетил корреспондент «Правды» и написал об этом заметку, где была такая фраза: «Лектор нажимает кнопку и на экране телевизора как живая появляется петля Гистерезиса». Коллеги лектора после этого подходили к нему и с ехидцей спрашивали: «Ну как там поживает старик Гистерезис?». Это была специализированная аудитория электротехники. Упомянутая петля (кривая, изображающая ход зависимости намагничивания от напряженности внешнего поля) отображает некое запаздывание – гистерезис по-гречески. Корреспондент же посчитал, что это имя ученого. За такие ошибки-опечатки в те времена могли лишить работы не только самого корреспондента, но и корректора вкупе с редактором. Строгие выговоры получали просто за неправильные переносы слов. Теперь же их полно в текстах и за этим мало кто следит. А в сороковые-пятидесятые годы прошлого века можно было загреметь в лагеря, если в газете, журнале или книге сделали перенос в словах Ленин, Сталин и др.

Задания читателям:

1. Нарисуйте в среде SMath области применимости формуляции IAPWS-95 в координатах, отмеченных на рис. 1.8-1.11 для формуляции 1997 года.

Литература

1. Очков В.Ф. Моя армейская энергетика // Энергия: экономика, техника, экология. № 2, 2022 – статья дополнена и другими воспоминаниями автора – см. http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-2-2022-My-Energy.pdf
2. Очков В.Ф., Орлов К.А. Цифровой двойник воды // Энергия: экономика, техника, экология. № 10, 2021, С. 18-22 (http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Ochkov-3water.pdf)
3. Очков В.Ф., Орлов К.А. Когда p v = T // Законодательная и прикладная метрология. № 2. 2022. С. 38-44 (http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf)
4. Александров А.А. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф Очков. - 2-е изд., перераб. и допол. - М.: Издательский дом МЭИ. 2017. - 226 [8] с.: ил. (http://twt.mpei.ac.ru/rbtpp/index.html)
5. Александров А.А., Охотин В.С., Орлов К.А. Техническая термодинамика. — М.: Издательство МЭИ, 2023. — 457 с. (http://www.twt.mpei.ac.ru/TTHB/TT-AOO.pdf)

Глава 2 Пакет CoolProp Wrapper
Или
Доверяй, но проверяй!
(написано вместе с Е.А. Шелгинским)

В данной главе будут кратко описаны функции из свободно распространяемого приложения CoolProp Wrapper по теплофизическим свойствам (далее ТФС) теплоносителей и рабочих веществ, которые будут использоваться в вычислениях, описанных в главах этого учебного пособия.

Когда речь заходит о свободно распространяемых программах, то на ум приходят две поговорки: «*Бесплатный сыр бывает только в мышеловке*» и «*Дареному коню в зубы не смотрят*». Если иметь ввиду приложение CoolProp Wrapper, то дареным оказывается не просто конь, а жеребая (беременная) кобыла, которая носит в себе жеребенка. Он появится на свет, когда будут сделаны действия, показанные на рис. 2.1-2.5 – когда к бесплатной программе SMath будет подгружен данное бесплатное приложение (плагин). А давайте «посмотрим этому жеребенку в зубы»!

Вводное замечание.

Когда у нас возникают вопросы к Природе (к Естеству), то мы не можем напрямую обратиться к Создателю – мы должны задавать вопросы самой Природе: проводить эксперимент и получать ответ. Так формировалась группа наук под названием естествознание. «*Вот тебе наука на будущее!*» – еще одна очень уместная здесь поговорка.

Человечество создало Вторую Природу – окружающую нас технику и их цифровые двойники – компьютерные программы и прочее. К этой второй природе тоже возникают вопросы. Казалось бы, что все вопросы по Второй Природе нужно задавать напрямую к Создателю или к Природе – к изобретателям и программистам, к пока ещё живым людям. Но если даже они известны и доступны, то нередко они не знают ответов на возникшие у пользователей вопросы и сами удивляются неожиданным свойствам своих детищ. Поэтому над Второй Природой тоже можно и нужно проводить эксперименты – испытывать технику и тестировать программы. Это касается и программы SMath, и приложения к ней – плагину CoolProp Wrapper. Ниже будут приведены сведения из скудной документации пакета и результаты собственных экспериментов авторов данного учебного пособия (см., например, конец главы 4 с экспериментами по смесям газов и жидкостей).

2.1. 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 правой кнопкой мыши для установки – см. рис. 2.1, 2.2 и 2.3.

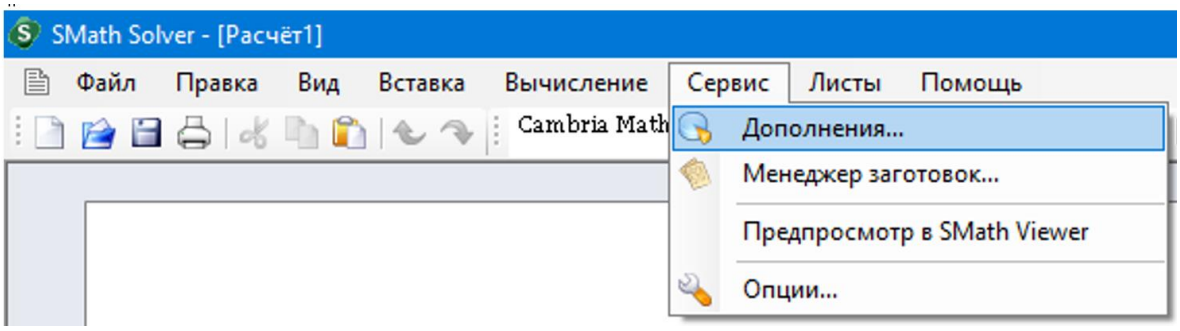


Рис. 2.1 Вкладка «Сервис» и «Дополнения»

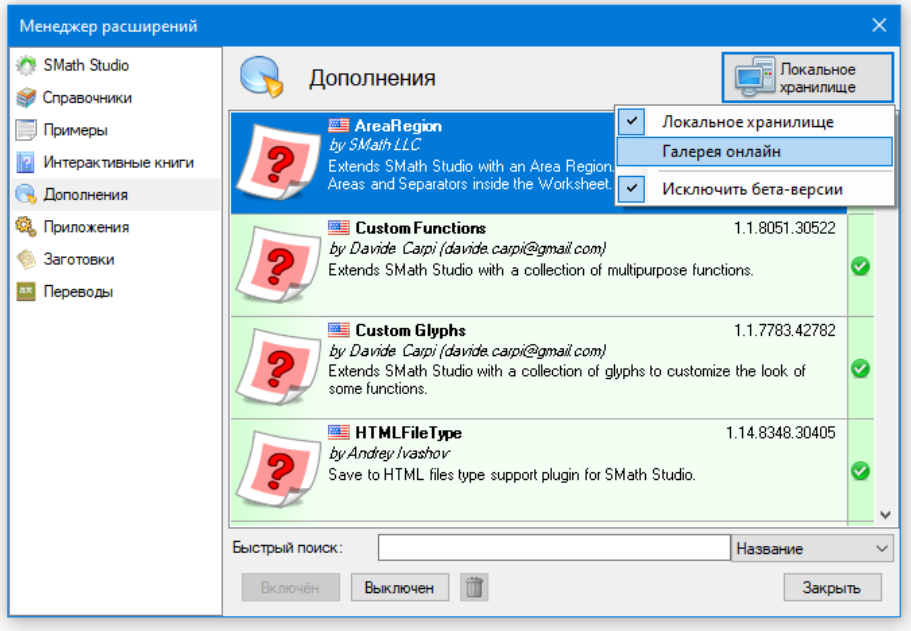


Рис. 2.2 Открытие раздела «Галерея онлайн» в «Менеджере расширений»

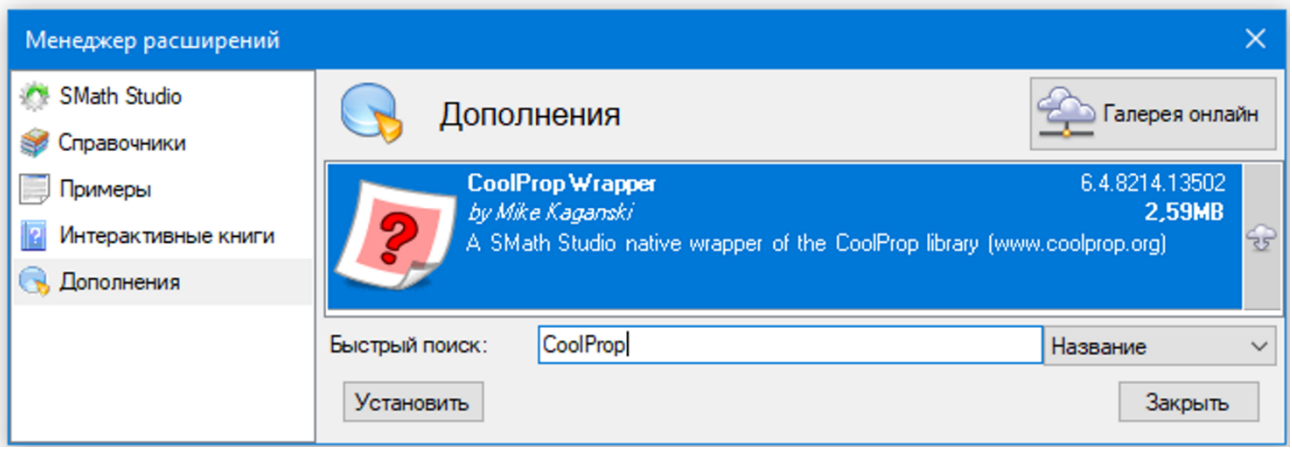


Рис. 2.3 Поиск пакета CoolProp Wrapper

После установки дополнения оно появится во вкладке «Локальное хранилище» (рис. 2.4) и пропадет во вкладке «Галерея онлайн» (рис. 2.2).

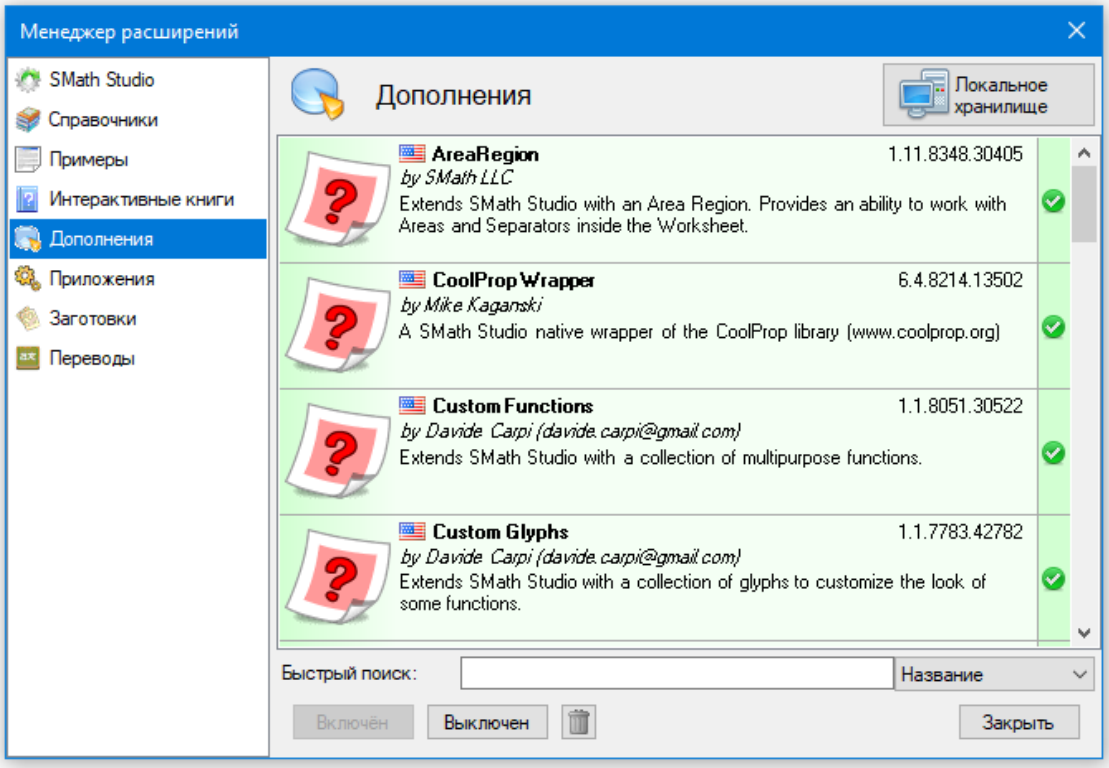


Рис. 2.4 Приложение CoolProp Wrapper в разделе «Локальное хранилище» в «Менеджере расширений» после установки

После этого можно начинать пользоваться функционалом данного дополнения – вызывать их в среде SMath.

Убедиться в том, что данный пакет установлен на вашем компьютере можно и так – набрать на клавиатуре латинские буквы `coo` и увидеть выпавший список функций, имена которых начинаются на эти буквы (рис. 2.5).

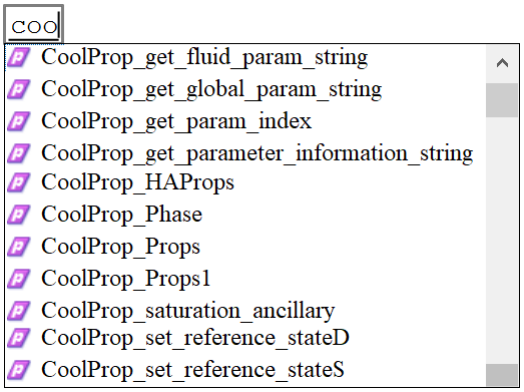


Рис. 2.5 Выпадающий список функций пакета CoolProp Wrapper

2.2. Основные функции пакта CoolProp Wrapper

Многим пользователям будет достаточно вызова только «главной» функции `CoolProp_Props()` для нахождения ТФС чистых и псевдочистых жидкостей, а также их смесей – см, например, рис. 3.3 в главе 3.

На рисунке 2.5 показано, как можно определить температуру насыщения воды и водяного пара при давлении 1 атмосфера. Температура выдается в кельвинах, которые можно заменить на другие единицы и шкалы температуры – см рис. 2.13 в главе 2. Допустимо также изменить число значащих цифр в ответе – см. рис. П7 в Предисловии.

```
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. 2.5 Определение температуры насыщения воды через функцию CoolProp Props

В данном примере вызова главной функции пакета CoolProp Wrapper первый аргумент – это выходное свойство (см. таблицу 2.2), которое будет возвращено – 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 прямые 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 прямых кавычках или переменная, хранящая эту строку (см. рис. 3.3 в главе 3 со строковой переменной *GS*). В данном случае нас интересует

вода, поэтому там записано "Water". Можно также записать здесь "water", "H2O" или "R718"[12].

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 промышленных 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]. Чтобы убрать эти отличия – перейти к IAPWS-IF97, достаточно записи "Water", "water", "H2O" или "R718 заменить на запись "IF97::H2O". Но тогда перестанут работать некоторые функции – см. рис. 2.6.

```
CoolProp_Phase("T", 20 °C, "P", 1 atm, "H2O") = "liquid" =
CoolProp_Phase("T", 20 °C, "P", 1 atm, "IF97::H2O")
        = "unknown: This backend does not implement
```

Рис. 2.6 Сравнение одной функции CoolProp для формуляций 1995 и 1997 года

Если необходимо возвратить параметры не воды, а других веществ, скажем фреонов, то на месте шестого аргумента необходимо указать имя (маркировку) данного вещества. Например, если необходимо узнать при заданном давлении температуру насыщения изобутана (R600a), то запись будет выглядеть так (см. рис. 2.7):

```
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
```

[12] Можно переделать старый анекдот так:
– Ты знаешь, как теплофизики нашу воду называют!?
- Как?
- R718.
- Поубивал бы я их!
В этой шутке есть доля истины – воду нужно было бы назвать R1! Вода – это главный теплоноситель и рабочее тело.

Рис. 2.7 Определение температуры насыщения изобутана через функцию CoolProp Props

Узнать имена веществ для возврата их ТФС с помощью пакета CoolProp Wrapper можно на официальном сайте программы [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 в пределах от 0 до 1.

Например, при давлении насыщения 1 атм. удельные массовые энтальпии жидкости и пара можно вернуть следующим образом (см. рис. 2.8.):

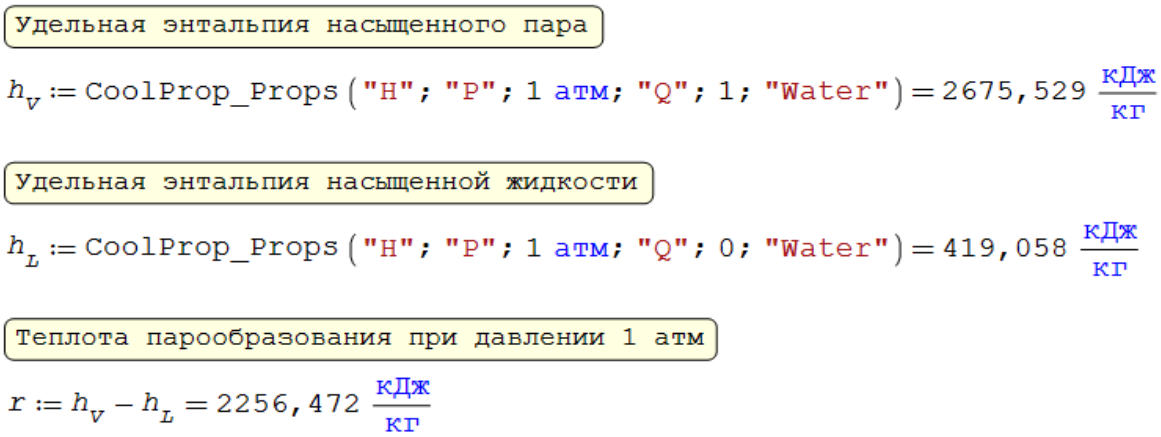


Рис. 2.8 Определение температуры насыщения воды через функцию CoolProp

Можно узнать информацию о веществе, используя функции, показанные на рис. 2.9.

```
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. 2.9 Возврат информации о веществе

Для получения тривиальных входных данных, т.е. тех данных, которые не зависят от термодинамического состояния, можно также воспользоваться функцией `CoolProp_Props1` с двумя аргументами.

Тривиальный параметр – это критическая температура и давление. (см. рис. 2.10).

Критическая температура воды:

`CoolProp_Props1("H2O"; "Tcrit") = 373,946 °C`

Критическое давление воды:

`CoolProp_Props1("H2O"; "Pcrit") = 22,064 МПа`

Рис. 2.10 Определение критической температуры и давления воды

Также можно использовать фантомные величины в функции `CoolProp_Props` с шестью аргументами – см. рис. 2.11.

Критическая температура воды:

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

Критическое давление воды:

$\mathrm{CoolProp_Props("Pcrit"; ""; 0; ""; 0; "Water")} = 2{,}206 \cdot 10^{7}\ \mathrm{Па}$

Рис. 2.11 Определение критической температуры и давления воды (вариант 2)

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

Для того, чтобы отобразить необходимые величины с небазовой единицей, нужно в поле ответа ввести вручную те единицы измерения, в которых необходимо выдать ответ. Пример на рис. 2.12.

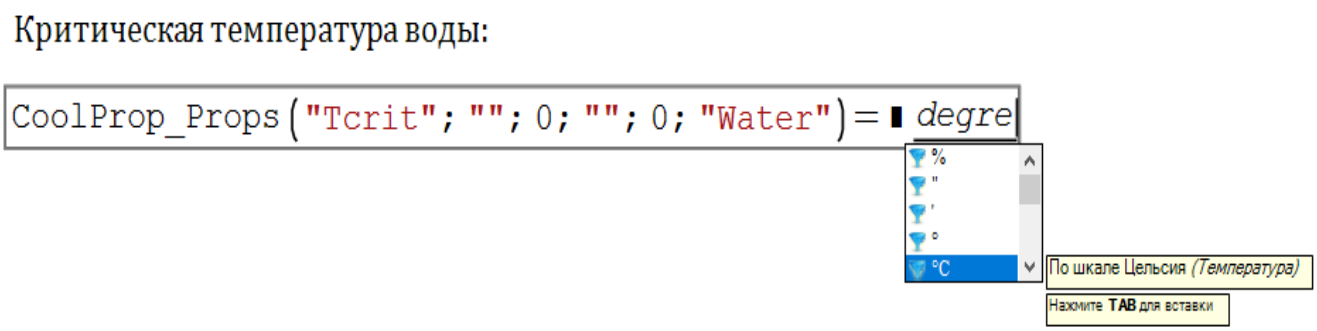


Рис. 2.12 Указание необходимой размерности при расчете в SMath Studio на примере функции CoolProp_Props

После выбора нужных единиц измерения, программа выдаст нужное измененное значение – см. рис. 2.13.

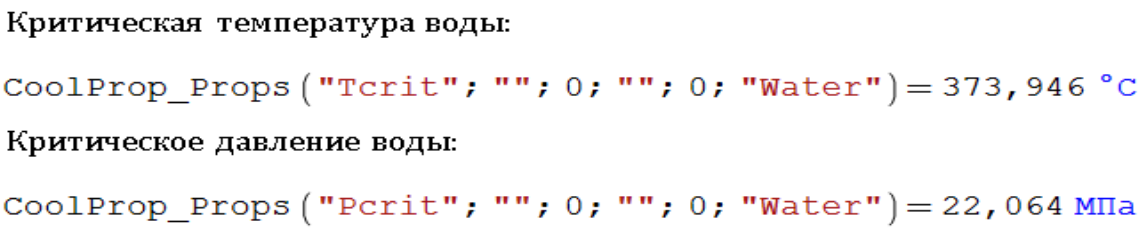


Рис. 2.13 Определение критической температуры и давления воды через функцию CoolProp_Props в нужных размерностях

Если в вышепоказанных примерах буквы `crit` заменить на буквы `triple`, то будут выданы параметры тройной точки.

Стоит также отметить, что при переводе значения температуры из минусовых градусов Цельсия в кельвины в среде SMath может возникать следующая ошибка – см. рис. 2.14:

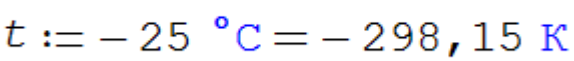


Рис. 2.14 Некорректный перевод отрицательных значений градусов Цельсия в кельвины

Исправить такой неверный ответ помогут скобки – см. рис. 2.15:

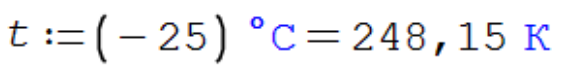


Рис. 2.15 Перевод отрицательных значений градусов Цельсия в кельвины в SMath Studio

Функция `CoolProp_Phase` с пятью аргументами используется для нахождения фазового состояния вещества – см. рис. 2.16.

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

Рис. 2.16 Определение фазового состояния вещества через функцию CoolProp_Phase

Функция возвращает фазовое состояние в виде строки (текст в кавычках) с соответствующими 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. 2.17.

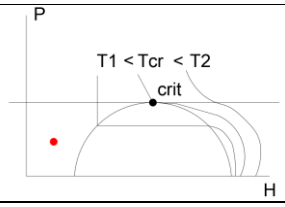
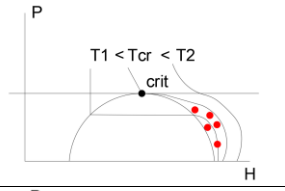
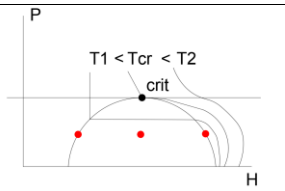
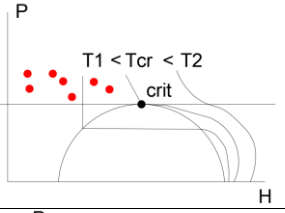
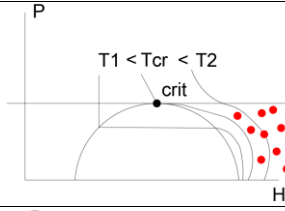
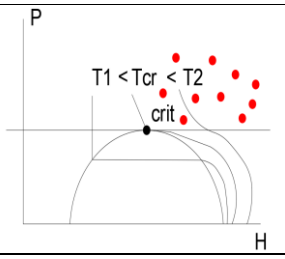
```
Линия насыщения (0)
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "Q"; 0; "water") = 6
Линия насыщения (1)
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "Q"; 1; "water") = 6
Газ
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "T"; 500 К; "water") = 5
Жидкость
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "T"; 300 К; "water") = 0
Двухфазная область
CoolProp_Props("Phase"; "P"; 1 атм; "Q"; 0,5; "water") = 6
```

Рис. 2.17 Определение фазового состояния вещества (воды) через функцию CoolProp_Props в численном виде

Соответствующие числа, относящиеся к конкретному состоянию вещества, указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Соответствие числовых индикаторов агрегатного состояния вещества при использовании функции `CoolProp_Props`

Агрегатное состояние вещества	Область	Цифровое значение фазового состояния через функцию CoolProp_Props	Положение точек на p, h - диаграмме

Жидкость	p < Pcrit и T < Tcrit ниже линии насыщения	0	
Газ	p < Pcrit и T < Tcrit выше линии насыщения	5	
Двухфазное	p < Pcrit и T < Tcrit смесь жидкости и газа	6	
Сверхкритическая жидкость	p > Pcrit и T < Tcrit	3	
Сверхкритический газ	p < Pcrit и T > Tcrit	2	
Сверхкритическое состояние вещества	p > Pcrit и T > Tcrit	1	

На рисунке 2.18 показана h, s-диаграмма области формуляции IAPWS-95 воды и водяного пара с прочерченными на ней критической изобарой и критической изотермой, которые разделили данную область на шесть подобластей, описанных в таблице 2.1.

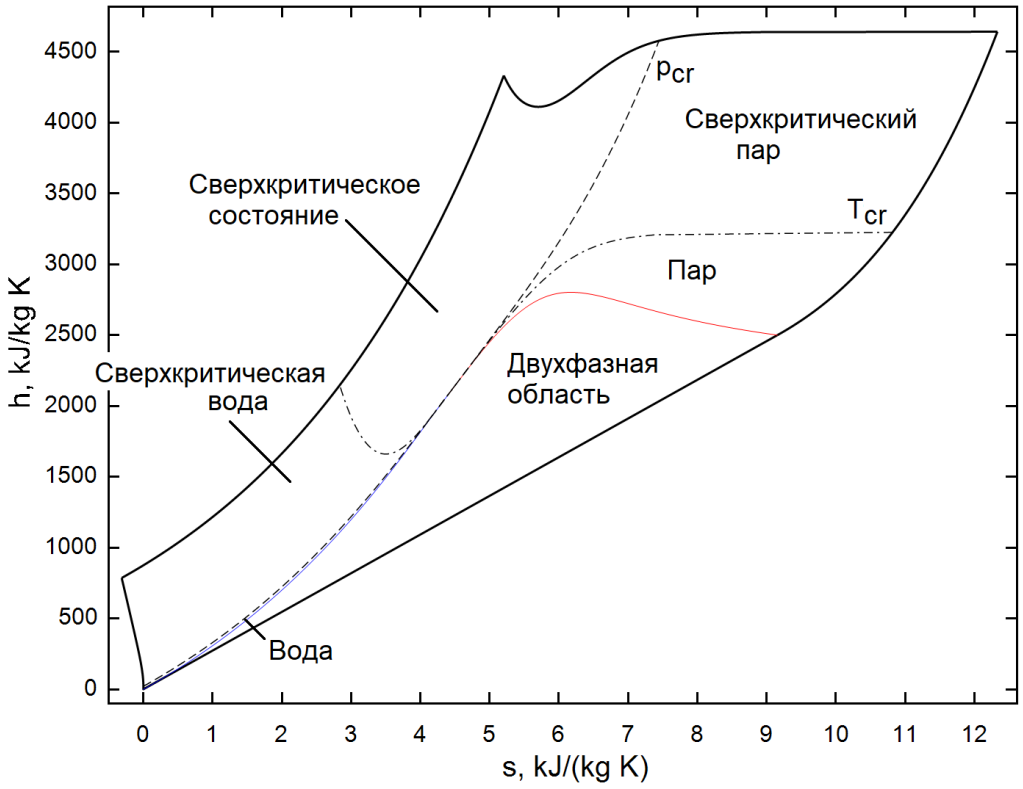


Рис. 2.18 Области состояний воды и водяного пара на h, s-диаграмме (см. рис. 1.16 в главе 1)

В таблице 2.2 показаны некоторые возможные входные (I) и выходные (O) параметры в функции `CoolProp_Props`.

Таблица 2.2. Некоторые входные и выходные параметры функции `CoolProp_Props`.

Параметр	Единица измерения (СИ)	Возможность использовать как входные данные (I) / как искомые данные (O)	Описание
CONDUCTIVITY, L, conductivity	W/(m K)	O	Теплопроводность
C, CPMASS, Cpmass	J/(kg K)	O	Удельная массовая изобарная теплоемкость
CVMASS, Cvmass	J/(kg K)		Удельная массовая изохорная теплоемкость
DMOLAR, Dmolar	mol/m^3	IO	Молярная плотность
D, DMASS, Dmass	kg/m^3	IO	Массовая плотность
HMOLAR, Hmolar	J/mol	IO	Удельная молярная энтальпия
H, HMASS, Hmass	J/kg	IO	Удельная массовая энтальпия
M, MOLARMASS, MOLAR_MASS, MOLEMASS, molar_mass, molarmass, molemass	kg/mol	O	Молярная масса
P	Pa	IO	Давление

Q	mol / mol	IO	Степень сухости
SMOLAR, Smolar	J/(mol K)	IO	Молярная удельная энтропия
S, SMASS, Smass	J/(mol K)	IO	Удельная массовая энтропия
TCRIT, T_CRITICAL, T_critical, Tcrit	K	O	Критическая температура
TTRIPLE, T_TRIPLE, T_triple, Ttriple	K	O	Температура в тройной точке
PCRIT, P_CRITICAL, Pcrit, p_critical, pcrit	Pa	O	Критическое давление
PTRIPLE, P_TRIPLE, p_triple, ptriple	Pa	O	Давление в тройной точке
V, VISCOSITY, viscosity	Pa·s	O	Вязкость

Узнать о всех наименованиях входных и выходных параметров можно на официальном сайте пакета [3] на странице http://www.coolprop.org/coolprop/HighLevelAPI.html. На рисунке 2.19 показано, как на этом сайте можно быстро найти нужную информацию через поиск по ключевому слову (Ctrl+F).

Рис. 2.19 Поиск на сайте пакета CoolProp Wrapper

2.3. Влажный воздух

В теплоэнергетических и теплотехнических задачах часто необходимо использовать свойства влажного воздуха, например, при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования. Пакет CoolProp Wrapper обладает базой данных для расчета свойств влажного воздуха (**H**umid **A**ir Properties).

Для расчета свойств влажного воздуха вызывается функция `CoolProp_HAProps` с семью аргументами. Первый аргумент – это искомое свойство, которое необходимо вернуть. Затем идут входные параметры. Пример на рисунке 2.20.

```
Удельная энтальпия влажного воздуха, отнесенная к 1 кг сухого воздуха при 1 атмосфере 298,15 K и относительной влажности 50%
CoolProp_HAProps("H"; "P"; 1 атм; "T"; 298,15 K; "R"; 50 %) = 50,4235 кДж/кг
```

Рис. 2.20 Определение удельной энтальпии сухого воздуха с помощью функции CoolProp_HAProps

Также, как и для функции `CoolProp_Props`, у функции `CoolProp_HAProps` для определения ТФС влажного воздуха есть собственные наименования входных и выходных параметров. Некоторые из них отмечены в таблице 2.3. Ознакомиться со всеми параметрами можно на официальном сайте пакета CoolProp Wrapper (http://www.coolprop.org/fluid_properties/HumidAir.html) [4].

Таблица 2.3. Некоторые входные и выходные параметры функции HAProps.

Параметр	Единица измерения (СИ)	Возможность использовать как входные данные (I) / как искомые данные (O)	Описание
B, Twb, T_wb, WetBulb	K	I/O	Температура влажного термометра
C, cp	$\frac{J}{kg\ dry\ air \cdot К}$	O	Изобарная теплоемкость смеси на килограмм сухого воздуха
Cha, cp_ha	$\frac{J}{kg\ humid\ air \cdot К}$	O	Изобарная теплоемкость смеси на килограмм влажного воздуха
CV	$\frac{J}{kg\ dry\ air \cdot К}$	O	Изохорная теплоемкость смеси на килограмм сухого воздуха
CVha, cv_ha	$\frac{J}{kg\ humid\ air \cdot К}$	O	Изохорная теплоемкость смеси на килограмм влажного воздуха
D, Tdp, DewPoint, T_dp	K	Input/O	Температура точки росы
H, Had, Enthalpy	$\frac{J}{kg\ dry\ air}$	Input / Output	Энтальпия смеси на килограмм сухого воздуха
Hha	$\frac{J}{kg\ humid\ air}$	Input / Output	Энтальпия смеси на килограмм влажного воздуха
K, k, Conductivity	$\frac{W}{m \cdot К}$	Output	Теплопроводность влажного воздуха
M, Visc, mu	Pa·s	Output	Вязкость влажного воздуха

psi_w, Y	$\frac{mol\ water}{mol\ humid\ air}$	Input / Output	Мольная доля воды

В главе 5 будет продолжена тема влажного воздуха.

Заканчивая первые две главы с описанием используемых в книге двух пакетов по теплофизическим свойствам веществ, отметим следующее:

1. Пакет CoolProp Wrapper в основном был задействован там, где речь шла об хладагентах (главы 5-7) и новых рабочих телах (глава 12). Если же расчёт касался традиционных рабочих тел и теплоносителей теплоэнергетики – воды, водяного пара, газов и их смесей (дымовых газов, например), то в ход шёл авторский пакет WaterSteamPro.
2. Пакет WaterSteamPro сертифицирован (см. http://www.wsp.ru/images/gssd_ru.png), чего не скажешь о втором пакете. Эта особенность отразилась в названии второй главы книги.
3. В наше неспокойное время, наполненное разными санкциями, может оказаться так, что пакет CoolProp Wrapper нельзя будет скачивать с облака, которое территориально находится вне нашей страны. Это уже случилось с пакетом REFPROP.

Задание читателям

1. Сравните соответствие численного значения фазного состояния вещества с тем, которое возвращается через функцию `CoolProp_Phase` для 10 различных веществ при одинаковых значениях температуры и давления.
2. Определите все параметры вещества, указанные в таблице 2.2 для следующих веществ: изобутан, бутан, аммиак, R134a, R404a.
3. Определите через функцию `CoolProp_HAProps` все параметры, указанные в таблице 2.3 при следующих условиях: температура сухого термометра 45°C, относительная влажность 60%.

Список литературы и источников:

1. Александров А.А. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф Очков. - 2-е изд., перераб. и допол. - М.: Издательский дом МЭИ. 2017. – 226 [8] с.: ил. (http://twt.mpei.ac.ru/rbtpp/index.html)
2. WaterSteamPro. Программа для расчета свойств воды, водяного пара, газа и смесей газов (http://www.wsp.ru/ru)
3. CoolProp Wrapper. Pure and Pseudo-Pure fluid properties. (http://www.coolprop.org/fluid_properties/PurePseudoPure.html#list-of-fluids)
4. CoolProp Wrapper. Humid air Properties (http://www.coolprop.org/fluid_properties/HumidAir.html)

Глава 3 Двигатель внешнего удаленного сгорания
Или
Решаем задачи термодинамики по-новому!

Все знают такое выражение – КПД как у паровоза. Между тем, рабочий цикл паровоза – это цикл Карно (две изотермы и две адиабаты), у которого, как известно, самый высокий термический КПД по сравнению с другими термодинамическими циклами: Отто, Дизеля, Тринклера, Брайтона, Ренкина и т.д. Невысокий КПД паровоза объясняется отсутствием у него конденсатора, снижающего нижнюю температуру «паровозного» цикла Карно. Ну и верхняя температура имеет не очень высокое значение. Были попытки создания паровозов с конденсацией, выходящего из цилиндров паровой машины пара и возврата конденсата в котел. Но это делалось скорее для экономии воды, а не топлива. Паровозы на станциях заправлялись не только углем, но и водой, требующей специальной водоподготовки, снижающей накипеобразование и коррозию в паровом котле. А в засушливых районах Земли с водой были проблемы. Вспомним знаменитый Турксиб – детище первой советской пятилетки – железную дорогу из Сибири в Среднюю Азию! Выпускаемый из цилиндров паровоза пар, направлялся в дымовую трубу для создания тяги воздуха в топке. Паровозная труба – это своеобразный эжектор: некое конусное устройство, выполняющее функции дымососа. Был на паровозе и пароструйный инжектор, подающий воду в паровой котел (особый род питательного насоса без крутящихся частей). В целом все это составляло очень сложную конструкцию – памятник инженерной мысли. Памятник не только в переносном, но и в прямом смысле – на многих железнодорожных станциях стоят паровозы на постаментах[13]. Не редки и ретропоезда на паровозной тяге[14].

Но все попытки создания конденсационных паровозов, и других усовершенствований на этих локомотивах прекратились с появлением тепловозов и электровозов. Заметим, что паровые машины пароходов изначально были оборудованы

[13] В Лондоне у вокзала «Виктория» есть музей, где собраны экземпляры почти всех моделей английских паровозов. А в музее науки и техники этого города работает настоящая паровая машина, вырабатывающая электричество для этого научно-просветительского учреждения. Паровозы когда-то бегали даже в тоннелях лондонского метро. В музее транспорта Лондона есть соответствующая экспозиция.

[14] Немецкий ученый-теплотехник Ханс-Йохан Кречмар – автор одного из справочников по свойствам воды («таблиц Вукаловича»), друг и коллега второго автора данного учебного пособия праздновал свой 60-летний юбилей на паровозном ретро поезде узкоколейки. Все это происходило в окрестностях города Циттау на стыке границ Германии, Польши и Чехии. На подарке, который юбиляр получил от автора, был прорисован цикл паровой машины с изобарой в 60 бар! В другой свой приезд в Германию автор с этим приятелем катался по Эльбе на колесном ретропароходе с паровой машиной. Во как!

трубчатыми конденсаторами, в которые поступала забортная вода, конденсирующая «мятый» пар. Поэтому-то пароходы не пыхтели как паровозы – не выпускали резко из трубы порции дыма[15] в такт с ходом поршня паровой машины. В настоящее время такие *двигатели внешнего сгорания* на многих гражданских судах и военных кораблях остались, но это не цилиндры с поршнями, а паровые турбины, работающие в связке с электрогенераторами, питающими тяговые электродвигатели, которые в свою очередь крутят гребные винты. Паровой котел при этом может быть и ядерным (надводные и подводные атомоходы – см. главу 9). Паровые машины на пароходах с поршнями и цилиндрами крутили, как правило, не гребные винты, а гребные колеса. Альтернативное решение – установка двигателя внутреннего, а не внешнего сгорания – дизеля. Пароход превращался в теплоход (дизель-электроход).

А вот про *бестопочный паровоз* (fireless locomotive) не знают даже профессиональные теплотехники[16]. Спел-чекер текстового редактора Word, в среде которого писалась эта книга, тоже не знаком с таким прилагательным – «бестопочный» и предлагает замену – «бестолочный», т.е. не имеющий никакого толка (бестолочь), что, кстати, в наше время близко к истине. Эти паровозы когда-то давно бегали в шахтах, на нефтеперегонных и пороховых заводах, на лесопилках – везде, где была опасность взрыва или пожара от открытого огня, который вылетал из паровозной трубы. Об эффективности бестопочных паровозов особо не думали, руководствуясь пословицей (правилом): «*Не до жиру – быть бы живу!*» Сейчас эти локомотивы полностью вышли из употребления – им на смену пришли другие безопасные транспортные средства.

---

[15] Еще одно место для выпуска пара – это паровозный или пароходный гудок. Вспомним поговорку: «Весь пар ушел в гудок!» Эти устройства не просто подавали сигналы, а были своеобразными музыкальными инструментами, которые настраивали и которыми гордились. В фильме Эльдара Рязанова «Жестокий романс» по пьесе Островского «Бесприданница» есть любовная сцена с пароходным гудком: «Два коротких и один длинный!». Есть даже такая песня: «Паровозным гудком растревожена…» [2]. Паровозный выхлоп дал название повести Ивана Тургенева "Дым".
Нельзя здесь не вспомнить и пароходную трагическую песню со словами «Товарищ, я вахты не в силах стоять, – / Сказал кочегар кочегару, – / Огни в моих топках совсем прогорят, / В котлах не сдержать мне уж пару.»
В музее транспорта швейцарского города Люцерн есть такой экспонат-тренажёр. В ящик без одной боковой стенки насыпано что-то около двухсот килограмм угля. Посетителям музея предлагается за одну минуту переложить лопатой этот уголь в другой такой же ящик. Этим имитируется работа паровозного кочегара. Не все укладываются в этот норматив. А кочегар кидает уголь в топку паровоза не одну минуту – он работает часами! Это был тяжелейший, если не сказать каторжный труд. Только на закате эры паровозов появились механические углеподатчики (стокеры).

[16] Бестопочный паровоз звучит как сапоги всмятку. Авторы книги опросили два десятка своих коллег-теплотехников, но только один из них сказал, что что-то слышал о таком чуде техники. Потом, правда, оказалось, что он имел ввиду не бестопочный, а бестендерный паровоз – паровоз-танк, на котором емкости (танки) для жидкого топлива и воды располагались по бокам парового котла, а не в прицепе – в тендере.

Суть бестопочного паровоза такова. Толстостенная цилиндрическая ёмкость (котел-аккумулятор) примерно наполовину заполнялась водой, затем она плотно закрывалась и «ставилась на огонь» (внешнее сгорание – смотрим название главы и вспоминаем скороварку[17], ускоряющую процесс приготовления пищи). Давление и температура в таком сосуде изохорически (при постоянном объёме) поднимались до тех пор, пока не… засвистит предохранительный клапан-свисток. После этого ёмкость ставили на паровоз и пускали выходящий из неё пар в цилиндры паровой машины. В реальности, конечно, никакую ёмкость на огонь не ставили, а просто подгоняли бестопочный паровоз к специальной котельной, пар которой через систему труб нагревал воду в котле такого «огнебезопасного» локомотива.

А давайте построим диаграмму состояния рабочего тела такой тепловой машины. Эту инженерную конструкцию назвать тепловым двигателем будет не совсем корректно: топка-то отсутствует – она находится, как сейчас выражаются преподаватели и студенты, на «удалёнке».

Обычно для иллюстрации процесса изохорного нагрева пароводяной смеси используют диаграмму «давление-удельный объем» – p, v диаграмму (см. рис. 3.1). На таких и других подобных диаграммах (p, T – давление-температура, T, s – температура-энтропия, h, s – энтальпия-энтропия (диаграмма Молье[18]) прежде всего рисуют две граничные кривые – синюю и красную[19], выходящие из критической точки (Cr). Здесь, как правило, упоминают и о тройной точке Но на диаграммах (кроме p, T – диаграммы) эта точка обычно раздваивается, что позволяет говорить не об одной, а о двух тройных точках, соединенных особой линией. Эту линию в зелёном цвете можно видеть, к примеру, на рис. 1.16 в главе 1, отмечающую изобару-изотерму на «нулевой» границе области формуляции IAPWS-95 по свойствам воды и водяного пара.

---

[17] Или автоклав – герметичный аппарат для различных операций, требующих нагрева под давлением выше атмосферного.

[18] Мы огорчаемся из-за того, что за рубежом периодическую таблицу химических элементов забывают или не хотят называть таблицей Менделеева (1834-1904). У немецких теплотехников такая обида связана с h, s – диаграммой, которую вне Германии часто забывают называть диаграммой Рихарда Молье (1863-1935), который впервые построил её в 1903 году в Дрезденском техническом университете, на одном из корпусов которого висит мемориальная доска с именем этого ученого-теплотехника.

[19] «Красная линия, которую нельзя переходить» – избитый пропагандистский штамп. В теплотехнике переход этой линии тоже чреват проблемами. Пар в турбине «переступает» эту линию и становится влажным – проблематичным в отношении эрозии проточной части турбины. Пар бестопочного паровоза, поступающий в цилиндры паровой машины, изначально влажный, что также влечет за собой некоторые проблемы. В обычном же паровозе есть возможность несколько осушить и перегреть пар, выходящий из «топочного» котла. В паротурбинном цикле АЭС (см. главу 9) один влажный пар перегревают другим влажным паром.

В подписи к рисунку 3.1 стоит слово «надутая». Что это означает?

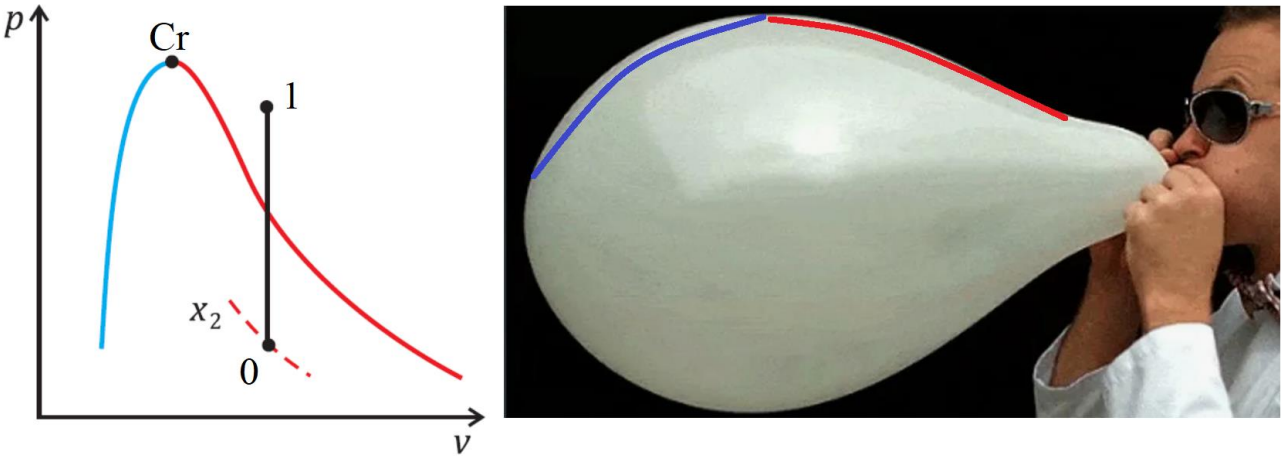


Рис. 3.1 «Надутая» p, v диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

У авторов с такой диаграммой случилась казус! Они затратили уйму времени, пытаясь построить её на компьютере. Возникло даже чувство, что программа SMath, в среде которой это делалось, сломалась. Программу переустановили[20], но и это не помогло. Подозрение пало на графические особенности дисплея компьютера. Встал вопрос о переустановки и самой операционной системы Windows… Но оказалось, что диаграмма-то строится, но её не видно из-за того, что она представляла собой не горбатую («надутую») кривую с критической точкой вверху и с тройными точками по бокам (рис. 3.1), а почти прямой угол, маскирующийся за линиями координатной сетки (см. левый график на рис. 3.2). Синяя линия (насыщение по воде) взмывает вверх от тройной точки до критической точки (вода почти не сжимаема), а продолжающая её красная линия (насыщение по водяному пару) отвесно падает вниз и затем резко сворачивает на горизонтальный участок ко второй критической точке. Увеличение диаграммы (zoom – правый график на рис. 3.2) показывает, что происходит вблизи нуля этого графика.

[20] Напоминаем, что это бесплатно делается за пару минут с сайта www.smath.com.

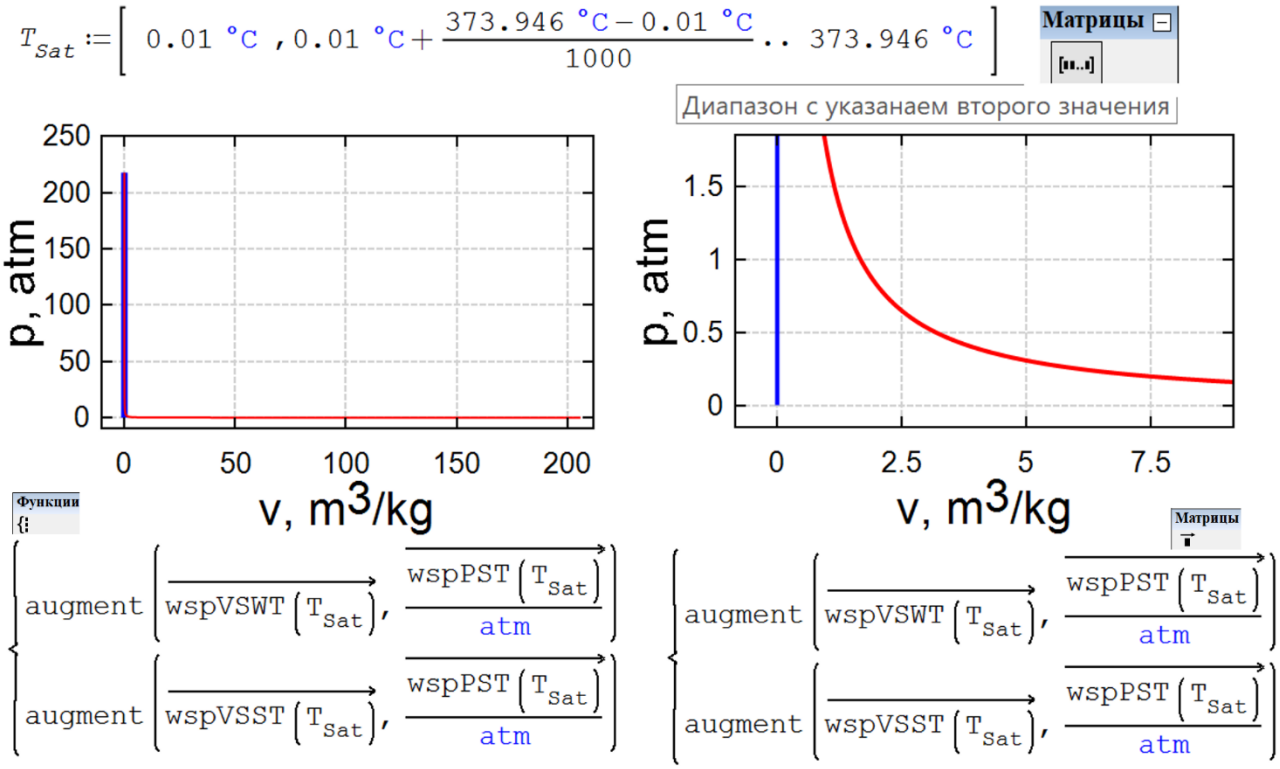


Рис. 3.2 Истинная (не надутая) p, v диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

Левую диаграмму на рис. 3.2, можно сказать, *надули* – как-то так хитро изменили масштабы осей, сделав их нелинейными для того, чтобы получить то, что показанное на рис. 3.1. Вышел некий качественный график[21], который кочует из одной книги по термодинамике в другую… Заодно «надувают» не только график, но и студентов, невольно обманывая[22] их, показывая нереальный график. Авторы нисколько не хотят бросить камень в огород нескольких поколений термодинамиков, но почему же так происходит?

Дело в том, что p, v диаграмма очень востребована при описании тепловых процессов с газами – идеальными и реальными, где нет линий фазовых переходов, а просто $p\ v = R\ T$. (Есть попытки и другой записи этого закона, где универсальную

[21] Если студент на занятии по математике будет строить графики так, как мы строим их в этой книге (проставляем много-много точек и соединяем их отрезками прямых, сливающихся в кривую), то преподаватель выгонит такого студента из аудитории и будет топать при этом ногами и улюлюкать ему вослед. Качественное, а не количественное построение графика подразумевает фиксацию на нем особых точек и воображаемых вспомогательных линий (нули, минимумы-максимумы, разрывы, асимптоты и прочее), проведение через них (около них) самого графика. Что и сделано на рис. В1.

[22] Глагол «надувать» в смысле «обманывать» красочно описан у Шолохова в «Поднятой целине» – деду Щукарю цыган продал надутую пожилую лошадь (клячу [3]).

газовая постоянная считается переводным коэффициентом единиц температуры – см. рис. 3.5 и [1]).

График в среде SMath строится довольно просто – см. сноску 9. В аргумент графика нужно записать матрицу с двумя столбцами, хранящими дискретные численные значения аргумента и функции, отображаемой на графике. Объединяет два вектора в одну матрицу встроенная в SMath функция с именем `augment` (рис. 3.2). Вектор T_{Sat} заполняется по арифметической прогрессии значениями от значения температуры тройной точки до значения критической температуры (в данном примере это 1001 точка, которые сливаются в линию). Далее вступают в работу функции авторского пакета WaterSteamPro (см. www.wsp.ru [4] и главу 1), формирующие три вектора – значения давления (`P`) насыщения (`wspPST`), удельного объема (`V`) воды на линии насыщения (`wspVSWT`) и удельного объема насыщенного водяного пара (`wspVSST`) . Буква `S` обозначает и насыщение (Saturated), и водяной пар (Steam). Стрелочка над именами функций – это оператор векторизации, заставляющий функции работать с каждым элементом вектора, а не с вектором в целом.

Изучение технической термодинамики начинают с идеальных газов. Потом, правда, далеко не всегда) переходят к реальным *флюидам* – к воде и водяному пару, например, прихватив при этом «старую, добрую» p, v – диаграмму. Здесь и возникает феномен «надутости» диаграммы.

Эта проблема решается просто – заменой удельного объема (массового или молярного[23]) на плотность – на обратную величину от удельного объема. Но при такой замене направление работы цикла тепловых машин изменится с привычного «по часовой стрелке» на непривычное – «против часовой стрелки», т.е. против устоявшегося правила[24]. Исправить это несоответствие можно, перевернув по горизонтали ось абсцисс – см. рис. 3.4 и 3.5. Для этого в меню настройки графика достаточно в окне максимального значения записать минимальное значение (0), а в окне минимального значения – максимальное значение (1000 килограмм на метр кубический, если говорить о плотности воды). Это

[23] Молярный объем воды – это тоже своеобразные сапоги всмятку (см. сноску 4). Дело в том, что вода – это не простая механическая смесь молекул с одним атомом кислорода и двумя атомами водорода (H_2O – 18 г/моль), а более сложное соединение с водородными связями. Молярная масса такой воды зависит от многих параметров. Когда-то полагали, что магнитное поле может рвать водородные связи воды, меняя её свойства [6].

[24] Направление против часовой стрелки имеет место при иллюстрации работы холодильной машины, например (см. главу 7). В главе 3 читатель может увидеть некую экзотическую диаграмму цикла Отто (рис. 3.7) с восьмеркой – направление процесса меняется с "по часовой стрелке – тепловая машина" на "против часовой стрелки – холодильная машина".

недокументированный прием! Но и вся наша жизнь в каком-то смысле тоже чей-то недокументированный эксперимент! Кстати, авторы тоже слегка «надувают», обманывают читателя, пририсовывая на графиках в рисунках 3.4 и 3.5 значения удельного объема на верхней оси абсцисс. Средствами настройки графика этого не сделаешь. Приходится «фотошопить» – помещать изображение графика в среду графического редактора Paint, например, и подправлять его.

Вторая проблема, возникающая при переходе от удельного объема к плотности, связана с одним из основополагающих понятий термодинамики – с *работой*. Её рассчитывают через интеграл с двумя значениями давления в пределах интеграла и с удельным объемом под интегралом[25]. Заменить под интегралом удельный объем на плотность несложно. Сложность возникала тогда, когда попытались такой интеграл взять вручную – аналитически. Но в настоящее время интегралы «берутся» в основном численно на компьютере. Упомянутая сложность при этом пропадает, но появляется новая, связанная уже с особенностями численных методов расчёта интегралов.

Работа с плотностью связана не с термодинамическим, а с терминологическим нюансом – с отказом от греческой буквы ρ и с переходом на латинскую букву d. Это диктует компьютер: во многих языках программирования нельзя использовать греческие буквы в именах переменных и функций. Кроме того, в компьютерных пакетах по свойствам флюидов (см главы 1 и 2) уже давно присутствует буква D (density), обозначающая плотность.

И ещё. Формуляция IAPWS-95 по свойствам воды и водяного пара (см. главу 1) в качестве второго входного параметра имеет плотность, а не удельный массовый объем. Первый параметр – это температура.

Важное примечание. Построение цикла в диаграмме «давление -удельный объём», а не в диаграмме «давление-плотность» позволяет проанализировать работу в каждом процессе и в цикле в целом. Для воды цикл в левой части диаграммы не строится (см. левый график на рис. 3.2), поскольку работа сжатия в насосе несоизмерима мала по сравнению с работой расширения в турбине. Авторов, конечно, можно упрекнуть в том, что они перекраивают термодинамические циклы для красивой картинки: учебное пособие должно помочь студентам освоить и без того не простую дисциплину

[25] В романе «Анна Каренина» Л.Н. Толстого Константин Левин (alter-ego Толстого) читал книгу Тиндаля о теплоте и рассуждал об интегралах [7].

«Техническая термодинамика», а не окончательно запутать их. Но авторы надеются, что этого не случиться.

Немного скажем о температуре. Нет теплотехнического расчета, в котором бы не присутствовала эта физическая величина.

Начнем издалека.

Второй автор книги никак не может забыть одну школьную незаслуженную обиду. Спросил его учитель, чему равен синус 45 градусов. Автор не пытался тупо запомнить таблицу тригонометрических функций, как обычно это делают школьники, а старался рассчитывать в уме нужные значения. Итак: угол в 45 градусов имеется у равнобедренного прямоугольного треугольника. Допустим, что оба его катета равны единице, тогда гипотенуза по Пифагору равна корню из двух. Синус – это отношение длины противолежащего катета к длине гипотенузы. Ответ был таков: синус 45 градусов – это единица, деленная на корень из двух! Но учитель не похвалил ученика, а сказал: «Вот эту-то единицу я тебе и поставлю в журнал и дневник! Синус 45 градусов равен корню из двух, делённому на два!».

Эта обида повторилась в наше время, но уже не в отношении к синусу, а в отношении к температуре. Попалась одна статья второго автора этой книги с записью T := 18 °C на глаза одному маститому теплофизику. Он пролистал её и сказал: «Автор – безграмотный в термодинамике человек! Если в расчет вводится температура по шкале Цельсия, то под её хранение выделяют переменную t. В переменную же T записывают абсолютную температуру в кельвинах! Я не буду дальше смотреть статью такого невежды!». Этот «маститый теплофизик» был тоже «надутым» (см. рис. 3.1). Увы, есть такие академики, члены-корреспонденты и прочие корифеи, которые не имеют особых научных заслуг, но занимают высокие должности и поэтому считают, что они умнее всех и могут всех поучать. Но сами они учиться не хотят или не могут. Учиться, например, вести расчеты по-новому – с помощью современных компьютерных программ с их нюансами, один из которых – это работа с температурой.

Итак! Запомним раз и навсегда! В физико-математических пакетах с поддержкой единиц измерения, к коим относится и SMath, температура вводится в расчет с любыми единицами и по любым шкалам (Цельсий, Фаренгейт, Ренкин, Реомюр[26] и т.д.), но

[26] Читаем у Чехова: «Земля изображала из себя пекло. Послеобеденное солнце жгло с таким усердием, что даже Реомюр, висевший в кабинете акцизного, потерялся: дошел до 35,8° и в нерешимости остановился...». Пересчет на привычную шкалу Цельсии сделать несложно, если вспомнить, что вода кипит при 80 градусах

хранится она в памяти компьютера в базовых единицах СИ. Отказ от двоякости в маркировке температуры (t и T) высвобождает переменную t под хранения значения времени (time) – см. предпоследнюю строку на рис. 3.3. В термодинамике под это значение обычно резервируют греческую букву τ, что диссонирует с нормами общей физики, где t это time – время. Кроме того, многие языки программирования не работают с греческими буквами в первую очередь из-за того, что можно запутаться в буквах-двойниках, например в P – латинская (английская) буква пи заглавная и греческая заглавная буква Р (ро). А есть ещё и русская буква эр заглавная.

Правда, утверждение о том, что термодинамика – это часть физики, а техническая термодинамика для теплотехников – это адаптированная часть термодинамики, многие подвергают критике и считают, что техническая термодинамика – это самостоятельная и научная, и учебная дисциплина со своей системой обозначения величин.

Но оставим обиды в стороне и вернемся к расчету, показанному на рис. 3.3.

Паровозов – простых и бестопочных на сверхкритических параметрах, конечно, не было и нет. Но в нашем расчете для наглядности мы примем, что пароводяную смесь в нашей «скороварке» (в автоклаве) нагревают внешним паром так, что давление при этом поднимается до 240 атмосфер[27], что превышает критическое значение (217.8 атмосфер). Была когда-то реальная лаба[28] на кафедре Теоретических основ теплотехники МЭИ, где работают авторы. Сейчас она существует в виде цифрового двойника – не кафедра, конечно[29], а лабораторная работа. Брали несколько толстостенных запаянных стеклянных ампул, заполненных разным количеством воды, помещали их в печь, нагревали, а затем охлаждали, наблюдая при этом, как ведут себя линии раздела фаз в разных ампулах[30]. Объём ампул был одинаков, но разным был начальный объём воды. Теперь все это можно видеть, увы, только на экране компьютера. С другой стороны, на экране компьютера можно видеть, как меняются параметры воды – в числах и на диаграммах – см.

по Реомюру, а замерзает при нуле и по Цельсию, и по Реомюру Были комнатные термометры с такими двумя шкалами.

[27] Нагревают, конечно, не до определенного давления, а до определенной температуры. Но на паровозах обычно стояли манометры, а не термометры. Да и использовать здесь нужно не атмосферы, а мегапаскали. Но, читаем книгу дальше!

[28] Просим простить читателя за такое жаргонное слово. Так студенты называют лабораторные работы, исправляя тем самым этот лингвистический нонсенс. Словосочетание «лабораторная работа» — это масло масляное, если принять во внимание, что работа по-английски labor.

[29] А почему «конечно»? Существуют и цифровые кафедры. Кафедры как таковой нет, но занятия на ней, тем не менее, ведутся! Остается только изобрести цифрового студента, и все заработает без участия живых людей.

[30] Подобные опыты, но не с водой, а с углекислым газом проводил ирландский физико-химик Томас Эндрюс (19.12.1813 — 26.11.1885). Мы к ним вернемся в главе 12.

Дивертисмент 3 в конце главы. Конечно, самое лучшее решение – это одновременная работа и с реальным объектом, и с его математической моделью, реализованной на компьютере. О такой модели «скороварки-автоклава» и идет речь в данной главе книги.

У котла-аккумулятора нашего бестопочного паровоза[31] есть водомерное стекло, по которому можно наблюдать, как будет меняться уровень воды при движении этого транспортного средства.

Единицы измерения в компьютерных расчетах хороши и тем, что они побочно выполняют функции комментариев, позволяющих легко понять, что хранит та или иная переменная. Тем не менее, раскроим их: *m* – это масса[32], *V* (заглавная) – объем, *v* (прописная) – удельный массовый объем, *D* (заглавная) – расход пара, *d* (прописная) – плотность. Индексы у переменных такие: *w* – вода, *s* – водяной пар, *0* – в котел залили кипяток, *1* – котел закрыли и подняли в нем давление и температуру и *2* – бестопочный паровоз отработал своё и направляется в котельную для новой заправки водой и теплом. Цикл замыкается!

Помогают сделать расчет такие функции уже упомянутого авторского пакета WaterSteamPro: `wspTSP` – температура (`T`) насыщения (`S`) воды и водяного пара в зависимости от давления (`P`), `wspDSWT` – плотность (`D`) на линии насыщения (`S`) воды (`W`) в зависимости от температуры (`T`), `wspDSST` – плотность (`D`) на линии насыщения (`S`) пара (`S`) в зависимости от температуры (`T`). Встроенная в SMath функция `solve` позволяет создавать обратные функции пользователя. Так на основе функции `wspDPT` генерируется функция, возвращающая температуру воды и водяного пара в зависимости от плотности и давления, а на основе функции `wspVPH` – функция, возвращающая давление воды и водяного пара в зависимости от плотности и удельной энтальпии. «На пакет WaterSteamPro надейся, а сам не плошай»: нет нужной функции – создай её сам! Третий и четвертый аргументы функции `solve` – это концы диапазона, где ищутся корни уравнения методом половинного деления. Такое «жонглирование» функциями – встроенными и пользовательскими позволяет легко и быстро решать на компьютере довольно сложные задачи. И не только теплотехнические. Ещё одна уместная поговорка: "Дайте мне создать функцию пользователя – и я решу поставленную задачу!".

[31] Бензовоз возит бензин, молоковоз – молоко… А бестопочный паровоз возит на себе пар со степенью сухости близкой к нулю (новый смысл термина паровоз!).

[32] Одноименная переменная хранит единицу длины метр, но это разные переменные, отличающиеся и цветом: черный цвет – масса, синий – метр.

В котел-аккумулятор бестопочного паровоза объемом $V := 10\ m^3$ залили $m_{w0} := 5\ t$ кипятка при $p_0 := 1\ atm$ (точка 0), а потом стали его нагревать до давления $p_1 := 240\ atm$ (точка 1). Затем паровоз стал работать, выпуская из котла-аккумулятора пар в количестве $D := 100\ \frac{kg}{min}$ (точка 2). Построить p, d- и T, d-диаграммы цикла работы такого паровоза.

Советский бестопочный паровоз

$T_0 := \text{wspTSP}(p_0) = 99.974\ °C$

$d_{w0} := \text{wspDSWT}(T_0) = 958.4\ \frac{kg}{m^3}$

$d_{s0} := \text{wspDSST}(T_0) = 0.5976\ \frac{kg}{m^3}$

$V_{w0} := \frac{m_{w0}}{d_{w0}} = 5.217\ m^3$ $\quad V_{s0} := V - V_{w0} = 4.783\ m^3$

$m_{s0} := V_{s0} \cdot d_{s0} = 2.858\ kg$ $\quad m_0 := m_{w0} + m_{s0} = 5002.858\ kg$

$d_0 := \frac{m_0}{V} = 500.3\ \frac{kg}{m^3}$ $\quad x_0 := \frac{m_{s0}}{m_0} = 0.0005713$

$T_1 := \text{solve}(\text{wspDPT}(p_1, T\ K) = d_0, T, 100\ °C, 500\ °C)\ K = 374.2\ °C$ Температура в котле после его "зарядки"

$h_1 := \text{wspHPT}(p_1, T_1) = 1852\ \frac{kJ}{kg}$ Удельная энтальпия в котле после его "зарядки"

$t_{end} := \frac{m_0}{D} = 50.03\ min$ $\quad t := \left[0, \frac{0.995 \cdot t_{end}}{100} .. 0.995 \cdot t_{end}\right]$ $\quad m := m_0 - D \cdot t$ $\quad d := \frac{m}{V}$

$k := [1..\text{length}(d)]$ $\quad p_k := \text{solve}\left(\frac{1}{\text{wspVPH}(p\ atm, h_1)} = d_k, p, 0, 250\right) atm$

Рис. 3.3. Расчет бестопочного паровоза

Мы не показываем операторы, формирующие две переменные с запятой и пробелами в имени *p, d diagram* и *T, d diagram*, по которым строятся соответствующие диаграммы (рис. 3.4 и 3.5). Читатель может скачать соответствующий SMath-файл с сайта http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath и не только посмотреть на эти операторы, но и изменить исходные данные и увидеть новый ответ.

На диаграммах рисунков 3.4 и 3.5 показаны: изохора 0-1, адиабата 1-2 (котел-аккумулятор бестопочного паровоза покрыт толстым слоем теплоизоляции) и почти изобара-изотерма 2-0, а также изолинии постоянной сухости пара[33]. У графиков имеется по паре осей – по горизонтали это плотность внизу и удельный объем вверху (нелинейная обратная шкала), а по вертикали – давление в атмосферах физических и в мегапаскалях[34]

[33] Они ведут себя довольно интересно. При снижении сухости пара (x) от единицы (красная кривая) до нуля (синяя кривая) линия постоянной сухости постепенно прижимается к синей линии, но затем сворачивает к критической точке водяного пара. При этом все линии, как и положено, исходят из критической точки.

[34] А ещё есть атмосферы технические (килограмм силы на квадратный сантиметр) и бары (100 000 Pa). Незаконные атмосферы удобнее законных мегапаскалей тем, что сразу можно оценить, во сколько раз

(рис. 3.4), а температура (рис. 3.5) в градусах Цельсиях и в единицах энергии, деленных на единицы количества вещества – `kJ/mol`. Настоящие физики, а не теплофизики измеряют температуру единицами энергии – электронвольтами, например, а не какими-то там выдуманными кельвинами [1].

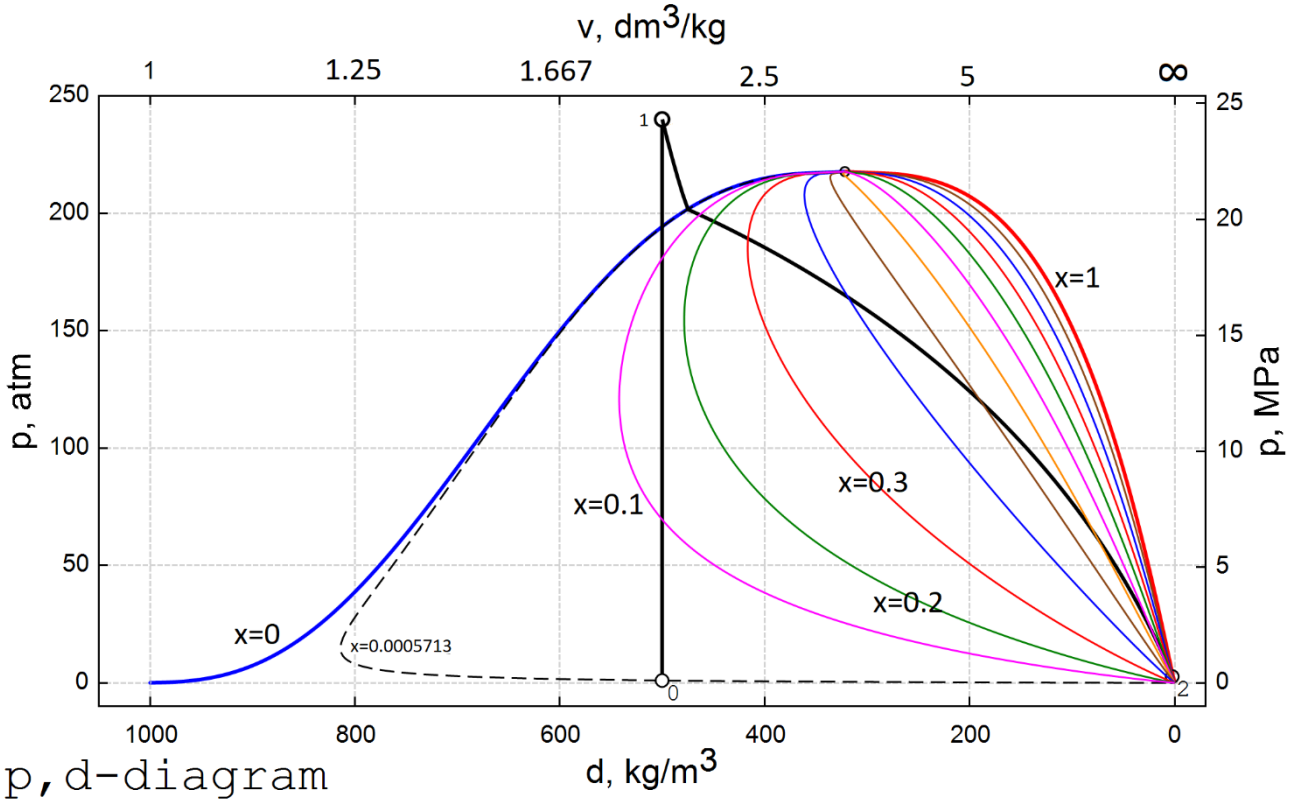


Рис. 3.4 p, d диаграмма цикла бестопочного паровоза

Адиабата 2-3 оказалась с неким изломом, который противоречит утверждению о том, что природа не терпит (острых) углов. Но здесь мы, по первых, имеем дело с фазовым переходом и, во-вторых и главных, не с природой, а с её частным цифровым двойником.

Отметим также, что T, d диаграмма визуально оказалась более «надутой», чем p, d диаграмма.

давление больше атмосферного. Компьютерные пакеты с механизмом единиц измерения дружественны человеку и тем, что они позволяют использовать «удобные» единицы, а не те, какие предписаны кем-то. Помните историю с атмосферным давлением в сводках погоды, где пытались внедрить законные, но малопонятные гектопаскали вместо привычных миллиметров ртутного столба!? Еще одна метрологическая нелепость в прогнозах погоды – скорость ветра даётся в метрах в секунду, а не в километрах в час. А ещё есть давление абсолютное и избыточное!

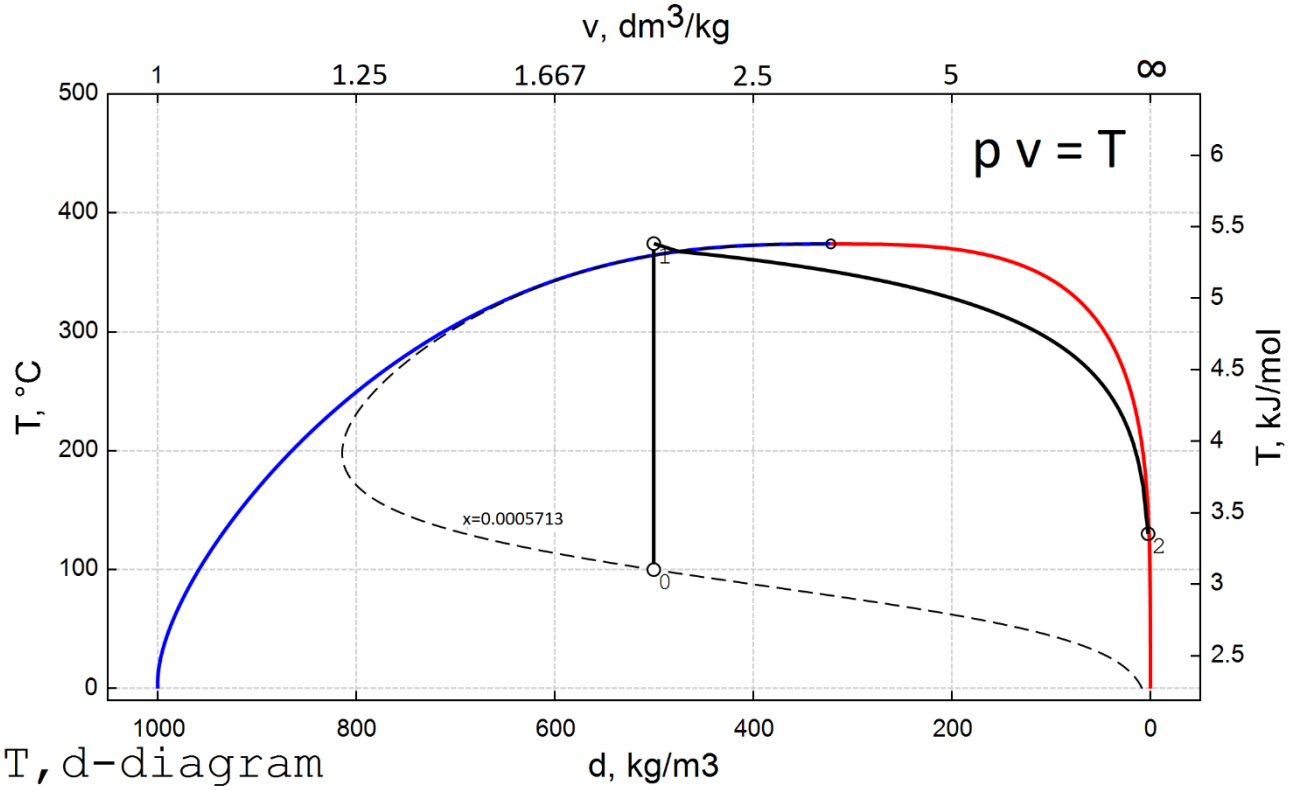


Рис. 3.5 T, d диаграмма цикла бестопочного паровоза

Кстати, безтопочный паровоз, да и простой обычный паровоз может в ряде случаев выполнять функции пожарного поезда – подъезжать на железнодорожной станции к очагу возгорания и тушить пожар паровоздушной смесью. Есть такой патентованный эффективный способ борьбы с огнем – см. [5].

3. Предисловии были упомянуты законы идеального газа. Так вот, в современных условиях, когда почти все более-менее сложные научно-технические расчеты выполняются сугубо на компьютерах, студенты перестали понимать, зачем столько много времени на занятиях по технической термодинамики уделяется идеальным газам и приемам работы с ними. Ведь есть программы, автоматически рассчитывающие свойства не только воды и водяного пара (см. выше), но и реальных газов и их смесей. КПД процесса изучения термодинамики идеального газа становится «паровозным» – очень низким из-за отсутствия мотивации к изучению всего этого. Многие курсы лекций по технической термодинамики превращаются в занятия по истории этой научной дисциплины с упоминанием Гей-Люсака, Бойля, Мариотта и других ученых, когда-то давно изучавших газы. Все это, конечно, очень интересно, но почти полностью оторвано от реальной практики термодинамических расчетов.

Конкретный пример. Котел нашего бестопочного паровоза можно заполнить не водой под давлением в состоянии насыщения, а сжатым воздухом[35]. На рисунке 3.6 показан расчет массы и температуры сухого воздуха (молярная масса M, показатель адиабаты k) по закону идеального газа Клайперона-Менделеева «пэ вэ равняется эр тэ» или просто «пэ вэ равняется тэ» [1]. Воздух адиабатно накачивают в баллон, объёмом 10 м^3, повышая его давление с одной до 40 атмосфер. Масса воздуха в баллоне увеличивается с 12.14 до 169.2 кг, а температура с 18 до 562.2 градусов по шкале Цельсия.

$p \cdot v = R_m \cdot T \qquad R_m := 8.314 \ \frac{J}{mol \ K}$

$T_0 := 18 \ °C \qquad p_0 := 1 \ atm$

$Воздух \qquad M := 29 \ \frac{g}{mol} \qquad k := 1.4 \qquad V := 10 \ m^3$

$v_0 := \frac{R_m \cdot T_0}{M \cdot p_0} = 0.8238 \ \frac{m^3}{kg} \qquad m_0 := \frac{V}{v_0} = 12.14 \ kg$

$p_1 := 40 \ atm$

$v_1 := v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 0.05909 \ \frac{m^3}{kg} \qquad m_1 := \frac{V}{v_1} = 169.2 \ kg$

$T_1 := \frac{M \cdot p_1 \cdot v_1}{R_m} = 562.2 \ °C$

Рис. 3.6 Расчет сжатия воздуха по законам идеального газа

Если этот расчет сделать с опорой не на законы идеального газа, а на пакет WaterSteamPro, то ответ будет несколько иным – см. рис. 3.7. В расчете принимается, что сухой воздух ($GS := "Air"$) адиабатно ($s_1 = s_0$) накачали в баллон ёмкостью 10 м^3 до абсолютного давления в 40 атмосфер. Используются функции пакета WaterSteamPro с буквой g – газы: `wspgVGSPT` – удельный объём в зависимости от давления и температуры, `wspgSGSPT` – удельная энтропия в зависимости от давления и температуры и `wspgTGSPS` – температура в зависимости от давления и удельной энтропии, а также.

[35] Были и такие экзотические воздуховозы, если так можно выразиться, с баллонами сжатого воздуха [8].

Масса газа в баллоне при этом увеличилась с 12.12 кг до 174.5 кг, а температура поднялась с 18 до 536.1 °C.

$$GS := \text{"Air"}$$

$$T_0 := 18\ °C \qquad p_0 := 1\ atm \qquad V := 10\ m^3$$

$$m_0 := \frac{V}{\text{wspgVGSPT}\left(GS, p_0, T_0\right)} = 12.12\ kg$$

$$s_0 := \text{wspgSGSPT}\left(GS, p_0, T_0\right) = 6.837\ \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$p_1 := 40\ atm \qquad s_1 := s_0$$

$$m_1 := \frac{V}{\text{wspgVGSPT}\left(GS, p_1, T_1\right)} = 174.5\ kg$$

$$T_1 := \text{wspgTGSPS}\left(GS, p_1, s_1\right) = 536.1\ °C$$

$$\frac{\text{wspgCPGST}\left(GS, T_0\right)}{\text{wspgCVGST}\left(GS, T_0\right)} = 1.4$$

$$\frac{\text{wspgCPGST}\left(GS, T_1\right)}{\text{wspgCVGST}\left(GS, T_1\right)} = 1.353$$

Рис. 3.7. Расчет сжатия воздуха с использования пакета WaterSteamPro

Разные результаты расчетов на рис. 3.6 и 3.7 объяснить просто – показатель адиабаты для воздуха и других газов (см. расчет на рис. 3.6) – это никакая не константа, а величина, зависящая, в частности, от температуры. Что и показано в конце рис. 3.7: величина k – это отношение изобарной удельной теплоёмкости (c_p) к изохорной удельной теплоёмкости (c_v). См. также график на рис. 3.6 в главе 3. Показатель адиабаты для воздуха близок к значению 1.4 только при низких («комнатных») температурах. Отход от

детального изучения законов идеального газа можно оправдать и тем, что эти законы дают при расчетах неверный результат.

В расчетах на рисунках 3.6 и 3.7 было принято, что воздух был сухой – то есть опять же идеальный в каком-то смысле. Но реальный воздух всегда содержит влагу. Расчет параметров влажного воздуха описан в главе 5 и в [9].

Формулы, истекающие из закона идеального газа, – см. например, формулу со степенью $1/k$ для расчета значения v_1 на рис. 3.6, многим непонятны и в том смысле, что непонятно, зачем с ними работать, когда есть простые и понятные функции по свойствам флюидов, встроенные в компьютерные программы – см. главы 1 и 2. Заставлять школьников и студентов делать расчеты по законам идеального газа – это все равно, что заставлять их считать столбиком на листе бумаги. Да, студенты должны знать, что такое сложение и умножение (что такое идеальный газ и «с чем его едят, пардон, вдыхают»), но проводить такие арифметические действия они должны на электронных устройствах, а не на листочке бумаги, на арифмометре или логарифмической линейке[36]! Ещё одна математическая аналогия. В термодинамике широко используются производные и интегралы для описания, например, свойств теплоносителей и рабочих тел, а также процессов в тепловых машинах. Современные студенты, которые должны знать, что это такое, уже не могут аналитически дифференцировать и интегрировать даже простейшие функции. Зачем, спрашивают они это делать, если под рукой имеются компьютерные средства не только символьной, но и численной математики. Это же касается и решения уравнений – см. рис. 3.14 ниже.

Конечно, нельзя игнорировать формулы и понятия, накопленные за несколько веков развития термодинамики (и математики). Но нельзя также игнорировать новые реалии, связанные с внедрением информационных технологий. Здесь, как и везде нужно искать золотую середину – взвешенный подход без крайностей. Пока же в учебных материалах по технической термодинамике наблюдается эта самая крайность – превалирование в учебниках законов идеального газа и эмпирики при описании реальных газов – неких кубических уравнений, например. Авторы этой книги поставил перед собой цель – написать новое взвешенное учебное пособие. Под взвешенностью авторы понимают учёт

[36] Второй авторо книги помнит времена, когда в вузах активно сопротивлялись переходу от логарифмической линейки к электронным калькуляторам. Дескать, счёт на калькуляторе совсем отупляет студентов. То ли дело – логарифмическая линейка, где числа чувствуются даже тактильно. В наше время тоже довольно часто преподаватели говорят, что функции по свойствам флюидов, описанные в этой книге, тоже отупляют студентов-теплотехников. То ли дело – таблицы и бумажные диаграммы с этими свойствами, где всё чувствуется даже тактильно, когда водят пальцем по бумаге!

и классической термодинамики, и того нового, что приносят в нашу жизнь новые информационные технологии.

В сноске 9 было отмечен разный подход к рисованию графиков человеком без компьютера и человеком с компьютером. Давайте порассуждаем дальше в этом направлении! Многие люди искренне удивляются, зачем их в школе учили арифметическим действиям с простыми (обыкновенными) дробями, когда почти у каждого школьника и студента имеется электронный калькулятор, если не в виде отдельного карманного устройства, то в виде приложения в смартфоне. Та вот, многие опытные педагоги и методисты вполне обосновано полагают, что если ребенка в самом начале его математического образования не научить работать с простыми дробями, а сразу начать с десятичных (калькуляторных) дробей, то изучение математики пойдет вкривь и вкось. Если вообще пойдет!

Примерно такое же можно сказать и о термодинамике. Если не изучать законы идеального газа (рис. 3.6), а сразу перейти к компьютерным инструментам обращения с рабочими телами и теплоносителями (рис. 3.7), то… см. выше. Эти рассуждения можно продолжить. Если студент не поработает с бумажными таблицами и диаграммами состояний рабочих тел и теплоносителей (см. рис. 8.1 в главе 8), а сразу станет использовать пакет WaterSteamPro, то… см. выше.

Кстати, простые дроби самым неожиданным образом возникают в термодинамике идеальных газов. На рисунке 3.8 показано, как задаются параметры идеального одно- и двухатомного газа с опорой на универсальную газовую постоянную, коэффициенты при которой не десятичные, а именно простые дроби: 5/2, 3/2 и 7/2.

Изобарная теплоемкость одноатомных газов

$$c_p := \frac{5}{2} R_m = 20.79 \frac{J}{mol\ K}$$

Изохорная теплоемкость одноатомных газов

$$c_v := \frac{3}{2} R_m = 12.47 \frac{J}{mol\ K}$$

Показатель адиабаты $\gamma := \frac{c_p}{c_v} = \frac{5}{3}$ $\frac{5}{3} = 1.667$

$c_p - c_v = 8.314 \frac{J}{mol\ K}$ $c_p - c_v = 1\ R_m$

Изобарная теплоемкость двухатомных газов

$$c_p := \frac{7}{2} R_m = 29.1 \frac{J}{mol\ K}$$

Изохорная теплоемкость двухатомных газов

$$c_v := \frac{5}{2} R_m = 20.79 \frac{J}{mol\ K}$$

Показатель адиабаты $\gamma := \frac{c_p}{c_v} = \frac{7}{5}$ $\frac{7}{5} = 1.4$

$c_p - c_v = 8.314 \frac{J}{mol\ K}$ $c_p - c_v = 1\ R_m$

Рис. 3.8. Параметры идеального газа

Но, вернемся к нашему бестопочному паровозу.

Сейчас все увлечены водородной энергетикой, в частности *водородовозами* – транспортными средствами, работающими на водороде[37] и имеющие в выхлопе только воду и ни грамма углекислого газа, окислов серы и прочего вредоносного для нашей атмосферы. Так вот, бестопочный паровоз тоже в движении оставляет за собой только чистую воду. Читатель возразит в том плане, что удаленная-то котельная выбрасывает в атмосферу всякую гадость! Но и производители водорода нередко выбрасывает в

[37] Когда-то давно в советское время был проект установки на самолете Ту-155 баков с сжиженным водородом вместо керосина. Но! Авиационные катастрофы чаще всего происходят при взлете и посадке. Самолет на керосине может при аварии сжечь себя и своих пассажиров. Самолет же на водороде может прихватить при этом весь аэропорт! Да, отапливать дом сжиженным газом намного удобнее, чем дровами или углем, но намного опаснее.

атмосферу черти что! Радиоактивные отходы, например, если водород производить на АЭС вместе с электричеством. А такие планы имеются.

Кстати, локомотив пневматической железной дороги – это уже совсем идеальное транспортное средство в плане экологии. Он выбрасывает в атмосферу лишь то, что получил из атмосферы. Если, конечно, забыть о приводе компрессора на удаленной компрессорной станции.

Дивертисмент 1. Ещё немного о надувательстве в термодинамике

На рисунке 3.9 слева показан логотип родного для авторов Института тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ) МЭИ: T, s диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре (тепловая энергетика), вокруг которой вращаются электроны (атомная энергетика). Эта диаграмма, как и диаграмма на рис. 3.1, оказалась несколько «надутой». Ненадутая, почти правильная диаграмма показана справа на рис. 3.9. Дело в том, что повышение температуры воды в питательном насосе, составляет 1-2 кельвина, а не сотню кельвинов, как отображено на левой диаграмме. Её «надувают» для того, чтобы показать левый вертикальный участок идеальной работы питательного насоса. Затем идет участок нагрева воды до кипения в экономайзере (кривая прижимается к кривой воды на линии насыщения – синяя кривая на рис. 3.1, 3.2, 3.4 и 3.5), далее идет верхний горизонтальный участок (вода превращается в пар), а потом кривая взмывает вверх (перегрев водяного пара). Правый вертикальный участок диаграммы отображает идеальное расширение пара в турбине. Замыкает цикл нижняя горизонтальная прямая – процесс конденсации пара в конденсаторе турбины.

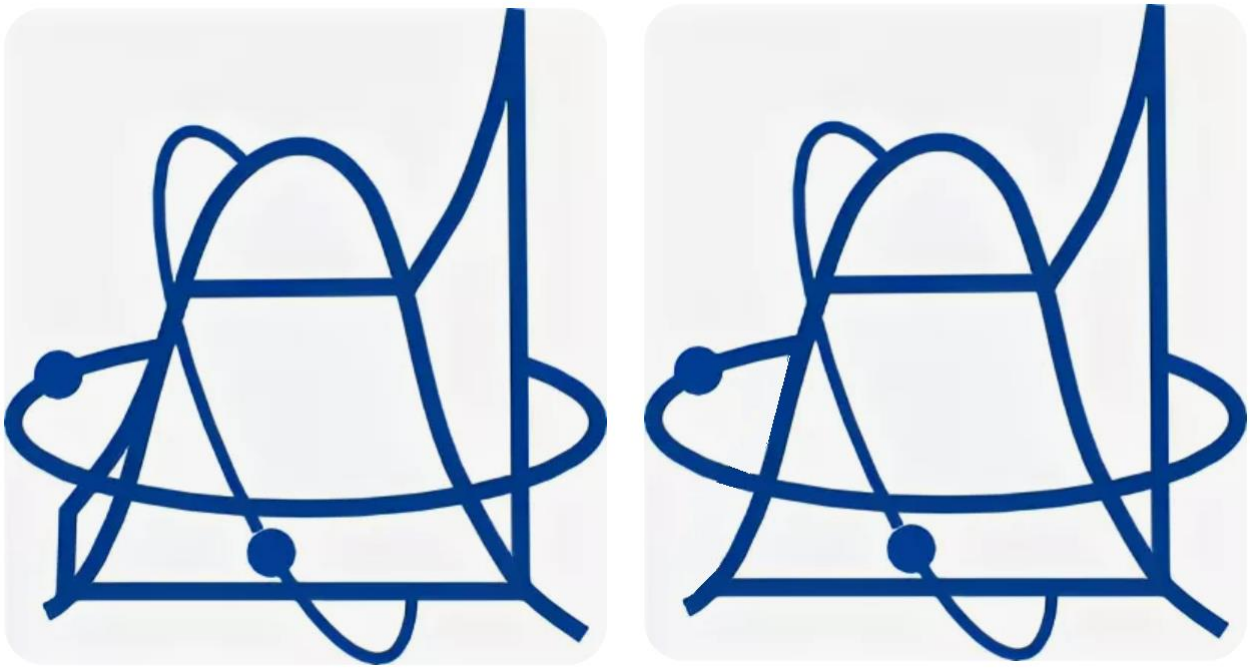


Рис. 3.9 Логотип института тепловой и атомной энергетики МЭИ

На рисунке 3.10 показана реальная, а не стилизованная диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре, но для разнообразия не T, s-, а T, h-диаграмма. На ней участок работы питательного насоса увеличен и помещен внутри основной диаграммы. При этом возникает иллюзия, что вода в питательном насосе становиться двухфазной. Но это не так. Понять такую особенность помогут трехмерные диаграммы, одна из которых показана на рис. 3.11 (см. также рис. 1.9 в главе 1 с такими пересекающимися линиями).

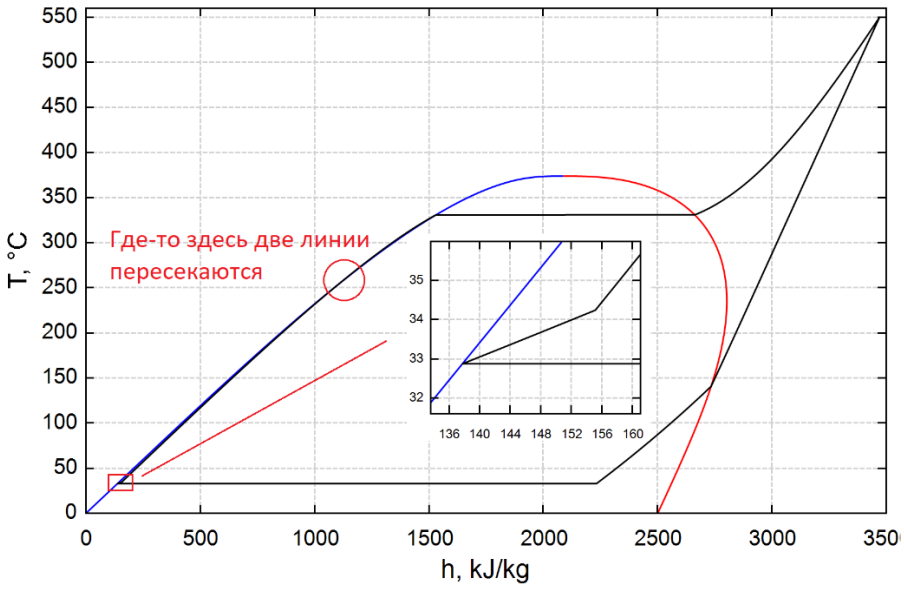


Рис. 3.10 T, h диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре

На авторском сайте http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd посетителю предоставляется возможность строить такие трехмерные диаграммы, изменяя параметры цикла Ренкина и наименование осей.

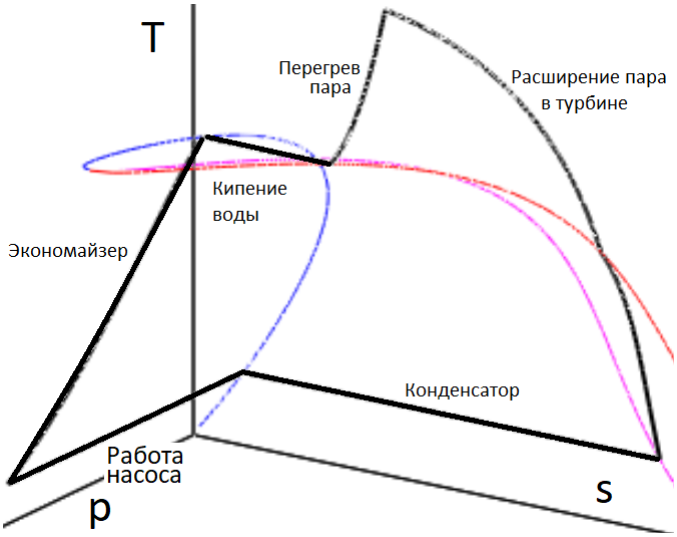


Рис. 3.11 T, s, p диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре

То, что является почти точкой на рис. П8, на самом деле является кривой работы насоса.

Рисунок 3.11, кстати, вскрыл еще одну недоработку диаграммы-логотипа, показанного на рис. 3.9: вертикальная прямая, отмечающая расширения пара в турбине, должна пересекать линию насыщенного водяного пара. Это отмечено на рис. 3.11 – черная кривая пересекает красную кривую и упирается в линию постоянной сухости пара (розовая кривая). А этого нет на рис. 3.9 – кривая расширения пара в турбине упирается в линию насыщенного водяного пара.

Дивертисмент 2. Реальная и цифровая паровая машина

На одной из своих лекций по инженерным расчётам, посвящённой работе паровой машины и её анимации, второй автор этой книги показал студентам реальную паровую машину (рис. 3.12) с топкой на твердом топливе ("сухой спирт" – уротропин, спрессованный с небольшим количеством парафина). И только после этого дал описание прикидочного расчета на компьютере КПД такого теплового двигателя (рис. 3.13). В аудитории все это – и видео, и расчёт показывалось на большом экране. Большим экраном

в аудитории сейчас никого не удивишь (см. конец главы 3 с описанием телевизоров в аудитории), а вот паровая машина на лекции – это редкость.

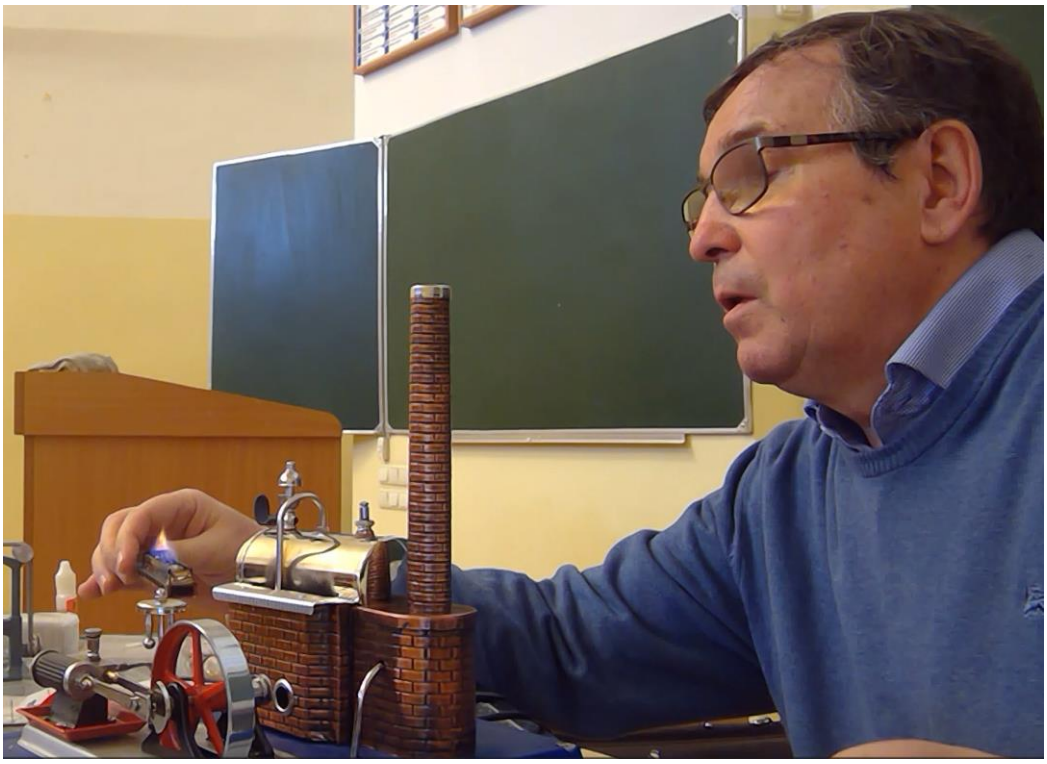


Рис. 3.12 Кадр записи лекции с демонстрацией паровой машины

Данное видео с комментариями лектора можно скачать с сайта книги http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath.

В расчёте на рис. 3.13 по двум давлениям – одна атмосфера физическая и 12 килограмм силы на квадратный сантиметр определяются две температуры – нижняя (100 градусов Цельсия) и верхняя (187 градусов Цельсия). Эти два значения были вставлены в знаменитую формулу для расчета термического КПД цикла Карно – единица минус отношение температуры холодильника[38] (нижняя изотерма) к температуре к температуре нагревателя (верхняя изотерма). Ответ оказался не так уж плох – почти 37 процента. Но запрос в интернете дал другой ответ – у паровоза КПД находится на уровне 5-12%. Поэтому расчет был повторен, но уже с использованием функций пакета WaterSteamPro. Получен правдоподобный ответ – 15 с половиной процента. Если же перейти к реальному процессу расширения влажного пара в цилиндре паровой машины паровоза (см. рис. 9.23 и 9.24 в главе 9), то КПД снизится до ожидаемых 5-12%.

[38] Вот такая температура холодильника: 100 градусов Цельсия.

$p_{atm} := 1\ atm$ $p := 12\ \frac{kgf}{cm^2}$ $T_{воды} := 20\ °C$ Исходные данные

$T_{atm} := wspTSP(p_{atm}) = 100\ °C$ $T := wspTSP(p) = 187.1\ °C$ Две температуры цикла Карно

$\eta_t := 1 - \frac{T_{воды}}{T} = 36.3\ \%$ КПД цикла Карно

1. Вода в баке паровоза

$T_1 := T_{воды}$ $s_1 := wspSPT(p_{atm}, T_1) = 0.2965\ \frac{kJ}{kg\ K}$ $h_1 := wspHPT(p_{atm}, T_1) = 84.01\ \frac{kJ}{kg}$

2. У воды подняли давление

$s_2 := s_1$ $p_2 := p$ $h_2 := wspHPS(p_2, s_2) = 85.09\ \frac{kJ}{kg}$ $T_2 := wspTPH(p_2, h_2) = 20.02\ °C$

3. Воду нагрели до кипения

$T_3 := T$ $s_3 := wspSSWT(T_3) = 2.208\ \frac{kJ}{kg\ K}$ $h_3 := wspHSWT(T_3) = 794.6\ \frac{kJ}{kg}$

4. Воду превратили в пар

$T_4 := T$ $p_4 := p$ $s_4 := wspSSST(T_4) = 6.529\ \frac{kJ}{kg\ K}$ $h_4 := wspHSST(T_4) = 2783\ \frac{kJ}{kg}$

5. Пар толкает поршень паровой машины

$s_5 := s_4$ $p_5 := p_{atm}$ $h_5 := wspHPS(p_5, s_5) = 2367\ \frac{kJ}{kg}$ $x_5 := wspXPH(p_5, h_5) = 86.34\ \%$

Считаем КПД паровоза

$q_1 := h_4 - h_1 = 2699\ \frac{kJ}{kg}$ $l_{пм} := h_4 - h_5 = 415.7\ \frac{kJ}{kg}$ $l_н := h_2 - h_1 = 1.077\ \frac{kJ}{kg}$

$\eta_t := \frac{l_{пм} - l_н}{q_1} = 15.36\ \%$

Рис. 3.13 Вычислительная оценка КПД паровоза

Дивертисмент 3. Опыты с запаянной ампулой

Ранее мы упомянули о лабораторной работе (см. сноску 16) с запаянной стеклянной ампулой (капсулой), частично заполненной водой, которую нагревали в печи, наблюдая при этом за уровнем воды в ней.

А давайте рассчитаем, как будет меняться уровень воды в таком… бестопочном паровозе – см. рис. 3.14-3.16.

На рисунке 3.14 показано, как из решения уравнения "масса воды и пара в ампуле m равна сумме массы воды m_W и массы пара m_W" получается итоговая формула с дробью, по которой

рассчитывается объём сухого насыщенного пара в зависимости от объёма ампулы V, плотности воды на линии насыщения d_W, степени сухости пара x и плотности насыщенного водяного пара d_S. Для решения уравнения, занесённого в переменную f, используется функция `solve` из программы Maple, подгруженной к SMath в качестве приложения (плагина). Уравнение, конечно, можно решить и вручную, но почему же не воспользоваться компьютером! Бем более, что при ручных манипуляциях (раскрытие скобок, перенос фрагментов уравнения из одной части в другую и др.) возможны ошибки. Из-за этого – из-за решения даже простейших задач на компьютере мы отучаемся делать расчёты в уме и на бумаге, что не очень хорошо. Компромисс – решить задачу в уме[39], а потом проверить решение на компьютере.

$$x = \frac{m_S}{m} \qquad m = \frac{m_S}{x} \qquad m = \frac{V_S \cdot d_S}{x}$$

$$m = m_S + m_W \qquad m = V_S \cdot d_S + \left(V - V_S\right) \cdot d_W$$

$$f := \frac{V_S \cdot d_S}{x} = V_S \cdot d_S + \left(V - V_S\right) \cdot d_W$$

$$\mathrm{maple}\left(\mathrm{solve}\left(f,\ V_S\right)\right) = \frac{V \cdot d_W \cdot x}{d_S \cdot \left(1 - x\right) + d_W \cdot x}$$

Рис. 3.14 Решение уравнения масс воды и пара в ампуле

Сделано допущение, что в ампуле мы имеем двухфазную среду (область 4 – см. главу 1), где давление и температура взаимосвязанные параметры.

На рисунке 3.15 показано, как создается функция пользователя с именем V_W и двумя аргументами T (температура) и d (интегральная плотность воды и водяного пара). Правильнее нужно сказать так: у функции V_W есть аргумент T (температура) и параметр d. Аргумент мы будем менять в диапазоне значений от 20°C до 250°C с шагом в один градус Цельсия (в один кельвин), задавая разные дискретные значения параметра d.

[39] Врачи рекомендуют пожилым людям так тренировать свою память: набирать номер телефона по памяти, затем сверять его в базе данных и только потом соединяться с абонентом.

$$V_W(T, d) := \left| \begin{array}{l} V := 20\ \text{mL} \\ d_S := \text{wspDSST}(T) \\ d_W := \text{wspDSWT}(T) \\ x := \text{wspXSTD}(T, d) \\ V_S := \dfrac{V \cdot d_W \cdot x}{d_S \cdot (1 - x) + d_W \cdot x} \\ V_W := V - V_S \end{array} \right.$$

$$T := [20\ °\text{C}, 21\ °\text{C} .. 250\ °\text{C}]$$

Рис. 3.15 Создание функции пользователя для расчета водяного пара в ампуле

Казалось бы, что если в ампулу или в котел бестопочного паровоза залить воды, а затем все это изохорно нагревать, то уровень воды (объём воды) должен падать (уменьшаться) за счет перехода жидкой фазы в газообразную. Но это не так, вернее, не совсем так. Из графиков рисунка 3.16 видно, что объём воды увеличивается (левый график – тела и жидкости при нагревании расширяются), а затем может падать (правый график – жидкости при нагревании испаряются). Суммирование этих процессов (расширение и испарение) и дает горбатую кривую, показанную справа на рис. 3.16, и это зависит от параметра d – от начальной плотности воды и водяного пара в состоянии насыщения[40]. На рисунке 3.16 заданная плотность была равной 400 и 70 килограмм на метр кубический.

[40] Здесь можно было написать "от начальной влажности пара", но влажный пар – это то, что выходит из носика чайника при его кипении: некий туман, состоящий из пара на линии насыщения с каплями влаги (гетерогенная система). Но у нас в и в ампуле, и в котле бестопочного паровоза имеются две гетерогенные системы – вода на линии насыщения на дне и насыщенный водяной пар над водой. Кстати, если посмотреть вблизи на носик кипящего чайника, то можно заметить, что сначала выходит прозрачный пар, который затем мутнеет – превращается во влажный пар, вернее, в смесь влажного пара с воздухом, который охлаждает пар. При этом пар проходит нестабильную стадию переохлаждения – см. рис. 1.12. в главе один.

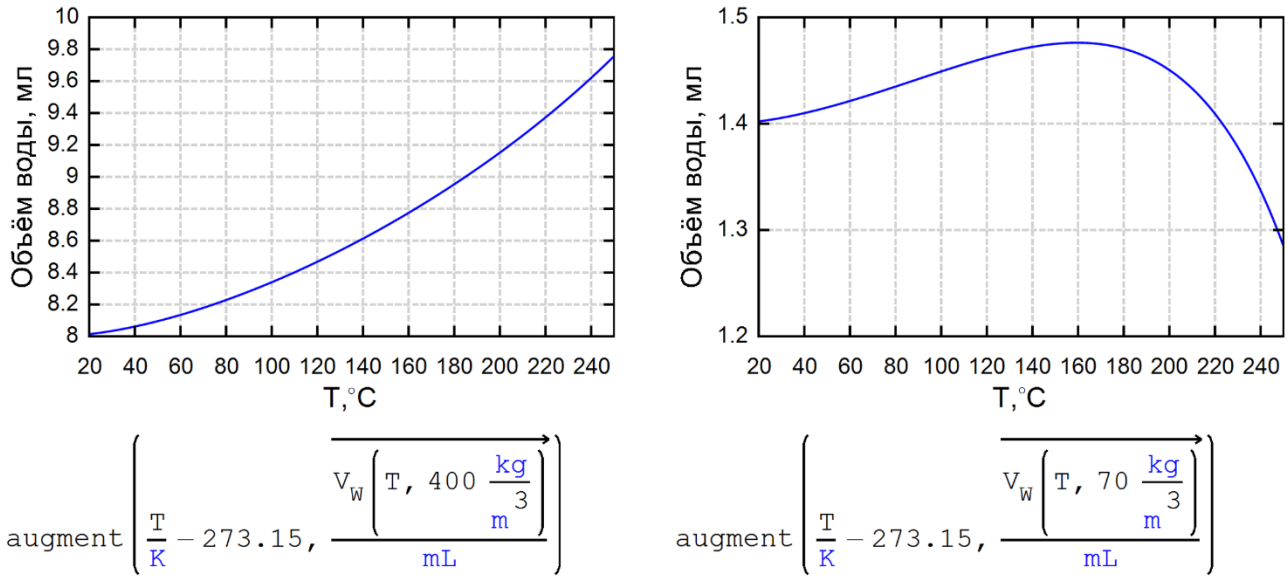


Рис. 3.16 Графики изменения объёма воды в ампуле

Задание читателям

1. Постройте диаграммы, показанные на рис. 3.4 и 3.5 в других координатах: энтальпия, энтропия, показатель адиабаты, сжимаемость и проч.
2. Создайте расчёт идеального паротурбинного цикла на перегретом водяном паре такой, чтобы процесс расширения пара в турбине заканчивался на линии насыщения так, как это показано на рис. 3.9. Постройте реальную такую необычную диаграмму.
3. Создайте анимацию движения поршня паровой машины, показанной на рис. 3.12, дополнив ее движущейся точкой на диаграмме. Ось абсцисс такой диаграммы может фиксировать положение поршня. Такая диаграмма называется индикаторной диаграммой.
4. Создайте в среде SMath диаграммы работы паровой машины по расчету, показанному на рис. 3.13.
5. Постройте поверхность, отображающую функцию V_W с аргументами T и d.

Литература и ссылки:

1. Очков В.Ф., Орлов К.А. Когда p v = T // Законодательная и прикладная метрология. № 2. 2022. С. 38-44 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf)
2. https://yandex.ru/video/preview/14031788358088779 12
3. https://vk.com/wall357070788_6186?ysclid=lx44i7e6fo763141952
4. Очков В.Ф. SMath и CoolProp: Теплофизические свойства жидкостей и газов – доверяй, но проверяй // Энергия: экономика, техника, экология, №7, 2023 (http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-7-2023-CoolProp-WSP.pdf)
5. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет // Под общ. ред. В.Ф. Очкова. 2-е издание, исправленное и дополненное. Издательство БХВ-Петербург. 2015. – 336 с. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html)
6. Очков В.Ф. Физика и метафизика магнитной обработки воды // Энергия: экономика, техника, экология. № 1, 2022, С. 36-43 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Energia-MO-1-2021.pdf).

7. Очков В.Ф., Очкова Н. А. Лев Толстой и математика /– Москва: МПГУ, 2023 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Tolstoy-Math-3.pdf)
8. https://ru.wikipedia.org/wiki//Пневматическая_железная_дорога
9. Установки для трансформации тепла и охлаждения: расчеты на SMath : учебное пособие для вузов / Н. Л. Бударин, А. В. Мартынов, В. Ф. Очков [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. (https://e.lanbook.com/book/414824)

Глава 4 Двигатель внутреннего сгорания
Или
Рисуем новые диаграммы

Самый известный и самый распространённый двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это четырехтактный бензиновый мотор, работающий по циклу Отто, включающий в себя в идеальном варианте две изохоры и две адиабаты. Воздушно-бензиновая смесь, приготовляемая в карбюраторе[41], адиабатно (без подвода или отвода тепла) сжимается в цилиндре, свеча пускает искру, смесь моментально воспламеняется так, что цилиндр практически не успевает сдвинуться с места (изохора)… В интернете есть много схем и анимаций [1], раскрывающих принцип работы четырехтактных двигателей внутреннего сгорания. И не только по циклу Отто, но и по циклу Дизеля (изобара вместо одной изохоры) или Тринклера (комбинация циклов Отто и Дизеля, когда одна изохора «переламывается пополам» на изобару и изохору). В этой главе мы покажем диаграммы, какие читатель не найдет в интернете. Благо, инструменты пакета SMath позволяют строить их быстро и качественно. Это описано в данном учебном пособии.

В интернете несложно найти предельно упрощенную формулу, по которой рассчитывается термический КПД цикла Отто в зависимости от показателя адиабаты k рабочего тела (упрощенно считается, что это воздух с $k=1.4$) и степени сжатия ε – см. рис. 4.1. Степень сжатия – это не отношение давлений в конце и начале первого такта работы двигателя. Это отношение объемов внутреннего пространства цилиндра – максимального к минимальному. Термин степень сжатия не вполне удачен – мы сжимаем газ в первую очередь для того, чтобы увеличить его давление, а не для того, чтобы уменьшить его объем.

[41] Термин «дизель» в отношении ДСВ у нас привился, чего не скажешь о термине «отто». Говорили – карбюраторный цикл ДВС. В настоящее время карбюраторы – устройства для приготовления смеси воздуха и бензина можно встретить только на старых автомобилях. Современные моторы оборудованы форсунками для впрыска топлива (бензина или дизельного топлива – солярки), управляемыми бортовым компьютером.

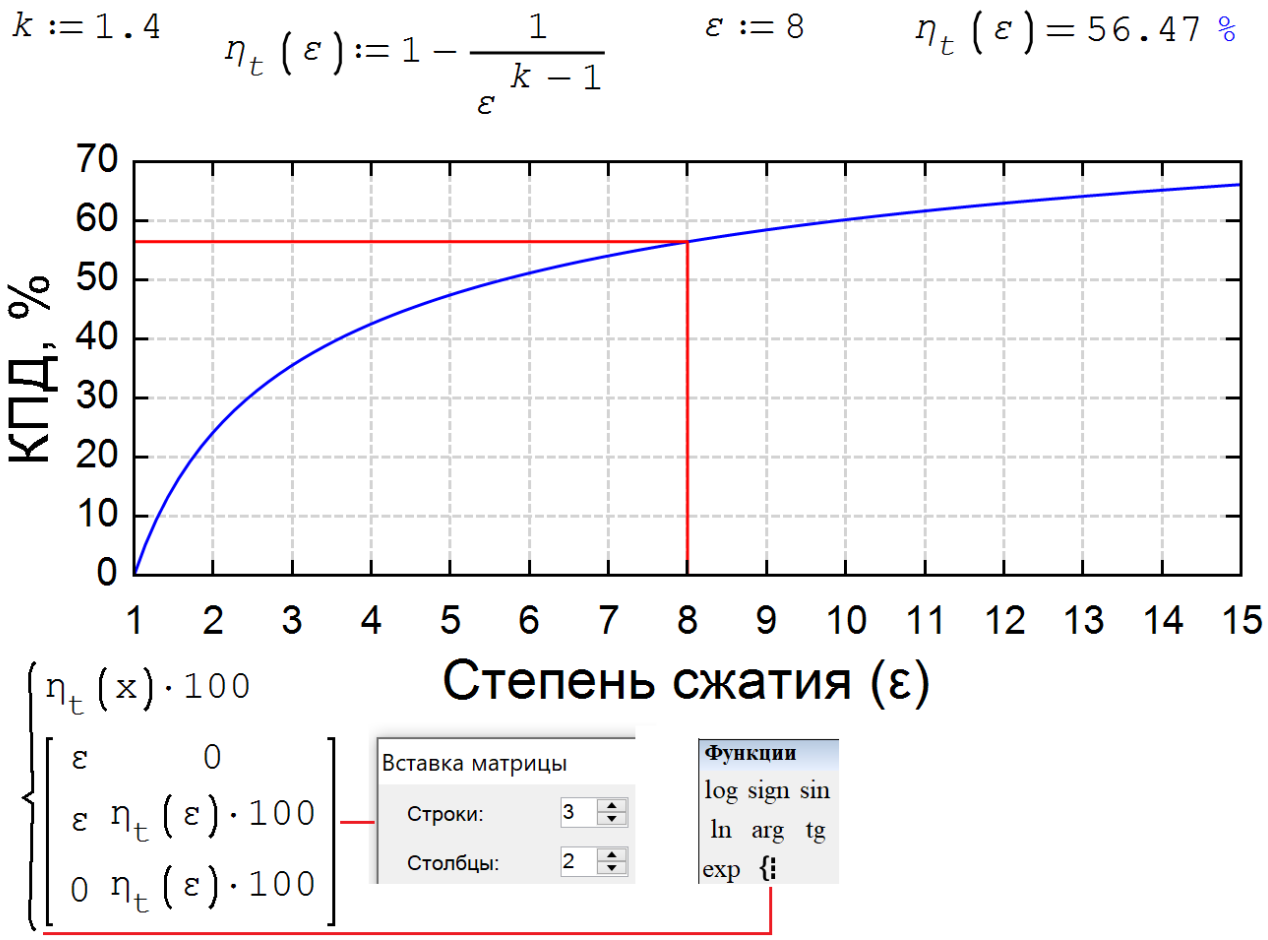
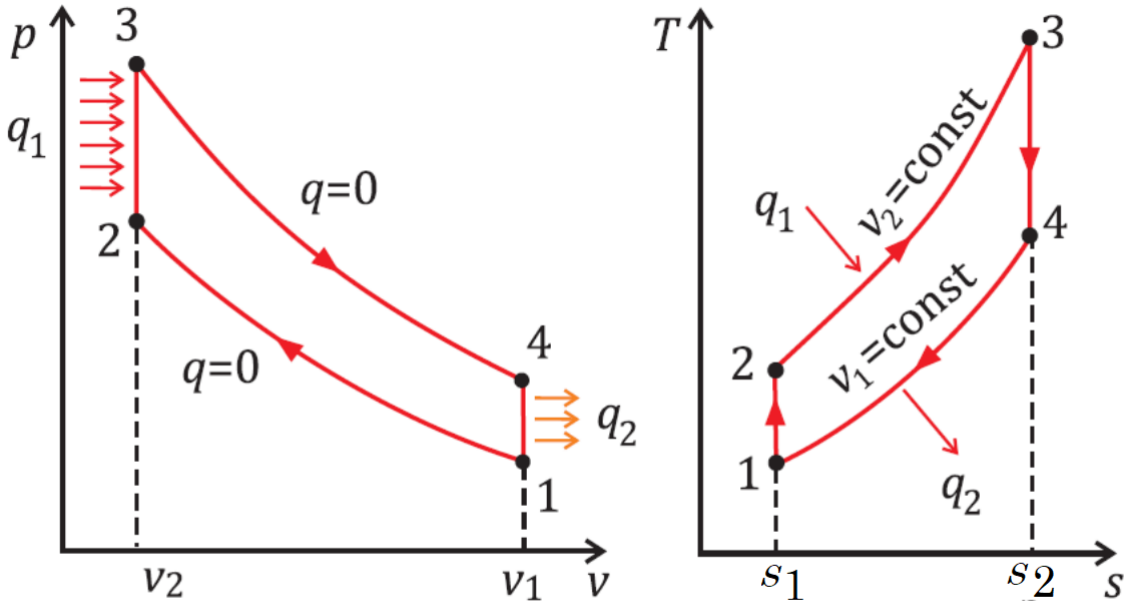


Рис. 4.1 Термический КПД идеального цикла Отто

Диаграммы, показанные на рис. 4.2, кочуют из одного учебника по технической термодинамики в другой. Они не требуют каких-то дополнительных комментариев. На них четко просматриваются две изохоры v_1 и v_2 (левый график), а также две изоэнтропы s_1 и s_2 (правый график). При сгорании воздушно-бензиновой смеси выделяется q_1 теплоты (килоджоуль на килограмм рабочего тела). С выхлопом в атмосферу уходит q_2 теплоты. Разница этих величин определяет удельную работу двигателя внутреннего сгорания $l_ц$. Если эту работу разделить на q_1, то мы получим термический КПД ДВС.



Цикл ДВС с подводом теплоты при v = const (цикл Отто) в p, v- (*а*) и T, s- (*б*) диаграммах

Рис. 4.2 p, v- и T, s-диаграммы идеального цикла Отто

А давайте построим новые, ранее невиданные и поучительные диаграммы цикла Отто, предварительно рассчитав его КПД не по упрощенной формуле (рис. 4.1), а используя функции пакета CoolProp Wrapper. На сайте книги этот расчёт повторен с опорой на пакет WaterSteamPro.

На рисунке 4.3 показан такой расчет, где выделены две области – область пользовательских единиц измерения и область расчёта. Как создаются такие спецединицы, делающие расчет более компактным, рассказано в разделе 2 Предисловия. Верхний индекс 3 у метра в единице плотности взят из таблицы, показанной на рис. П6 Предисловия.

После ввода спецсимволов задаются исходные данные для расчета – температура и давление атмосферы, степень сжатия и температура в третьей точке цикла Отто (наивысшая температура). Рабочее тело – сухой атмосферный воздух.

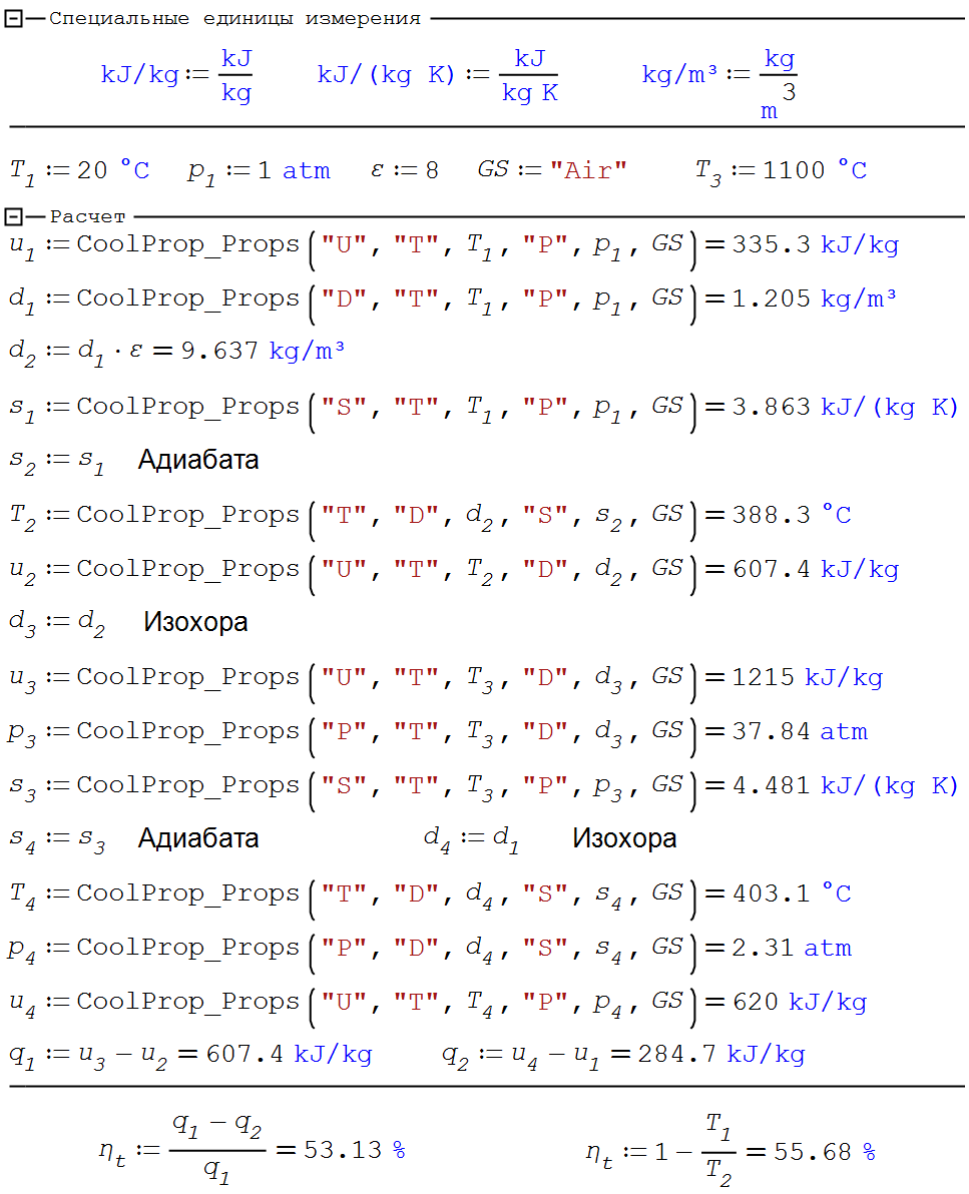


Рис. 4.3 Расчет реального цикла Отто

Расчёт не требует особых комментариев. Отметим лишь то, что в поршневой машине ведется учёт внутренней удельной энергии u, в то время как в турбине – удельной энтальпии h. (см. главы 8, 9, 11 и 12).

Значения КПД выводятся по умолчанию в абсолютных долях, которые пользователь SMath волен заменить на проценты так, как это делается с единицами измерения.

В конце рисунка 4.3 показан расчёт термического КПД цикла Отто через соотношение q_1 и q_2, а также по ещё одной формуле $(1 - T_1/T_2)$ из Примера 14.1 учебника [2]. Эти два ответа можно сравнить с тем, какой показан на рис. 4.1. Три решения – три ответа: 53.13, 55.68 (рис. 4.3) и 56.47 (рис. 4.1) процентов. Какой из них верный, вернее, более верный? Скорее всего первый, так как учитывались свойства реального, а не идеального газа

(сухого воздуха). Но просто правильный, а не более правильный ответ не знает никто – газ стал реальным (более реальным), но сам цикл остался идеальным.

А теперь про обещанные новые диаграммы.

На рисунках 4.4 и 4.5 показаны операторы, формирующие векторы `T` (температура), `k` (показатель адиабаты), `v` (удельный объём) и `z` (коэффициент сжимаемости) с текстовыми индексами `12`, `23`, `34` и `41`, хранящие дискретные значения перечисленных величин на отдельных участках диаграммы цикла Отто. Правая стрелочка над операторами отмечает процедуру векторизации – действие проводится над каждым элементом вектора, а не над вектором в целом.

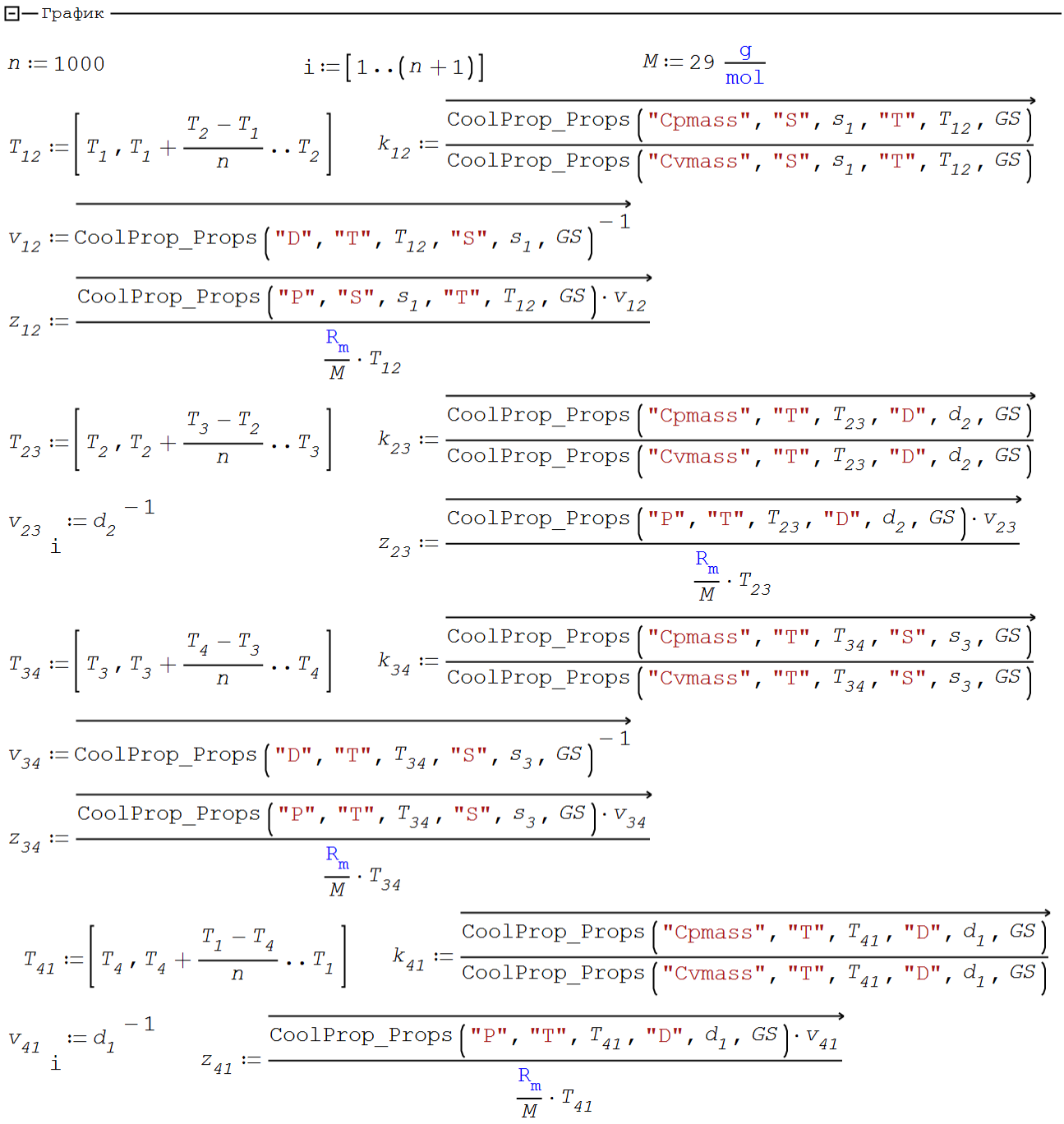


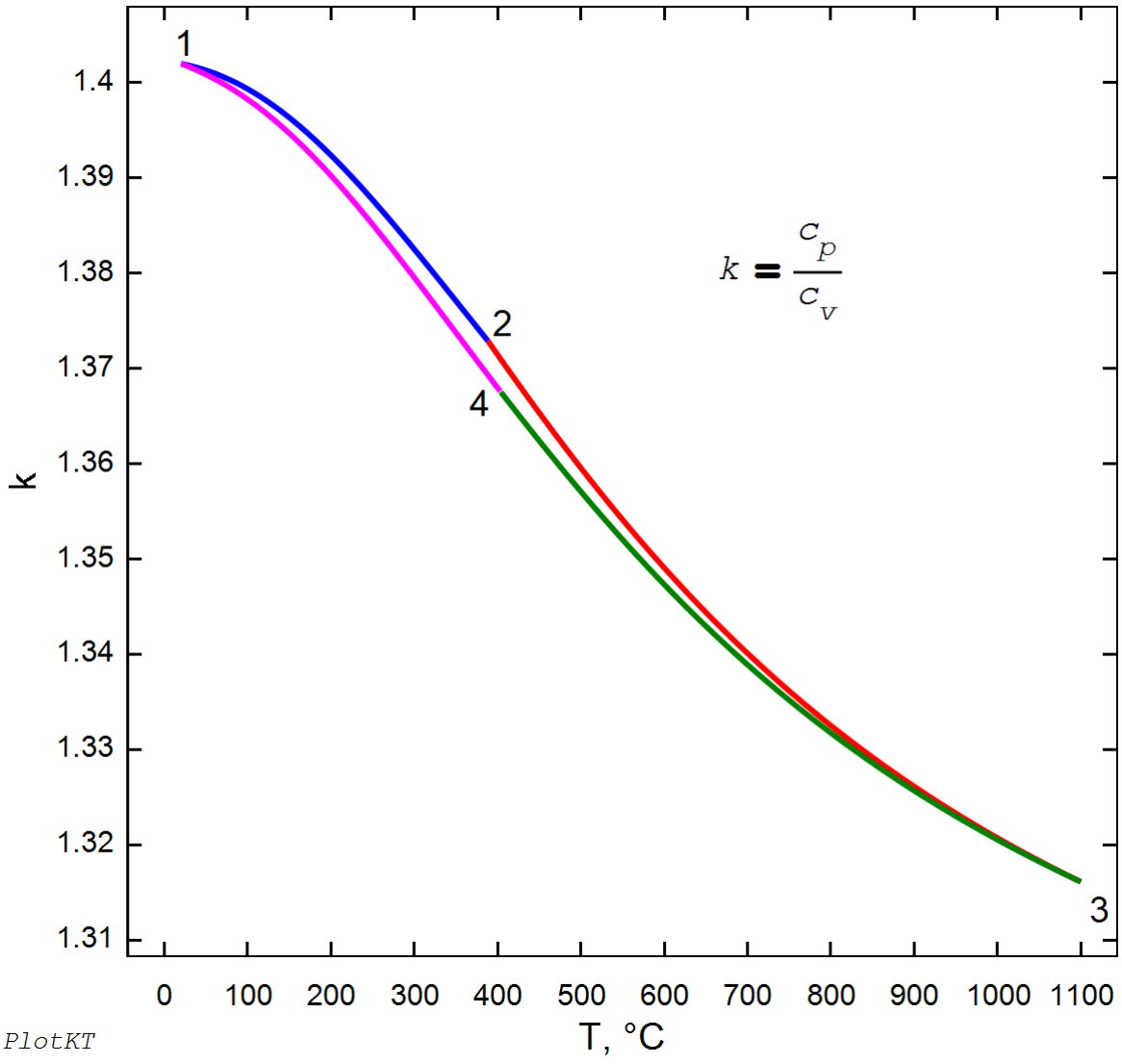
Рис. 4.4 Заполнение векторов для построения диаграмм цикла Отто

На рисунке 4.5 показаны операторы, формирующие аргументы трех графиков – трех диаграмм. Они отображены на рис. 4.6-4.8.

$$PlotKT := \begin{pmatrix} \text{augment}\left(\frac{T_{12}}{K} - 273.15,\ k_{12}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{T_{23}}{K} - 273.15,\ k_{23}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{T_{34}}{K} - 273.15,\ k_{34}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{T_{41}}{K} - 273.15,\ k_{41}\right) \end{pmatrix} \qquad PlotZT := \begin{pmatrix} \text{augment}\left(\frac{T_{12}}{K} - 273.15,\ z_{12}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{T_{23}}{K} - 273.15,\ z_{23}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{T_{34}}{K} - 273.15,\ z_{34}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{T_{41}}{K} - 273.15,\ z_{41}\right) \end{pmatrix}$$

$$PlotZV := \begin{pmatrix} \text{augment}\left(v_{12},\ z_{12}\right) \\ \text{augment}\left(v_{23},\ z_{23}\right) \\ \text{augment}\left(v_{34},\ z_{34}\right) \\ \text{augment}\left(v_{41},\ z_{41}\right) \end{pmatrix}$$

Рис. 4.5 Заполнение аргументов диаграмм цикла Отто



PlotKT

Рис. 4.6 k, T-диаграмма цикла Отто

Из рисунка 4.6 видно, что показатель адиабаты воздуха это никакая не константа, а переменная величина, зависящая в основном от температуры и в меньшей степени от давления.

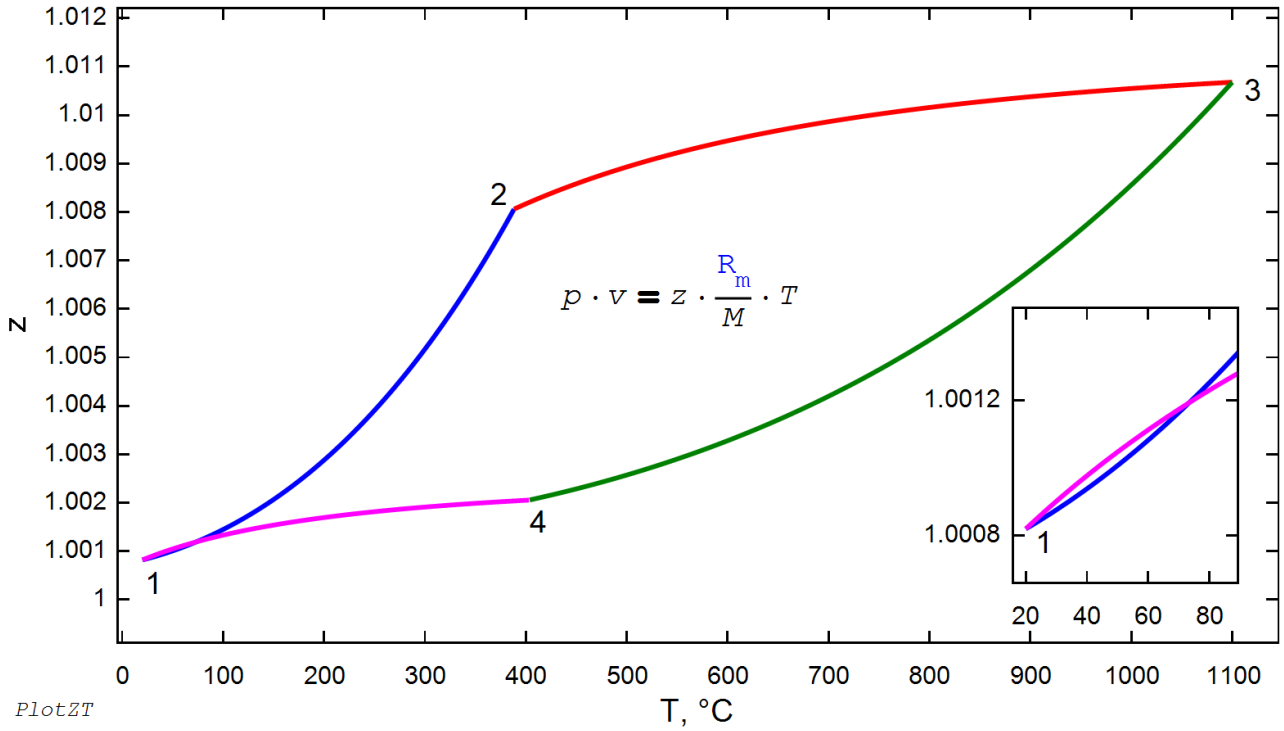


Рис. 4.7 z, T-диаграмма цикла Отто

Диаграмма на рисунке 4.7 примечательна тем, что кривые участков 1-2 и 4-1 образуют петлю. Читатель, знаешь ли ты другую подобную диаграмму термодинамического цикла с петлёй? На большой петле цикла процесс идет по часовой стрелке (тепловая машина), а на малой петле (она увеличена и показана в правом нижнем углу рисунка 4.7) – против часовой стрелки (холодильная машина). Смотрите размышления по этому поводу в главе 3 (сноска 12). Но эта петля, конечно, связана со свойством рабочего тела. Рассуждать здесь о прямом и обратном циклах некорректно.

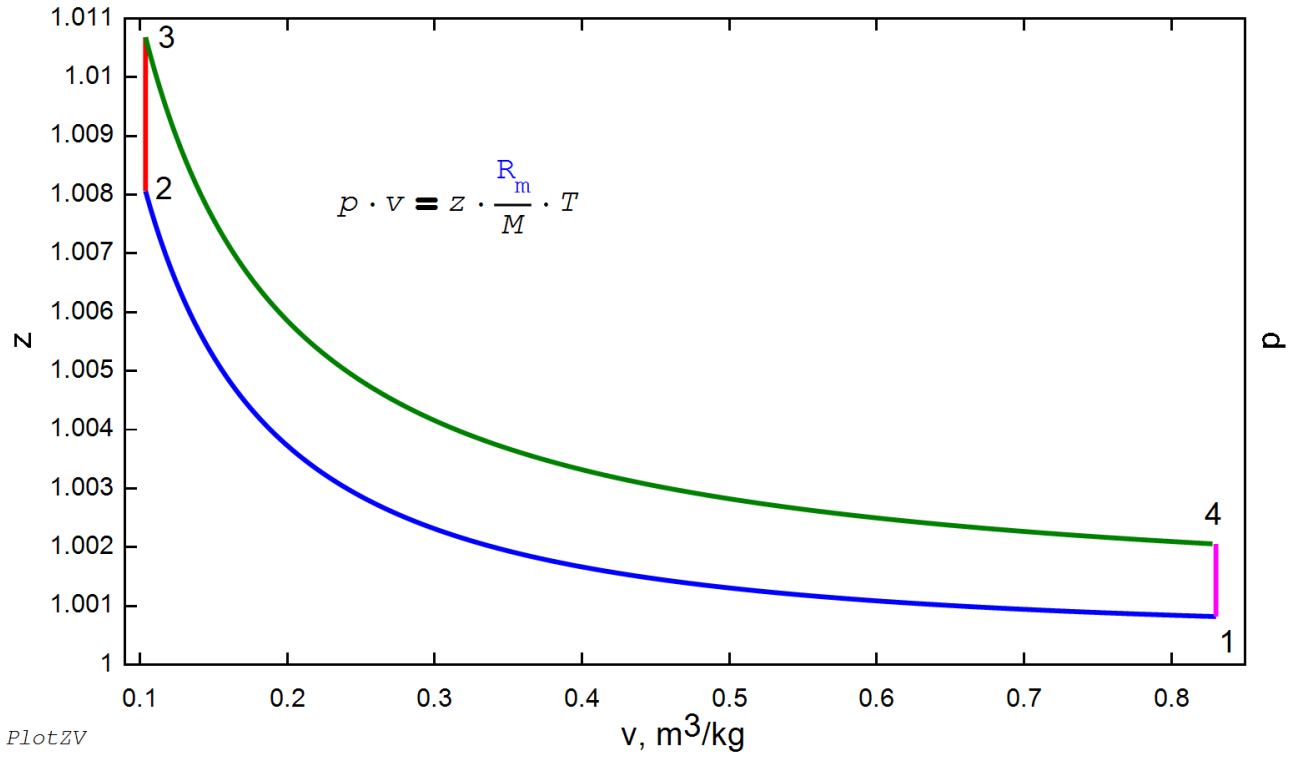


Рис. 4.8 z, v-диаграмма цикла Отто

Если б мы имели дело с идеальным газом, то на показанных диаграммах мы бы имели горизонтальные прямые с ординатой 1.4 (диаграмма на рис. 4.6: k=1.4) и с ординатой 1 (рис. 4.7 и 4.8: z=1). В случае реального газа мы видим то, что видим. Диаграмма на рис. 4.8 примечательна тем, что она по форме совпадает с диаграммой в левой части рис. 4.2 – с p, v-диаграммой, какой традиционной иллюстрируют цикл Отто.

А вот как может выглядеть реальная p, v-диаграмма с реальным рабочим телом – рис. 4.9. Это так называемая индикаторная диаграмма ДВС, получаемая при испытаниях двигателя с измерением хода поршня и давления в цилиндре.

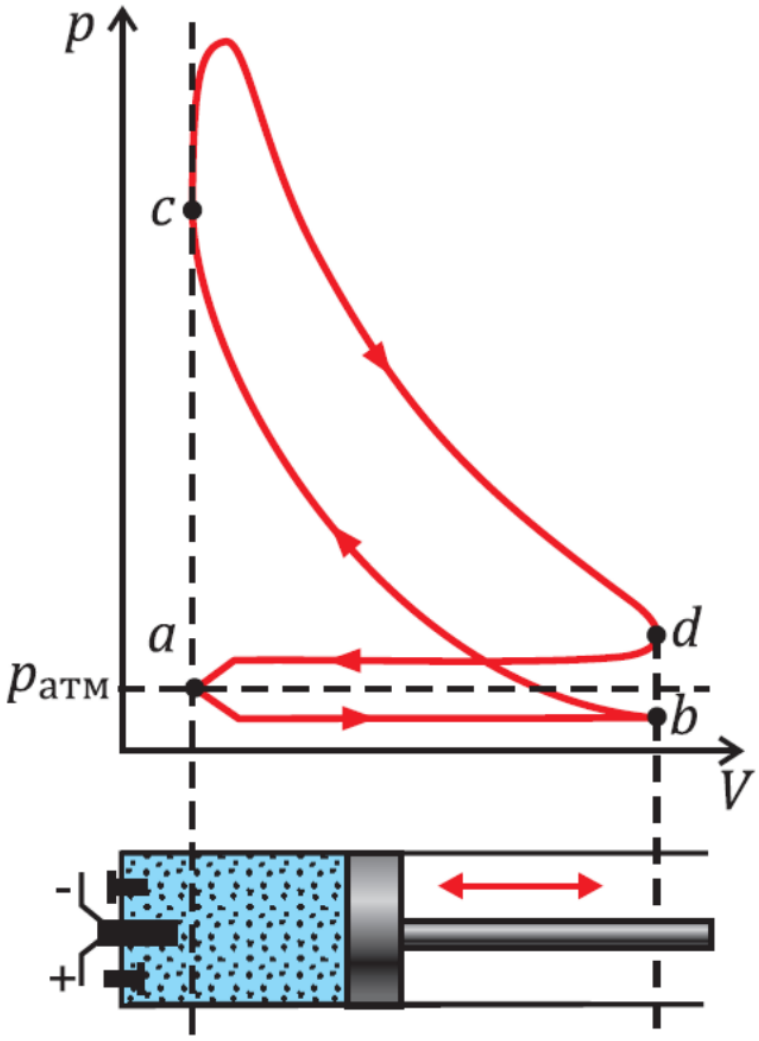


Рис. 4.9 Индикаторная диаграмма цикла Отто

При первом такте в процессе всасывания a-b при давлении, которое меньше атмосферного, воздух или смесь воздуха с топливом через впускной клапан заполняют объем цилиндра. После этого впускной клапан закрывается и начинается 2-й такт — процесс сжатия (b-c), во время которого давление и температура газа в цилиндре растут. Затем следует сгорание топлива и расширение образовавшихся продуктов сгорания (3-й такт), после завершения которого в положении поршня d открывается выпускной клапан, давление в цилиндре падает практически до атмосферного и часть продуктов сгорания выбрасывается в атмосферу (4-й такт), где они охлаждаются до температуры окружающей среды.

Индикаторная диаграмма (рис.4.9) иллюстрирует принцип, что природа не терпит острых углов. Только у точек a и b можно заметить некоторую угловатость.

Можно оценить влияние состава рабочего тела на его термодинамические свойства.

На рисунке 4.10 показаны попытки подсчета плотности воздуха и дымовых газов после ввода в среду SMath массового процентного содержания (доли) отдельных газов – азота, кислорода, аргона, углекислоты и паров воды. Давление атмосферное, температура нулевая (по Цельсию). Самое сложное (трудоёмкое) в этом расчёте – это формирование строковых (текстовых, а не числовых) переменных *Air* и *ПС*, хранящих информацию о смеси газов. Используются две встроенные в SMath функции – `concat` («склеивание» отдельных строк: А+Б=АБ) и `num2str` (конвертирование числа в строку; второй аргумент – это указание на то, сколько знаков числа будет преобразовано в строку). Подсчет плотности продуктов сгорания с использованием функции `CoolProp_Props` дал ответ (1.327 кг/м^3), вызывающий сильные сомнения. Повтор расчета при опоре на функцию `wspgVGSPT` из авторского пакета WaterSteamPro дал приемлемый результат (1.209 кг/м^3) плотность дымовых газов не так сильно отличается от плотности воздуха (1.204 кг/м^3). И интернет дает примерно такие же результаты[42].

[42] Не доверяй тик-току – перепроверь на ютьюбе! Шутка.

$x_{N_2} := 78.084\ \%$ $x_{O_2} := 20.948\ \%$ $x_{Ar} := 0.934\ \%$ $x_{CO_2} := 0.0314\ \%$

$x_{N_2} + x_{O_2} + x_{Ar} + x_{CO_2} = 99.9974\ \%$

$y_{N_2} := 72.42\ \%$ $y_{O_2} := 3.61\ \%$ $y_{H_2O} := 11.22\ \%$ $y_{CO_2} := 12.74\ \%$

$y_{N_2} + y_{O_2} + y_{H_2O} + y_{CO_2} = 99.9900\ \%$

```
Air := concat("N2[", num2str(x_N2, "n5"), "]&O2[", num2str(x_O2, "n5"),
    "]&Ar[", num2str(x_Ar, "n5"), "]&CO2[", num2str(x_CO2, "n6"), "]")
Air = "N2[0.78084]&O2[0.20948]&Ar[0.00934]&CO2[0.000314]"
T := 20 °C      p := 1 atm
D_Air := CoolProp_Props("D", "T", T, "P", p, Air) = 1.204 kg/m^3
      CoolProp_Props("D", "T", T, "P", p, "Air") = 1.205 kg/m^3
ПС := concat("N2[", num2str(y_N2, "n5"), "]&O2[", num2str(y_O2, "n5"),
 "]&H2O[", num2str(y_H2O, "n5"), "]&CO2[", num2str(y_CO2, "n6"), "]")
ПС = "N2[0.7242]&O2[0.0361]&H2O[0.1122]&CO2[0.1274]"
D_ПС := CoolProp_Props("D", "T", T, "P", p, ПС) = 1.327 kg/m^3
```

```
Air := concat("N2:", num2str(x_N2, "n5"), ";O2:", num2str(x_O2, "n5"),
           ";Ar:", num2str(x_Ar, "n5"), ";CO2:", num2str(x_CO2, "n6"))
Air = "N2:0.78084;O2:0.20948;Ar:0.00934;CO2:0.000314"
D_Air := wspgVGSPT(Air, p, T)^-1 = 1.204 kg/m^3
      wspgVGSPT("Air", p, T)^-1 = 1.204 kg/m^3
ПС := concat("N2:", num2str(y_N2, "n5"), ";O2:", num2str(y_O2, "n5"),
         ";H2O:", num2str(y_H2O, "n5"), ";CO2:", num2str(y_CO2, "n6"))
ПС = "N2:0.7242;O2:0.0361;H2O:0.1122;CO2:0.1274"
D_ПС := wspgVGSPT(ПС, p, T)^-1 = 1.209 kg/m^3
```

Рис. 4.10 Оценка плотности воздуха и дымовых газов (CoolProp Wrapper vs WaterSteamPro)

Самое идеальное топливо для ДВС – это водород, который смешивают с кислородом. Самое идеальное и самое взрывоопасное особенно в пропорции гремучей смеси. На рисунках 4.11 и 4.12 отображены попытки расчета плотности смеси водорода и кислорода

при 20 градусах Цельсия и атмосферном давлении. Так вот, пакет WaterSteamPro решил эту задачу, проведя линию между точками чистого водорода (0.0838 кг/м^3) и чистого кислорода (1.33 кг/м^3) – см. рис. 4.11.

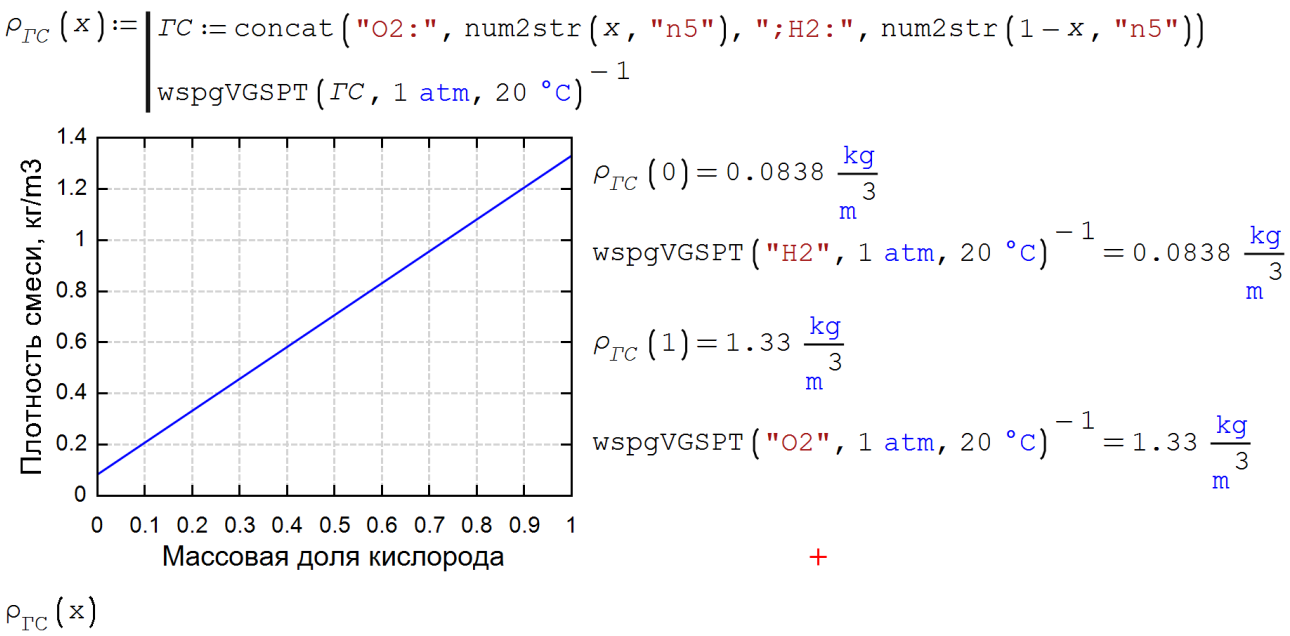


Рис. 4.11 Плотность смеси водорода с кислородом (WaterSteamPro)

Пакет же CoolProp Wrapper справился с этой задачей только частично (рис. 2.12) – проставил точку на графике для чистого водорода вблизи начала координат, а далее был провал – задача не решалась. И только в смеси, бога той кислородом (x > 0.72), выдается ответ.

Рис. 4.12 Плотность смеси водорода с кислородом (CoolProp Wrapper)

На сайте пакета CoolProp Wrapper «мелким шрифтом» прописано, что работа со смесями не дает гарантированного правильного ответа. В книге [3, глава 8] даны результаты тестирования смеси не газов, а жидкостей – воды и этанола. Результаты тоже неутешительные. Но мы же редко когда читаем документацию и инструкции, а сразу включаем прибор, пардон, сразу пытаемся строить график.

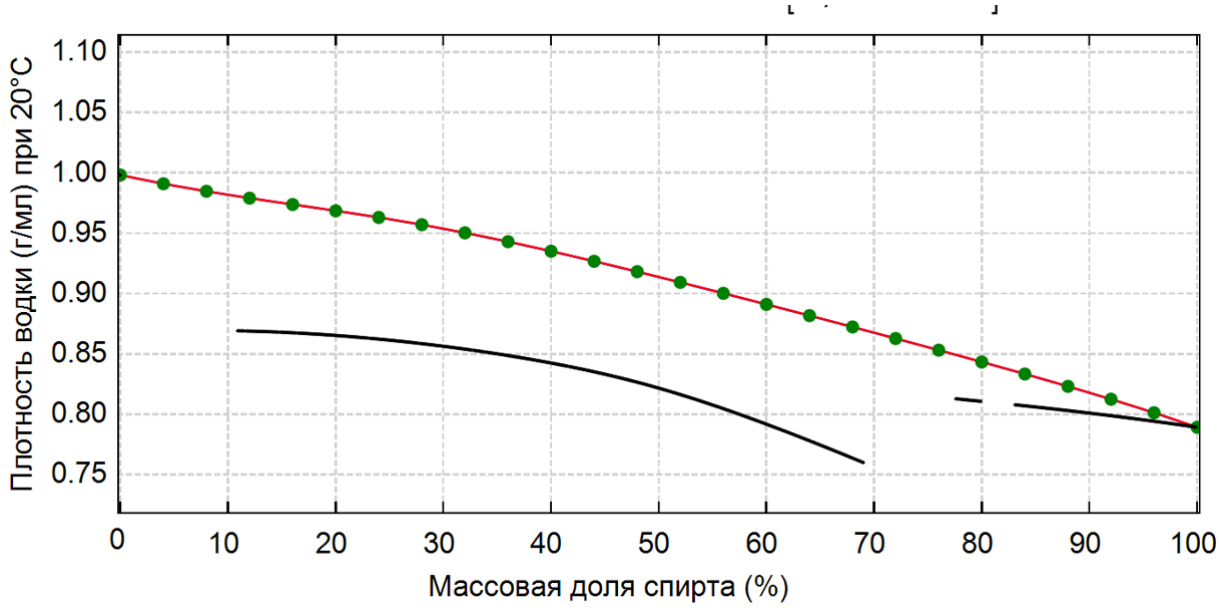


Рис. 4.13 Плотность смеси воды и этанола

Зеленые точки на рис. 4.13 – это табличные данные, найденные в интернете, красная гладкая кривая – это интерполяция кубическим сплайном, а чёрная кривая – это неудачные попытки расчёта плотности смеси воды и этанола с помощью функций пакета CoolProp Wrapper, показанных на рис. 4.10 и 4.11. Как проводилась сплайн-интерполяция, показано на рис. 4.21.

На рисунке 4.11 помещён график, показывающий влияние массовой доли одного из компонентов (кислорода) в двухкомпонентной смеси газов (кислород и водород). А на рисунке 4.14 показана так называемая *треугольная диаграмма*, иллюстрирующая свойства трехкомпонентной смеси. Треугольной она оказалась, потому что сумма массовых долей всех трех компонентов должна быть равна единице или ста процентов – сумма аргументов x и y функции пользователя с именем ρ_C (плотность смеси трех газов) не должна превышать единицы. Если это случиться ($x = 0.5$ $y = 0.6$), то функции ρ_C вернет не числовое значение, а сообщение об ошибке (см. функцию в красной рамке на рис. 4.11). На графике это будет отмечено пустыми местами – разрывами кривой. Такие разрывы, кстати, видны и на линиях одного уровня – одной плотности. Это объясняется тем, что в этих местах решение не было найдено – см. также рис. 4.12.

Вершины треугольника – это отдельный газ, стороны треугольника – это двукомпонентная смесь (см. рис. 4.11, а внутренность треугольника – это трехкомпонентная смесь.

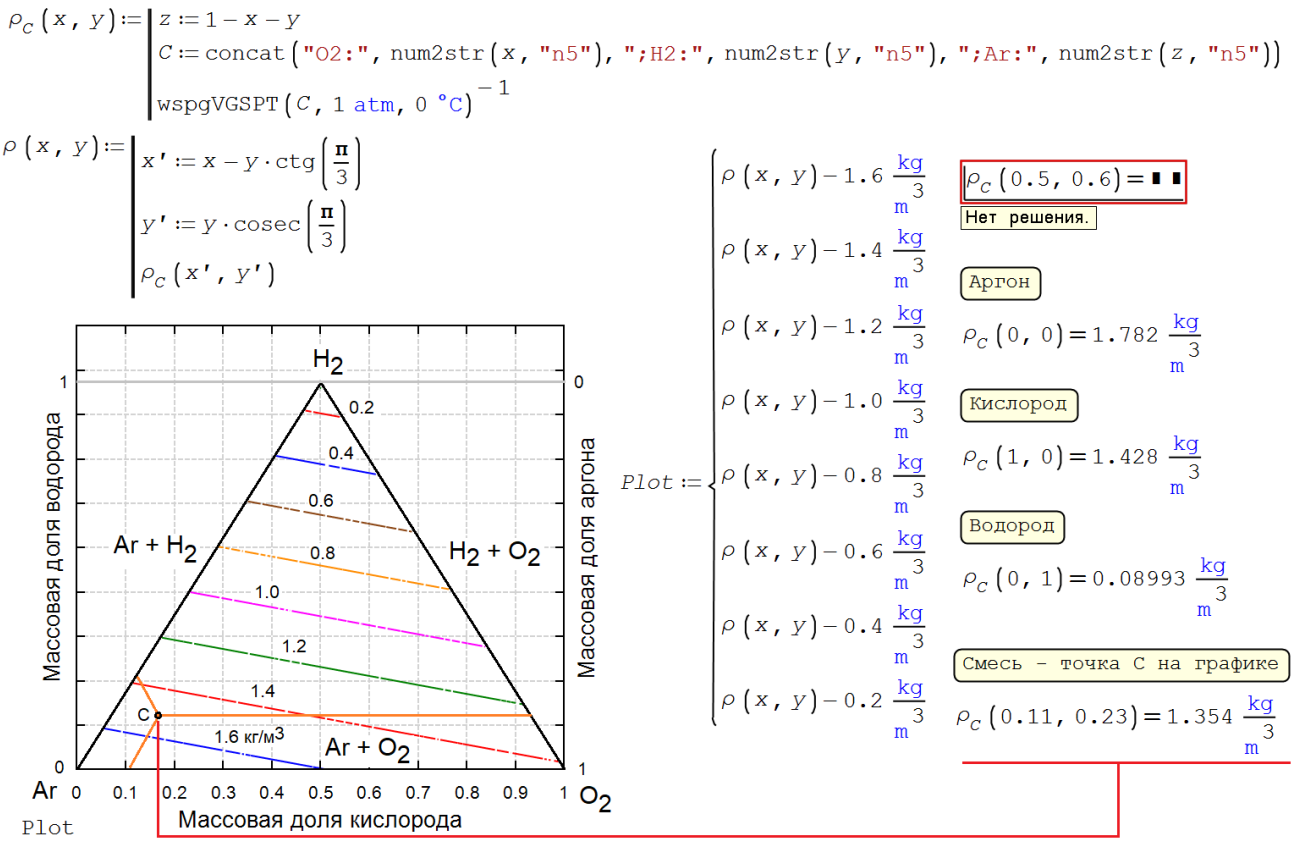


Рис. 4.14 Треугольная диаграмма влияния отдельных компонентов на свойство трехкомпонентной смеси газов

Рисунок 4.14 был отредактирован в среде графического редактора Paint – был прорисован треугольник, а также некоторые надписи и линии. А треугольным график стал с помощью функции пользователя с именем ρ, смещающей точки из прямоугольной системы координат в систему, где ось ординат наклонена вправо на 30 градусов ($\pi/3$). Без такого преобразования получился бы не равносторонний треугольник, а прямоугольный равнобедренный треугольник – см. рис. 4.15.

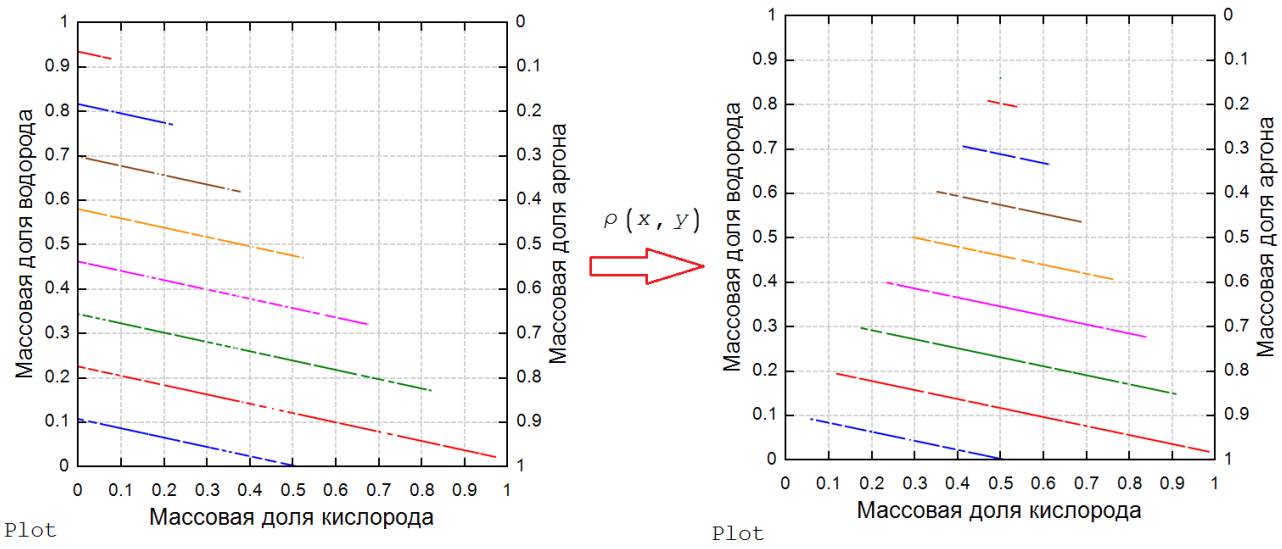


Рис. 4.15 Треугольная диаграмма до и после преобразования координат

При особом желании можно отобразить графически и четырехкомпонентную смесь газов – воздух или дымовые газы (рис. 4.10). Для этого потребуется уже не равносторонний треугольник, а тетраэдр, составленный из четырех равносторонних треугольников – см. рис. 4.16. Четыре вершины тетраэдра – это отдельный газ, шесть рёбер – это двукомпонентная смесь (см. рис. 4.11, четыре грани – это трехкомпонентная смесь (рис.4.12), а внутренность тетраэдра – это четырехкомпонентная смесь. Рисунок 4.16 – это фотография бумажной конструкции, склеенной из шести отдельных равнобедренных треугольников (см. пункт 4 задания читателям).

Рис. 4.16 Диаграмма-тетраэдр

Многокомпонентные, в частности, четырехкомпонентные смеси (рис. 4.10 и 4.16) полезно для наглядности (для презентаций) иллюстрировать *круговыми диаграммами* (см. рис. 4.17) – плоскими или объёмными. Инструменты для их создания появятся в инструментарии пакета SMath после подгрузки приложения Pie Chart Region.

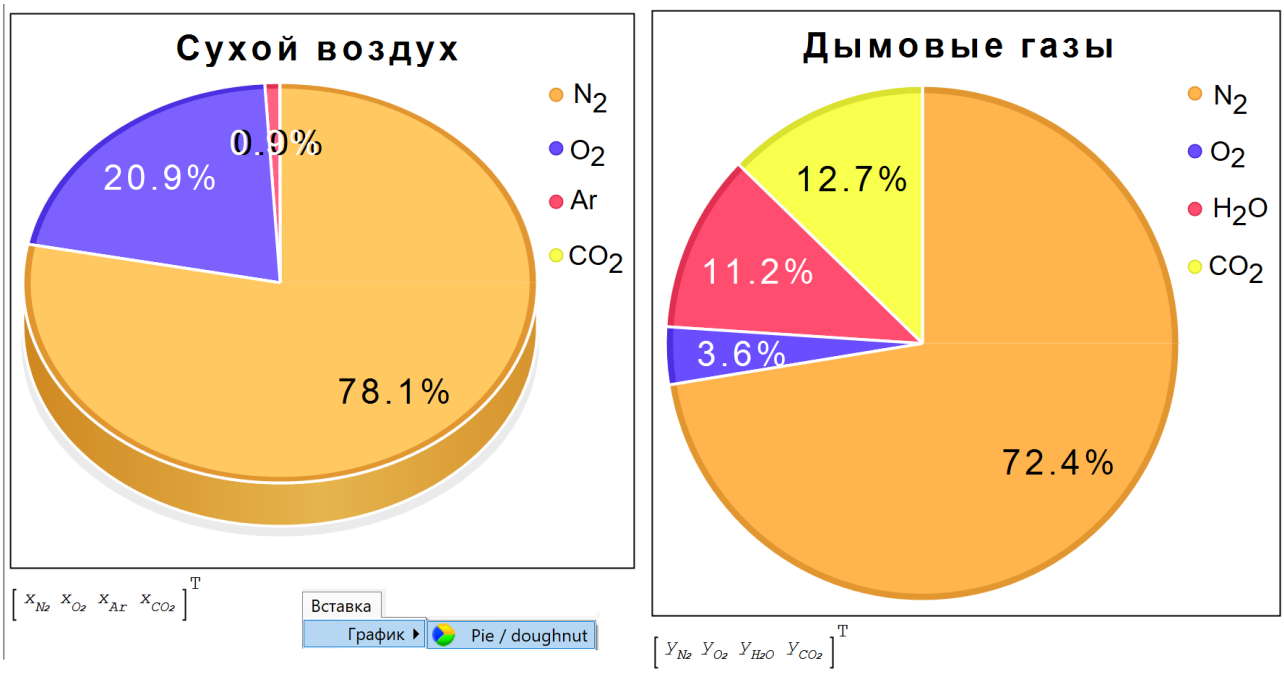


Рис. 4.17 Круговые диаграммы

При решении задач технической термодинамики иногда приходится обращаться к бумажным или электронным таблицам теплофизических свойств веществ и их смесей. Такие таблицы были в ходу при ручных расчётах (см. Предисловие), но они трудно стыкуются со компьютерными расчётами. Таблицу необходимо преобразовать в функцию пользователя, что будет показано ниже.

Если в Интернете сделать, например, запрос по ключу "Плотность водных растворов этанола", то будет выдано много информации, включая и таблицу, показанную на рис. 4.18. Этанол – чистый или с добавкой воды используется в качестве рабочего цикла Ренкина на органических теплоносителях (ORC – см. главу 10). Кто-то отсканировал таблицу из [4] и разместил в интернете. Там же можно найти и другие подобные таблицы из других бумажных справочников, сравнить их и убедиться, что они практически совпадают. Да, в Интернете часто публикуется довольно сомнительная информация, требующая проверки. Но и в бумажных справочниках, прошедших строгое рецензирование и редактирование, увы, встречаются ошибки и опечатки. Так в таблице на рис. 4.18 указано, что плотность измеряется в г/см вместо правильных г/см^3.

Таблица 6-6

Плотность водных растворов этилового спирта в зависимости от температуры, г/см

Весовой процент спирта	Температура, °С				Весовой процент спирта	Температура, °С			
	10	15	20	40		10	15	20	40
0	0,99973	0,99913	0,99823	0,99225	52	0,91723	0,91333	0,90936	0,89288
4	0,99218	0,99195	0,99103	0,98485	56	0,90831	0,90433	0,90031	0,88335
8	0,98660	0,98584	0,98478	0,97808	60	0,89927	0,89523	0,89113	0,87417
12	0,98145	0,98041	0,97910	0,97150	64	0,89006	0,88597	0,88183	0,86466
16	0,97692	0,97552	0,97387	0,96512	68	0,88074	0,87660	0,87241	0,85507
20	0,97252	0,97068	0,96864	0,95856	72	0,87127	0,86710	0,86287	0,84540
24	0,96787	0,96558	0,96312	0,95168	76	0,86168	9,85747	0,85322	0,83564
28	0,96268	0,95996	0,95710	0,94438	80	0,85197	0,84772	0,84344	0,82578
32	0,95655	0,95357	0,95038	0,93662	84	0,84203	0,83777	0,83348	0,81576
36	0,94986	0,94650	0,94306	0,92843	88	0,83181	0,82754	0,82323	0,80552
40	0,94238	0,93882	0,93518	0,91992	92	0,82114	0,81688	0,81257	0,79491
44	0,93433	0,93062	0,92685	0,91108	96	0,80991	0,80566	0,80138	0,78388
48	0,92593	0,92211	0,91823	0,90207	100	0,79784	0,79360	0,78934	0,77203

Рис. 4.18. Скан бумажной таблицы плотности водных растворов этилового спирта

В первой и во второй главах этой книги был упомянут институт стандартов и технологий НИСТ. Второй автор во время своего посещения этой научной организации в городе Боулдер штата Колорадо увидел там такую картину. В компьютерном классе попарно у мониторов сидели молодые люди и что-то там делали, шепчась и клацая клавишами клавиатуры. Автор удивился и спросил у американских коллег: "А что, у вас тоже не хватает вычислительной техники, и приходиться у одного компьютера сажать двоих?". Но автору объяснили, что это студенты местного университета, подрабатывающие в НИСТ. Они вводят в компьютер информацию, подобную той, какая показана на рис. 4.18. Первый студент диктует числа из бумажной книги или научного журнала, а второй вводит их в компьютер. При этом первый студент дополнительно контролирует правильность ввода, попеременно поглядывая то в справочник, то на дисплей компьютера. В НИСТ пытались было сканировать такие таблицы и оцифровывать их автоматически. Но плохое качество печатного оригинала и несовершенство ридеров[43] приводило к тому, что в итоговой оцифрованной таблице оказывалось много опечаток, которые приходилось выявлять и исправлять вручную. Проще и надежнее было сразу нанять студентов, дав им заодно возможность подработать.

Второй автор на практическом занятии поручил своим студентам сделать такую работу на компьютере – сравните рис. 4.18 и 4.19.

[43] Программы, переводящие отсканированные тексты в цифровой формат.

На рис. 4.19 показано содержимое матрицы M с "шапкой", хранящей значения температуры, и с "боковиком", хранящим значения весового процента этанола. Это, конечно, не весовой, а массовый процент. Но эти две физические величины часто путают.

$M :=$

"n/t"	10	15	20	40
0	0.99973	0.99913	0.99823	0.99225
4	0.99218	0.99105	0.99103	0.98485
8	0.98660	0.98584	0.98478	0.97808
12	0.98145	0.98041	0.9791	0.97150
16	0.97692	0.97552	0.97387	0.96512
20	0.97252	0.97068	0.96864	0.95856
24	0.96787	0.96558	0.96312	0.95168
28	0.96268	0.95996	0.95710	0.94438
32	0.95655	0.95357	0.95038	0.93662
36	0.94986	0.9465	0.94306	0.92843
40	0.94238	0.93882	0.93518	0.91992
44	0.93433	0.93062	0.92685	0.91108
48	0.92593	0.92211	0.91823	0.90207
52	0.91723	0.91333	0.90936	0.89288
56	0.90831	0.90433	0.90031	0.88335
60	0.89927	0.89523	0.89113	0.87417
64	0.89006	0.88597	0.88183	0.86466
68	0.88074	0.8766	0.87241	0.85507
72	0.87127	0.8671	0.86287	0.84540
76	0.86168	0.85747	0.85322	0.83564
80	0.85197	0.84772	0.84344	0.82578
84	0.84203	0.83777	0.83348	0.81576
88	0.83181	0.82754	0.82323	0.80552
92	0.82114	0.81688	0.81257	0.79491
96	0.80991	0.80566	0.80138	0.78388
100	0.79784	0.7936	0.78934	0.77203

Рис. 4.19. Цифровой двойник бумажной таблицы, показанной на рис. 4.18

Матрицу M далее планировалось использовать в авторской программе [5] с двойной сплайн-интерполяцией, опирающуюся на двойной цикл for. Но на сайте пользователей

SMath (https://en.smath.com/forum/yaf_postsm80962_lspline-and-linterp---where-is-an-error.aspx) подсказали, что есть более простое решение – см. рис. 4.20 с функцией `InterpBilinear`.

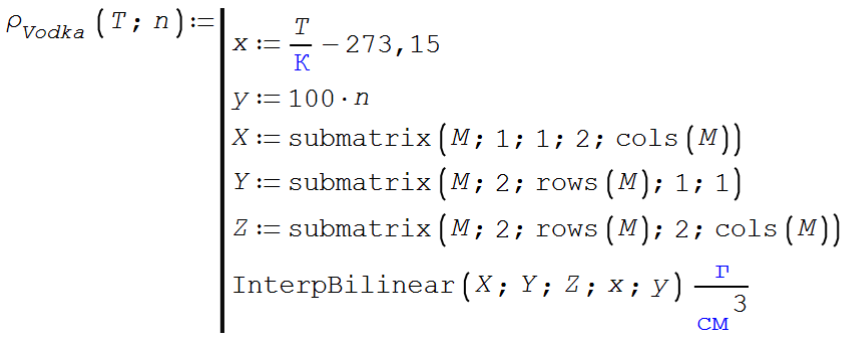


Рис. 4.20. Программа двойной сплайн-интерполяции табличных данных

В программе на рисунке 4.20, во-первых, обрабатываются аргументы: температура переводится в градусы по шкале Цельсия (*x := T/K - 273,15*), а массовая доля превращается в массовый процент (*y :=100 n*) – все в соответствие с боковиком и шапкой исходной таблицы. На последней строке к рассчитанной безразмерной плотности добавляется нужная единица измерения грамм на сантиметр кубический. Это стандартные правила работы с эмпирическими формулами [6].

В программе на рис. 4.20 три раза вызывается встроенная в SMath функция `submatrix`, которая изымает из матрицы *M* «шапку» – вектор *X* с дискретными значениями температуры, вектор «боковика» *Y* с дискретными значениями массовой доли и матрицу *Z* с дискретными значениями плотности (ядро матрицы *M*).

Функция `InterpBilinear` из приложения Statistical Tools проводит двухмерную кусочно-линейную интерполяцию. Есть еще и интерполяция сплайнами (функции `lspline` и `pspline`). На рисунках 4.21 и 4.22 показаны отличия в работе этих двух функций – синяя кривая кусочно-линейная интерполяция, красная кривая – интерполяция сплайном. Зеленые точки – это дискретные данные, по которым велась интерполяция.

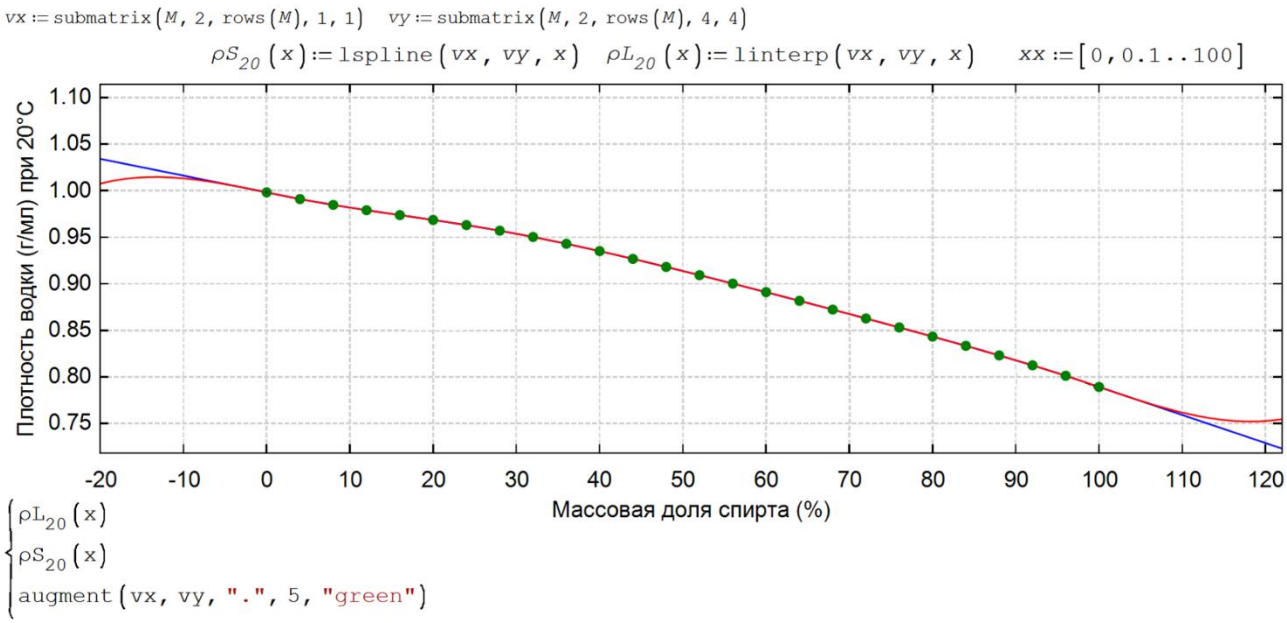


Рис. 4.21. Изотерма 20°C: линейная интерполяция и интерполяция сплайнами

Внутри точек (интерполяция) синяя (функция ρL_{20}) и красная (ρS_{20}) кривые практически совпали. Существенно разъезжаются они в разные стороны вне зеленых точек (экстраполяция, которая в данной задаче не имеет физического смысла).

На рис. 4.22 показано увеличение масштаба кривых двух видов интерполяции вблизи двух точек, где можно заметить небольшое расхождение. Но эти два вида интерполяции отличаются друг от друга не только количественно, но и качественно. Дело в том, первая производная функции, созданной кусочно-линейной интерполяцией, представляет собой набор столбиков, а вторая производная вообще равна нулю. А это плохо для реализации разных численных методов – поиск нулей, максимумов и т.д. Такого недостатка лишена интерполяция сплайнами.

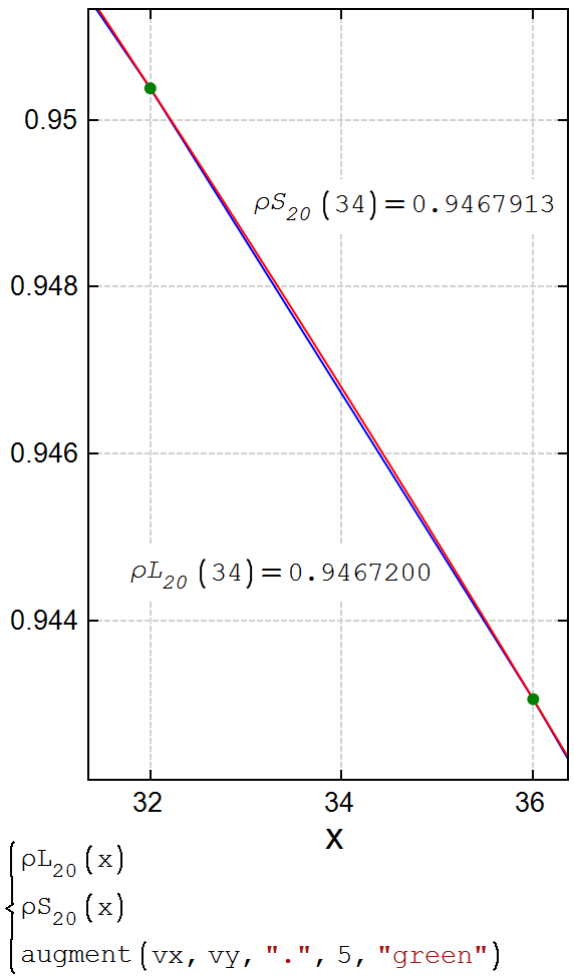


Рис. 4.22. Кривые линейной интерполяции (синяя) и интерполяции сплайнами

На сайте https://community.ptc.com/t5/Mathcad/Spline/td-p/869944 описано, что означают буквы `l`, `p` и `c` перед словом spline в имени функции сплайн-интерполяции.

На сайте данного учебного пособия размещён SMath-документ с двойной интерполяцией сплайнами.

В среде SMath возможна и интерполяция для создания функции с тремя аргументами – давление, температура и соленость воды – см. рис. 9.32 в главе 9. Трехмерных массивов в среде SMath нет, а есть только одномерный массив (вектор) и двухмерный массив (матрица). Но некую трехмерную конструкцию создать можно через вектор, элементы которого – это матрицы. Такое объединение данных в информатике используется для хранения изображений в виде вектора с тремя элементами, каждый из которых хранит интенсивность окраски растра в три цвета – в красный, зеленый и синий (RGB).

Задания читателям.

1. Постройте p, v-, T, s и h, s-диаграммы цикла Отто
2. Сделайте описанные расчёты и постройте диаграммы для цикла Дизеля и цикла Тринклера.
3. Повторите описанные расчёты (рис. 4.3-4.8), используя не пакет CoolProp Wrapper, а пакет WaterSteamPro (функции с префиксом wspg).
4. Постройте в среде SMath или с помощью другой программы диаграмму-тетраэдр (рис. 4.16).

Литература:

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Compression_ratio#/media/File:4StrokeEngine_Ortho_3D_Small.gif
2. Александров А.А., Охотин В.С., Орлов К.А. Техническая термодинамика. — М.: Издательство МЭИ, 2023. — 457 с. (http://www.twt.mpei.ac.ru/TTHB/TT-AOO.pdf)
3. Очков, В. Ф. Math CAD и Python: обучение по технологии STEM / В. Ф. Очков, А. И. Тихонов. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 472 с. — ISBN 978-5-507-47865-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/356012 (дата обращения: 09.07.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. 3-е изд., СПб, Химия, 1991 г.
5. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / Под общ. ред. В.Ф. Очкова. Издательство БХВ-Петербург. 2014. – 336 с. (последнее издание http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Therm-Studies.pdf)
6. Очков В.Ф., Орлов К.А. Единицы измерений в трех видах формул: в физических, эмпирических и… псевдоэмпирических // Мир измерений № 1-2, 2021 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Pseudo.pdf)

Глава 5 Расчет процесса вентиляции и кондиционирования влажного воздуха

(написано совместно с Е.А. Шелгинским)

Рассмотрим пример расчета процесса вентиляции и кондиционирования воздуха, схема которого системы представлена на рисунке 5.1.

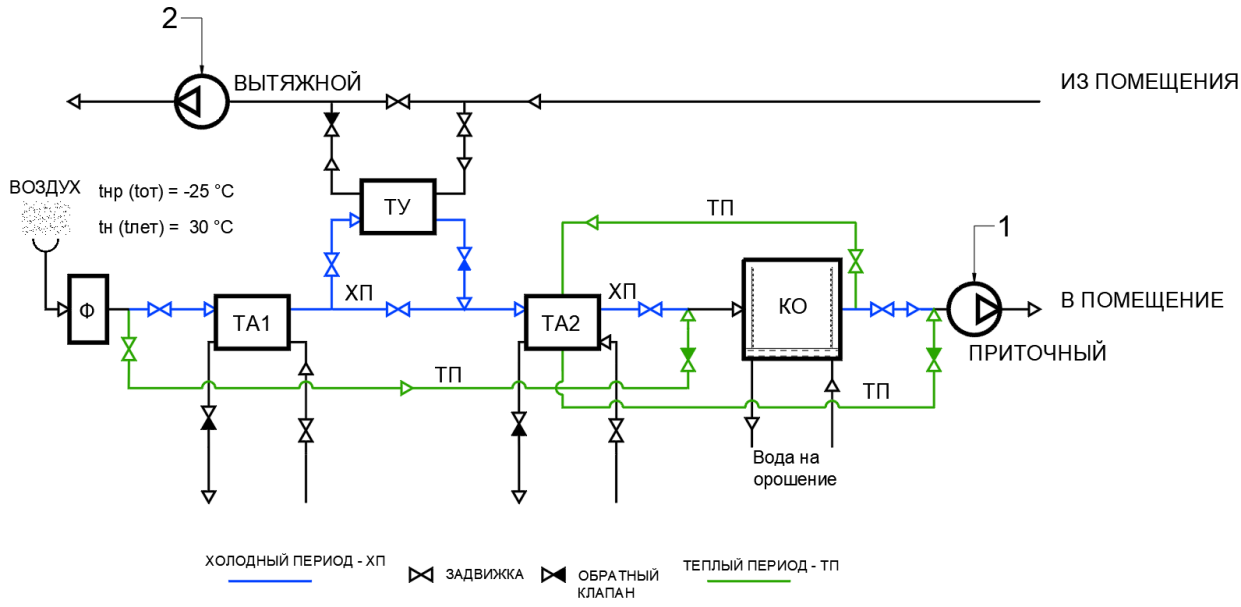


Рис. 5.1 Принципиальная схема системы вентиляции и кондиционирования для выполнения расчетов

Вода на орошение подводится. Избытки воды удаляются после орошения.

Также в теплый период влажный воздух соприкасается с капельками холодной воды и осушается, так как водяной пар, находящийся в воздухе, конденсируется и отводится.

Избытки воды на орошение удаляются из КО и поступают на охлаждение в холодильную машину (на рисунке холод. машина не показана). Поэтому в подводе и отводе указана вода на орошение.

Принципиальная схема вентиляции и кондиционирования имеет такую маркировку: Ф – воздушный фильтр; ТА1, ТА2 – подогреватели воздуха горячей водой из тепловой сети (ТС); ТУ – теплообменник утилизатор; Название «теплообменник-утилизатор» также широко используется в сфере ОВиК. А также и «рекуператор». Это синонимы в данном случае. КО – камера орошения; 1, 2 – соответственно приточный и вытяжной вентиляторы; ТП, ХП – соответственно обозначение хода воздуха в теплом периоде (летом) и в холодном периоде (зима). А работает она следующим образом.

В холодный период (в данном случае температура $t_{нр}$) атмосферный воздух, пройдя фильтр *Ф,* поступает в теплообменник *ТА1*, где подогревается горячим теплоносителем до минимально допустимой температуры для теплообменника утилизатора (*ТУ*) на входе. Затем, воздух поступает в *ТУ*, где подогревается выходящим из помещения нагретым

воздухом. После чего, воздух нагревается в теплообменнике *TA2* до значения удельной энтальпии сухого воздуха, соответствующей удельной энтальпии в точке приточного воздуха, так как после *TA2* воздух будет увлажняться в камере орошения (*КО*). Во время увлажнения водой, температура воздуха будет также понижаться, при этом принимается, что процесс увлажнения происходит при постоянной удельной энтальпии. После камеры орошения воздух поступает в помещение. Поток воздуха в холодный период на схеме обозначен *ХП*.

В теплый период (в данном случае температура $t_{\text{н}}$) атмосферный воздух, пройдя фильтр, поступает сразу в *КО*. Осушается по политропному процессу, затем после *КО* воздух поступает в *TA2*, где подогревается и поступает в помещение. Поток воздуха в теплый период на схеме обозначен *ТП*.

В теплый период воздух осушается в камере орошения, т.к. холодная вода имеет температуру ниже температуры точки росы для воздуха. Водяной пар, соприкасаясь с холодной водой, конденсируется. В следствие этого происходит как осушение, так и понижение температуры с удельной энтальпией сухого воздуха. При расчете КО для теплого периода в первом приближении задается точка на выходе из КО с относительной влажностью 90-95% с нужным меньшим влагосодержанием (если принять наибольшую эффективность КО) и соединяется прямой линией. Процесс осушения и охлаждения воздуха для теплого периода в КО описан во многих источниках, он называется политропным процессом.

Основные пункты расчета проводились по методологии, изложенные в [1, 2].

Результаты расчета процессов в системе кондиционирования показаны в конце файла на построенной h-d диаграмме влажного воздуха. Вся глава посвящена алгоритму расчета и построения процессов обработки влажного воздуха на h, d-диаграмме в SMath через функцию CoolProp_HAProps. Подразумевается, что при выполнении подобного рода расчетов и действий в SMath Studio, студент (читатель) уже знаком с основными процессами в h-d диаграмме и принципом работы системы вентиляции и кондиционирования.

Задача расчета: рассчитать тепловые нагрузки на теплообменные аппараты системы вентиляция и кондиционирования. Рассчитать схему увлажнения и осушения воздуха в камере орошения. Построить процессы в *h, d*-диаграмме. Примеры построения *h, d*-диаграммы влажного воздуха, а также *d, t*-диаграммы влажного воздуха можно посмотреть в [3].

Исходные данные для задачи показаны на рисунке 5.2.

Температура приточного воздуха, поступающего в систему вентиляции в зимний период :

$$tнр := (-25)\ °C = 248{,}15\ К$$

Температура приточного воздуха, поступающего в систему вентиляции в летний период : $tн := 30\ °C$

Температура приточного воздуха, поступающего в помещение: $tвп := 24\ °C$

Относительная влажность приточного воздуха, поступающего в помещение: $φвп := 60\ \%$

Температура вытяжного воздуха, уходящего из помещения: $tвy := 28\ °C$

Относительная влажность вытяжного воздуха: $φвy := 50\ \%$

Массовый расход воздуха: $Gвх := 30\ \frac{кг}{с}$

Расход приточного и вытяжного воздуха равны.

Относительную влажность наружного воздуха зимой примем: $φнр := 90\ \%$

Относительную влажность наружного воздуха летом примем: $φн := 70\ \%$

Температуру воздуха на выходе из ТА1 примем: $t_1 := (-4)\ °C = 269{,}15\ К$

Рис. 5.2. Исходные данные для задачи

5.1. Холодный период

В холодном периоде атмосферный воздух, пройдя фильтр (Ф), направляется в подогреватели ТА1, ТА2, а также подогревается в ТУ, что способствует экономии тепловой энергии за счет рекуперации тепла вытяжного воздуха. Затем, воздух увлажняется в КО до требуемых параметров относительной влажности, влагосодержания и температуры.

Расчет тепловой нагрузки в ТА1 показан на рисунке 5.3.

Вход в ТА1:

$tнр = 248{,}15\ К \qquad φнр = 0{,}9$

Влагосодержание кг. воды / кг. сух. воздуха:

$$dнр := \text{CoolProp_HAProps}("W"; "T"; tнр; "P"; Patm; "R"; φнр) = 0{,}0004$$

Удельная энтальпия сухого воздуха:

$$hнр := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; tнр; "P"; Patm; "R"; φнр) = -24{,}2766\ \frac{кДж}{кг}$$

Выход из ТА1:

$t1 = 269{,}15\ К$

Влагосодержание кг. воды / кг. сух. воздуха: $d1 := dнр = 0{,}0004$
(нагрев в ТА происходит при d = const)

Относительная влажность: $φ1 := \text{CoolProp_HAProps}("R"; "T"; t1; "P"; Patm; "W"; d1) = 0{,}1303$

Удельная энтальпия сухого воздуха:

$$h1 := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; t1; "P"; Patm; "R"; φ1) = -3{,}1465\ \frac{кДж}{кг}$$

Тепловая мощность, переданная в ТА1 для нагрева воздуха:

$$\boxed{Qта1 := Gвх \cdot (h1 - hнр) = 633{,}9048\ кВт}$$

Рис. 5.3. Расчет тепловой нагрузки в ТА1 для холодного периода

Расчет тепловой нагрузки в ТУ и в ТА2 показан на рисунке 5.4.

Программа SMath Studio автоматически выводит значения в кельвинах. При задании вывода значения через градусы Цельсия внутри переменной все равно будет храниться значение в кельвинах. Поэтому в данном случае не имеет никакого значения, каким образом обозначается температура: t или T. Ответ всегда будет выводится в кельвинах при подстановке знака равенства.

$t2 := tвy - 5\ К = 296{,}15\ К$

Например, в данном случае, если у ранее заданной температуры tвy, изначально обозначенной через 28 °C, вычесть 5 °C, то ответ выйдет некорректным, ибо вместо 5 °C программа подставит 273.15 + 5 = 278.15 К, что приведет к неправильному расчету. Поэтому, все расчеты по умолчанию производятся в кельвинах в программе. В этом и состоит особенность использования единиц измерения в SMath Studio для температур, которую необходимо учитывать. Поэтому в данной работе в конкретном случае – непринципиально, каким образом обозначается температура: через t или через T.

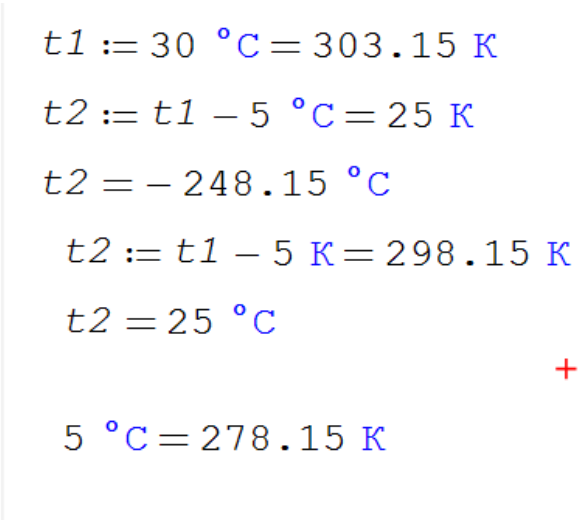
В примере выше как раз и показана более подробно эта особенность:

Температура приточного воздуха, поступающего в систему вентиляции в зимний период :

$tнр := (-25)\ °C = 248{,}15\ К$

при определении через градусы Цельсия программа выводит все равно в кельвинах и получается автоматически, что переменная t выводит через К. Если обязательно показывать кельвины с T, а градусы Цельсия с t, то будет проблематично показать хранение температуры в кельвинах по умолчанию, даже если пользователь задал градусы Цельсия на конкретном примере. Если такую особенность не показать, то пользователь столкнется сам с этой проблемой, в книге этого не будет показано (сам автор с этим сталкивался, что приводило к неправильному расчету, поэтому в книге показано все через начальное обозначение через градусы Цельсия, а затем совмещение с кельвинами, чтобы акцентировать на этом внимание).

Пример с некорректным расчетом температур:



Изначально, обозначив через градусы Цельсия, мы хотим вычесть 5 градусов Цельсия из 30 градусов Цельсия. Если подставить 5 градусов Цельсия, то разница будет в кельвинах – 25 К, что потом программа переведет автоматически в (**– 248.15 °C).** Поэтому в данном случае непринципиально, как обозначается температура через t или T. Если пользовать обозначает для себя температуры в градусах Цельсия – то он должен понимать, что необходимо всегда учитывать хранение значений температур в кельвинах, иначе это приведет к неправильному расчету.

ТУ (теплообменник утилизатор)

Вход в ТУ:

$t1 = 269{,}15\ К \quad \varphi 1 = 0{,}1303 \quad h1 = -3{,}1465\ \frac{кДж}{кг} \quad d1 = 0{,}0004$

Выход из ТУ:

Для данной задачи зададимся, что разница температур между вытяжным воздухом на входе и приточным на выходе из ТУ составляет 5 градусов по Цельсию:

$t2 := tвy - 5\ К = 296{,}15\ К \qquad d2 := d1 = 0{,}0004$

$\varphi 2 := \text{CoolProp_HAProps}("R"; "T"; t2; "P"; Patm; "W"; d2) = 0{,}0203$

$h2 := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; t2; "P"; Patm; "R"; \varphi 2) = 24{,}0297\ \frac{кДж}{кг}$

Тепловая мощность, переданная вытяжным воздухом приточного воздуху сухой части:

$$Qту := Gвх \cdot (h2 - h1) = 815{,}2856\ кВт$$

ТА2

Вход в ТА2:

$t2 = 296{,}15\ К \quad \varphi 2 = 0{,}0203 \quad d2 = 0{,}0004 \quad h2 = 24{,}0297\ \frac{кДж}{кг}$

Выход из ТА2:

На выходе из ТА2 значение удельной энтальпии воздуха примем равной удельной энтальпии приточного воздуха (принимаем, что процесс охлаждения и увлажнения протекает изоэнтальпийно):

Удельная энтальпия:

$h3 := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; tвп; "P"; Patm; "R"; \varphi вп) = 52{,}7471\ \frac{кДж}{кг}$

Температура: $t3 := \text{CoolProp_HAProps}("T"; "H"; h3; "P"; Patm; "W"; d2) = 51{,}5047\ °C$

Относительная влажность: $\varphi 3 := \text{CoolProp_HAProps}("R"; "T"; t3; "P"; Patm; "H"; h3) = 0{,}0043$

Тепловая мощность, переданная в ТА2 для нагрева воздуха: $Qта2 := Gвх \cdot (h3 - h2) = 861{,}5205\ кВт$

Рис. 5.4. Расчет тепловой нагрузки в ТУ и в ТА2 для холодного периода

Не имеет значения, через какие единицы измерения обозначена температура. Присвоив температуре градусы Цельсия, программа автоматически все переводит в кельвины. Всегда. Поэтому и не имеет смысл в программе соблюдать правило обозначения температур через t или T. Уже при оформлении работ для публикации пользователь должен будет соблюдать правила обозначений, но в своих расчетах в Smath – это ни к чему из-за такой особенности с единицами измерений с температурами. Аналогично с удельными энтальпиями – по умолчанию значение хранится в единицах измерения Гр, хоть и задали кДж/кг. Тоже самое и с другими термодинамическими параметрами, как с экстенсивными, так и с интенсивными.

Поэтому для CoolProp все подставленные параметры температур автоматически переводятся в кельвины.

Целью расчета камеры орошения является определение количество воды, подаваемой на орошение (увлажнение или осушение) воздуха с целью дальнейшего подбора или проектирования КО.

Температуру мокрого термометра (ТМТ) на входе и выходе из КО примем одинаковой, т.к. процесс в КО принимаем в качестве изоэнтальпийного (изменением удельной энтальпии сухого воздуха пренебрегаем в следствие допустимой величины).

В соответствии с выше сказанным, величину ТМТ можно определить по двум вариантам (см. рис. 5.5).

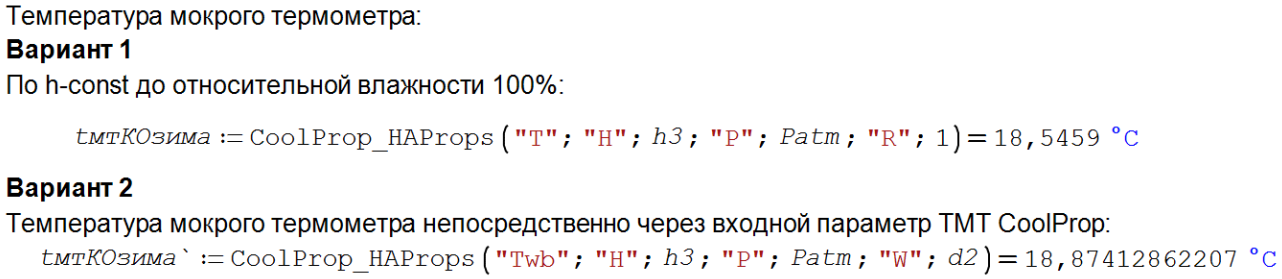


Рис. 5.5. Определение ТМТ

Как видно, есть различие. Так как для расчета КО принимается изоэнтальпийный процесс, то для расчета и последующего построения процесса увлажнения в КО примем значение ТМТ 1-го варианта.

Расчет процесса в КО и количества добавленных водяных паров в воздух показан на рисунке 5.6.

Коэффициент эффективности орошения: $Езима := \frac{t3 - tвп}{t3 - tмтКОзима} = 0,8345$

Коэффициент орошения: $bорзим := \sqrt{\frac{\ln(1 - Езима)}{-1,19}} = 1,2295$

Расход воды в камере орошения: $Gвкозим := Gвх \cdot bорзим = 36,885 \frac{кг}{с}$

Влагосодержание в точке ВП:

$$dвп := \text{CoolProp_HAProps}("W"; "T"; tвп; "P"; Patm; "R"; φвп) = 0,0112$$

Расход водяных паров во влажном воздухе до КО:

$Gh2o := Gвх \cdot dнр = 0,0105 \frac{кг}{с}$

Расход влажного воздуха до КО:

$Gсм := Gвх + Gh2o = 30,0105 \frac{кг}{с}$

Количество водяного пара в воздухе после КО:

$Gвл1 := Gвх \cdot dвп = 0,3373 \frac{кг}{с}$

Расход влажного воздуха после КО:

$Gсм1 := Gвх + Gвл1 = 30,3373 \frac{кг}{с}$

Увеличение расхода влажного воздуха:

$\Delta Gкозим := Gсм1 - Gсм = 0,3267 \frac{кг}{с}$

Количество воды, добавленной в КО воздуху:

$\Delta GH2Oзим := Gвл1 - Gh2o = 0,3267 \frac{кг}{с}$

Рис. 5.6. Расчет КО

5.2. Теплый период

В теплый период атмосферный воздух, пройдя фильтр (Ф), направляется в КО для осушения и принимает значение влагосодержания соответствующего значению влагосодержания в точке ВП (приточка) и имеет относительную влажность 95% (принимаем данное значение). Затем, после КО, воздух подогревается в ТА2, где его температура и относительная влажность изменяются до параметров точки ВП.

В теплый период воздух осушается в камере орошения, т.к. холодная вода имеет температуру ниже температуры точки росы для воздуха. Водяной пар в воздухе, соприкасаясь с холодной водой, конденсируется. В следствие этого происходит как осушение, так и понижение температуры с удельной энтальпией сухого воздуха. При расчете КО для теплого периода в первом приближении задается точка на выходе из КО с относительной влажностью 90-95% с нужным меньшим влагосодержанием (если принять наибольшую эффективность КО) и соединяется прямой линией.

Подогрев необходим, так как после камеры орошения значение влагосодержания соответствует нужному, но после камер орошения относительная влажность близится к 95%, а воздух необходимо подавать с относительной влажностью, например, (40 – 60) %, и температурой, например, 20 – 25 °С. Все зависит от условий труда и/или типа помещений.

Поэтому необходимо подогревать воздух после осушения, чтобы добиться нужной по нормам температуры воздуха и относительной влажности, чтобы человек в помещении попадал в зону комфорта.

Определим параметры влажного воздуха на входе в КО и на выходе из КО. См. рис. 5.7.

Параметры наружного воздуха на входе в КО:

Температура наружного воздуха: $tн = 30\ °C$

Относительная влажность: $φн = 70\ \%$

Влагосодержание в данной точке:

$$d1лет := \text{CoolProp_HAProps}("W"; "T"; tн; "P"; Patm; "R"; φн) = 0{,}0189$$

Удельная энтальпия в данной точке:

$$h1лет := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; tн; "P"; Patm; "R"; φн) = 78{,}4347\ \frac{кДж}{кг}$$

В летнем периоде процесс осушения наружного воздуха происходит по политропному процессу.

Для расчета процесса осушения необходимо знать параметры воздуха после КО.

Зададим точку на выходе из КО со следующими параметрами:

Относительная влажность на выходе из КО: $φколет := 95\ \%$

Температура мокрого термометра на входе в КО:

$$tмтКОлет1 := \text{CoolProp_HAProps}("Twb"; "H"; h1лет; "P"; Patm; "W"; d1лет) = 25{,}5024359302\ °C$$

Влагосодержание в данной точке соответствует влагосодержанию в точке ВП: $dвп = 0{,}0112$

Рис. 5.7. Расчет параметров влажного воздуха до/после КО.

Температура сухого термометра влажного воздуха после КО (см. рис. 5.8):

Температура: $tколет := \text{CoolProp_HAProps}("T"; "W"; dвп; "P"; Patm; "R"; φколет) = ▮\ °C$

Sorry, but cannot provide two inputs that are both water-content (humidity ratio, relative humidity, absolute humidity

Рис. 5.8. Температура сухого термометра после КО

Температуру сухого термометра невозможно определить, когда входными

В данном случае имеется ввиду, что нельзя определить при таких входных параметрах температуру через CoolProp_HAProps. Так как программа имеет в данном случае ограничения. Этот недостаток CoolProp_HAProps и был показан.

параметрами являются одновременно влагосодержание и относительная влажность. Аналогично при таких входных параметрах нельзя определить и другие параметры влажного воздуха.

Необходимо, чтобы на выходе из КО в летнем периоде влагосодержание имело значение, как и в точке ВП (приточка).

Необходимо определить температуру при влагосодержании *dвп* и относительной влажности 95%.

Точка росы в точке ВП (см. рис. 5.9):

$$tвпр := \text{CoolProp_HAProps}("Tdp"; "W"; dвп; "P"; Patm; "T"; tвп) = 15{,}7652\ °C$$

Рис. 5.9. Температура точки росы при параметрах приточного воздуха (ВП).

Для определения температуры сухого термометра на выходе из КО составим с помощью средств программирования SMath Studio программу расчета данной температуры. См. рис. 5.10.

Значение, с которым происходит сравнение разницы относительной влажности из i строки и необходимым значением влажности 0.95. Если разница по модулю меньше данного значения, программа выводит соответствующее значение относительной влажности i строки по которой, в свою очередь, определяется температура. Чем меньше данное значение n, тем ближе значение влажности к 0.95. Однако, необходимо коррелировать с шагом температуры, иначе может не произойдет расчета с учетом составленного алгоритма в примере.

$$n := 0{,}0001$$

Шаг, с которым идет перебор значений температур в программе: $TempStep := 0{,}0001\ K$

Количество расчетов: $ttrange := 10000$

Программа:

Определение значений относительной влажности с по интервалу температур:

```
t := tвпр + 0,00001 K
for i ∈ [1..ttrange]
    R_i := CoolProp_HAProps("R"; "W"; dвп; "P"; Patm; "T"; t)
    t := t + TempStep
```

Начальное значение температуры примем как значение температуры в точке росы. Однако, необходимо добавить искусственно значение выше на 0.00001 К, т.к. при значении температуры ровно в точке росы, программа выдает ошибку.

Сравнение каждого значения относительной влажности с заданной разностью:

```
for i ∈ [1..ttrange]
    R` := R_i − 0,95
    if |R`| < n
        Rколет := R_i
        ПорядковыйНомерВМассиве := i
    else
        0
0
```

Рис. 5.10. Алгоритм расчета температуры сухого термометра влажного воздуха на выходе из КО

Вывод результатов программы и их анализ показан на рисунке 5.11.

Вывод результатов

Относительная влажность при найденной температуре: $Rколет = 0,94990178219664$

Процентное различие между полученным результа :

$$\left|\frac{(0,95 - Rколет)}{\left(\frac{(Rколет + 0,95)}{2}\right)}\right| \cdot 100\ \% = 0,0103\ \%$$

Порядковый номер в цикле, на котором произошло выполнение условия:

$$ПорядковыйНомерВМассиве = 8053$$

Значение температуры сухого термометра воздуха на выходе из КО:

$$ТемператураНаВыходеИзКО := (твпр + 0,00001\ К) + TempStep \cdot ПорядковыйНомерВМассиве = 16,5705\ °C$$

$$tколет := ТемператураНаВыходеИзКО = 16,5705\ °C$$

Проверим

$$Rcheck := CoolProp_HAProps("R"; "W"; dвп; "P"; Patm; "T"; tколет) = 0,9499$$

С учетом погрешности, значение удовлетворительное

Рис. 5.11. Вывод и анализ результатов программы по определению температуры сухого термометра влажного воздуха на выходе из КО

Определим значения удельной энтальпии, температуры мокрого термометра и коэффициент эффективности орошения. См. рис. 5.12.

Удельная энтальпия в данной точке:

$$hколет := CoolProp_HAProps("H"; "W"; dвп; "P"; Patm; "T"; tколет) = 45,1142\ \frac{кДж}{кг}$$

Температура мокрого термометра на входе в КО:

$$tмтКОлет2 := CoolProp_HAProps("Twb"; "H"; hколет; "P"; Patm; "W"; dвп) = 16,055827289133\ °C$$

Коэффициент эффективности орошения:

$$Елето := 1 - \frac{tколет - tмтКОлет2}{tн - tмтКОлет1} = 0,8856$$

Рис. 5.12. Расчет коэффициента эффективности орошения

Теперь необходимо определить температуру воды, идущей на орошение воздуха в КО и значения приведенного коэффициента эффективности орошения.

Вода нужной температурой получается при охлаждении в холодильной машине, которая на схеме не показана.

Порядок расчета итерационный:

1) Задается температура воды;
2) По данному значению температуры воды определяется удельная энтальпия сухого воздуха при относительной влажности 100%;
3) Полученное значение удельной энтальпии подставляется в расчет приведенного коэффициента эффективности;

4) Найденное значение коэффициента подставляется в формулу для определения температуры воды (уточняющая формула);
5) Если при уточнении температуры воды, значение совпало с ранее принятой температурой воды с отличием менее 3%, то расчет завершается и принимается заданная температура;
6) Если отличие составляет более 3%, то заново задается значение температуры воды.

Расчет показан на рисунке 5.13.

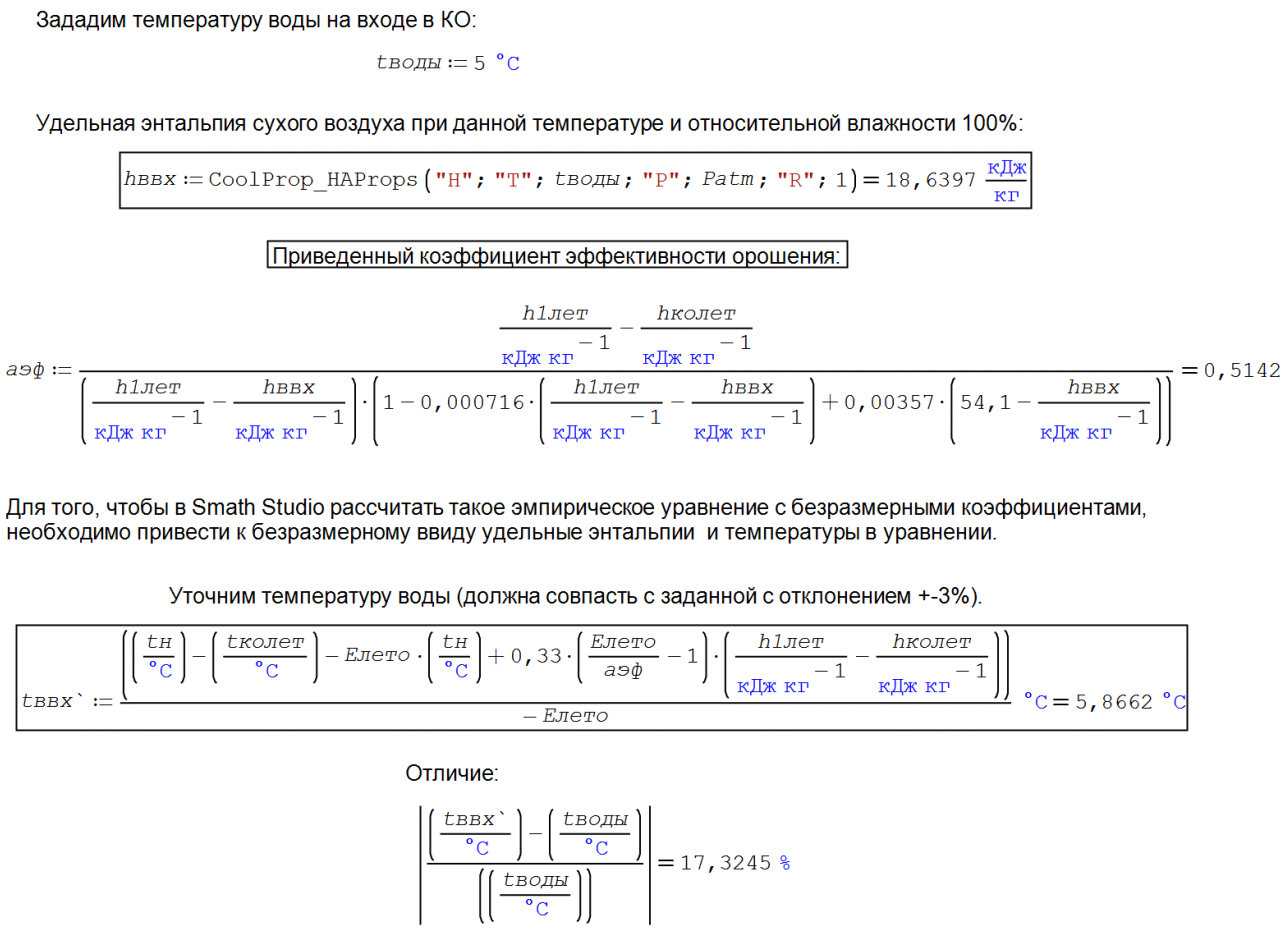


Рис. 5.13. Расчет температуры воды на входе в КО

В данном случае, принятое значение температуры воды на входе в КО 5 °С не удовлетворяет условию. Необходимо задать другое значение.

Так как *«перебирать вручную»* значения температуры воды долго, то составим программу для автоматического определения данного значения температуры.

Составим программу, где по заданному интервалу удельных энтальпий будет определяться температура воды. Затем, значения температуры будут подставляться в расчет приведенного коэффициента эффективности орошения и далее, будет произведен расчет уточняющей температуры.

После выполнения описанного цикла, программа сравнит значения температуры воды на каждом шаге и, если на каком-либо шаге отличие полученных температур составит менее 0.5% (в данном случае зададим 0.5% вместо 3%), то произойдет возврат значения температуры воды, удовлетворяющей условию. Также возвратим порядковый номер шага, на котором выполнилось условие для расчета удельной энтальпии, соответствующей найденному значению температуры.

Составленная программа продемонстрирована на рисунке 5.14.

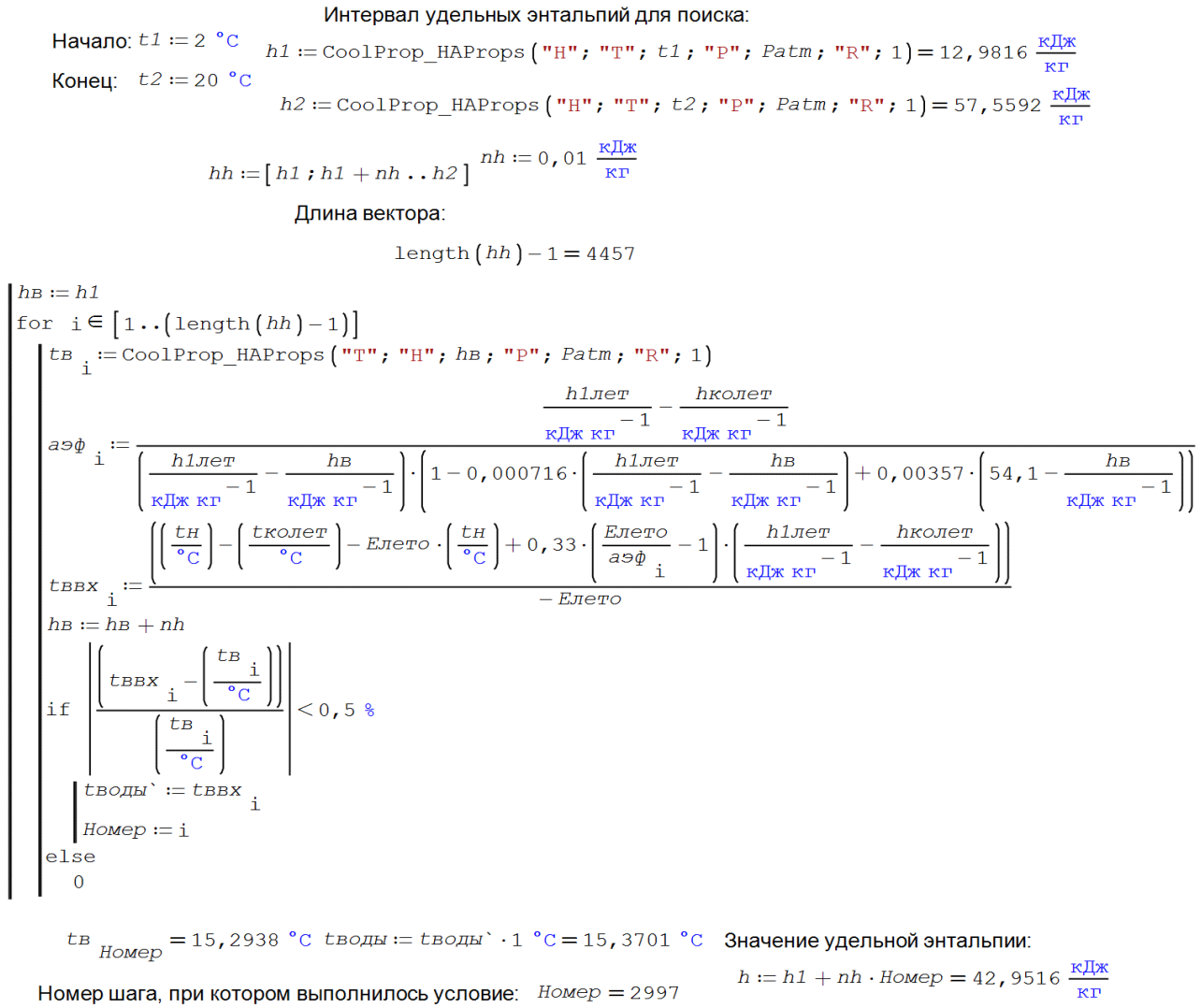


Рис. 5.14. Программа расчета температуры воды на входе в КО

Необходимо отметить, что рекомендуется составлять подобного вида формулы в безразмерном виде.

Проверим полученное значение температуры воды. См. рис. 5.15.

Проверка:

Удельная энтальпия сухого воздуха при данной температуре и относительной влажности 100%:

$$hввх := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; tводы; "P"; Patm; "R"; 1) = 43,1578 \ \frac{кДж}{кг}$$

Приведенный коэффициент эффективности орошения:

$$аэф := \frac{\frac{h1лет}{кДж\ кг^{-1}} - \frac{hколет}{кДж\ кг^{-1}}}{\left(\frac{h1лет}{кДж\ кг^{-1}} - \frac{hввх}{кДж\ кг^{-1}}\right) \cdot \left(1 - 0,000716 \cdot \left(\frac{h1лет}{кДж\ кг^{-1}} - \frac{hввх}{кДж\ кг^{-1}}\right) + 0,00357 \cdot \left(54,1 - \frac{hввх}{кДж\ кг^{-1}}\right)\right)} = 0,9317$$

Для того, чтобы в Smath Studio рассчитать такое эмпирическое уравнение с безразмерными коэффициентами, необходимо привести к безразмерному ввиду удельные энтальпии и температуры в уравнении.

Уточним температуру воды (должна совпасть с заданной с отклонением +-3%).

$$tввх` := \frac{\left(\left(\frac{tн}{°C}\right) - \left(\frac{tколет}{°C}\right) - Елето \cdot \left(\frac{tн}{°C}\right) + 0,33 \cdot \left(\frac{Елето}{аэф} - 1\right) \cdot \left(\frac{h1лет}{кДж\ кг^{-1}} - \frac{hколет}{кДж\ кг^{-1}}\right)\right)}{-Елето} °C = 15,4497 \ °C$$

Отличие:

$$\left|\frac{\left(\frac{tввх`}{°C}\right) - \left(\frac{tводы}{°C}\right)}{\left(\left(\frac{tводы}{°C}\right)\right)}\right| = 0,5177 \ \%$$

Рис. 5.15. Проверка правильности найденного значения температуры воды

По результатам составленной программы процентное отличие составляет 0.5%. После проверки, отличие составляет 0.5117%.

Такая разница связана с погрешностью в округлениях и в расчетах программы CoolProp и в Smath Studio.

Так как необходимо, чтобы отличие было менее 3% между заданной температурой воды и найденной по уточнению, то значение температуры, определенное с помощью алгоритма – удовлетворяет условию.

Дальнейший расчет показан на рисунке 5.16.

Коэффициент орошения:

$$ворлет := \sqrt[1,15]{\frac{\ln(1 - аэф)}{-0,5}} = 4,3108$$

Расход воды в камере орошения:

$$Gвколет := Gвх \cdot ворлет = 129,3241 \ \frac{кг}{с}$$

Влагосодержание в точке ВП:

$$dвп := \text{CoolProp_HAProps}("W"; "T"; tвп; "P"; Patm; "R"; \varphi вп) = 0,0112$$

Расход влажного воздуха на выходе из КО:

Количество водяного пара: $Gвл2 := Gвх \cdot dвп = 0,3373 \ \frac{кг}{с}$

$$Gсм2 := Gвх + Gвл2 = 30,3373 \ \frac{кг}{с}$$

Расход влажного воздуха на входе в КО:

Количество водяного пара: $Gвл1лет := Gвх \cdot d1лет = 0,5665 \ \frac{кг}{с}$

$$Gсм1лет := Gвх + Gвл1лет = 30,5665 \ \frac{кг}{с}$$

Уменьшение расхода влажного воздуха: $\Delta Gколет := Gсм1лет - Gсм2 = 0,2293 \ \frac{кг}{с}$

Количество сконденсировавшейся влаги: $\Delta GH2Олет := Gвл1лет - Gвл2 = 0,2293 \ \frac{кг}{с}$

Рис. 5.16. Определение расходов воды и воздуха в КО

Определим тепловую мощность, затрачиваемую на подогрев приточного воздуха после КО. См. рис. 5.17.

Вход в ТА2:

Удельная энтальпия в данной точке:

$$hколет := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "W"; dвп; "P"; Patm; "T"; tколет) = 45,1142 \ \frac{кДж}{кг}$$

Выход из ТА2:

Удельная энтальпия:

$$h3 := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; tвп; "P"; Patm; "R"; \varphi вп) = 52,7471 \ \frac{кДж}{кг}$$

Тепловая мощность, переданная в ТА2 для нагрева воздуха (сухой части воздуха):

$$Qта2лет := Gвх \cdot (h3 - hколет) = 228,986 \ кВт$$

Рис. 5.17. Расчет тепловой мощности в ТА2 в теплом периоде

Произведем расчет линий процессов для отображения на *h, d*-диаграмме. См. рис. 5.18 и 5.19.

Нагрев в ТА1, ТУ, ТА2.

$n := 1000$

Интервал удельных энтальпий: $hh := \left[hнр ; hнр + \frac{h3 - hнр}{n} .. h3 \right]$

Температуры:

$$Tlineheating := \overrightarrow{CoolProp_HAProps("T"; "H"; hh; "P"; Patm; "W"; dнр)}$$

Линия: $HeatingWinter := augment\left(\frac{dнр}{г\ кг} - 1 ; \frac{Tlineheating}{К} \right)$

Название линии:

$Tnameheat1 := 296\ К$

$NamehW := augment\left(1; \frac{Tnameheat1}{К}; "НАГРЕВ"; 7; "black" \right)$

Увлажнение (принимаем по h = const.).

$n := 1000$

Интервал влагосодержания: $dd := \left[dнр ; dнр + \frac{dвп - dнр}{n} .. dвп \right]$

Температуры:

$$Twet := \overrightarrow{CoolProp_HAProps("T"; "H"; h3; "P"; Patm; "W"; dd)}$$

Линия: $Wet := augment\left(\frac{dd}{г\ кг} - 1 ; \frac{Twet}{К} \right)$

Название линии:

$Tnamewet := 312\ К$

$NameW := augment\left(7; \frac{Tnamewet}{К}; "УВЛАЖНЕНИЕ"; 7; "black" \right)$

Рис. 5.18. Построение и расчет процессов подготовки воздуха для холодного периода для h, d-диаграммы

Осушение.

$n := 1000$

Линия: $Dry := \text{stack}\left(\left[\frac{d1лет}{г\ кг} - 1 \quad \frac{tн}{К}\right]; \left[\frac{dвп}{г\ кг} - 1 \quad \frac{tколет}{К}\right]\right)$

Название линии:

$Tnamedry := 302\ К$

$NameD := \text{augment}\left(18; \frac{Tnamedry}{К}; "ОСУШЕНИЕ"; 7; "black"\right)$

Нагрев в ТА2.

$n := 1000$

Интервал удельных энтальпий: $hh1 := \left[hколет; hколет + \frac{h3 - hколет}{n} .. h3\right]$

Температуры: $Tlineheating1 := \overrightarrow{\text{CoolProp_HAProps}("T"; "H"; hh1; "P"; Patm; "W"; dвп)}$

Линия: $HeatingSummer := \text{augment}\left(\frac{dвп}{г\ кг} - 1; \frac{Tlineheating1}{К}\right)$

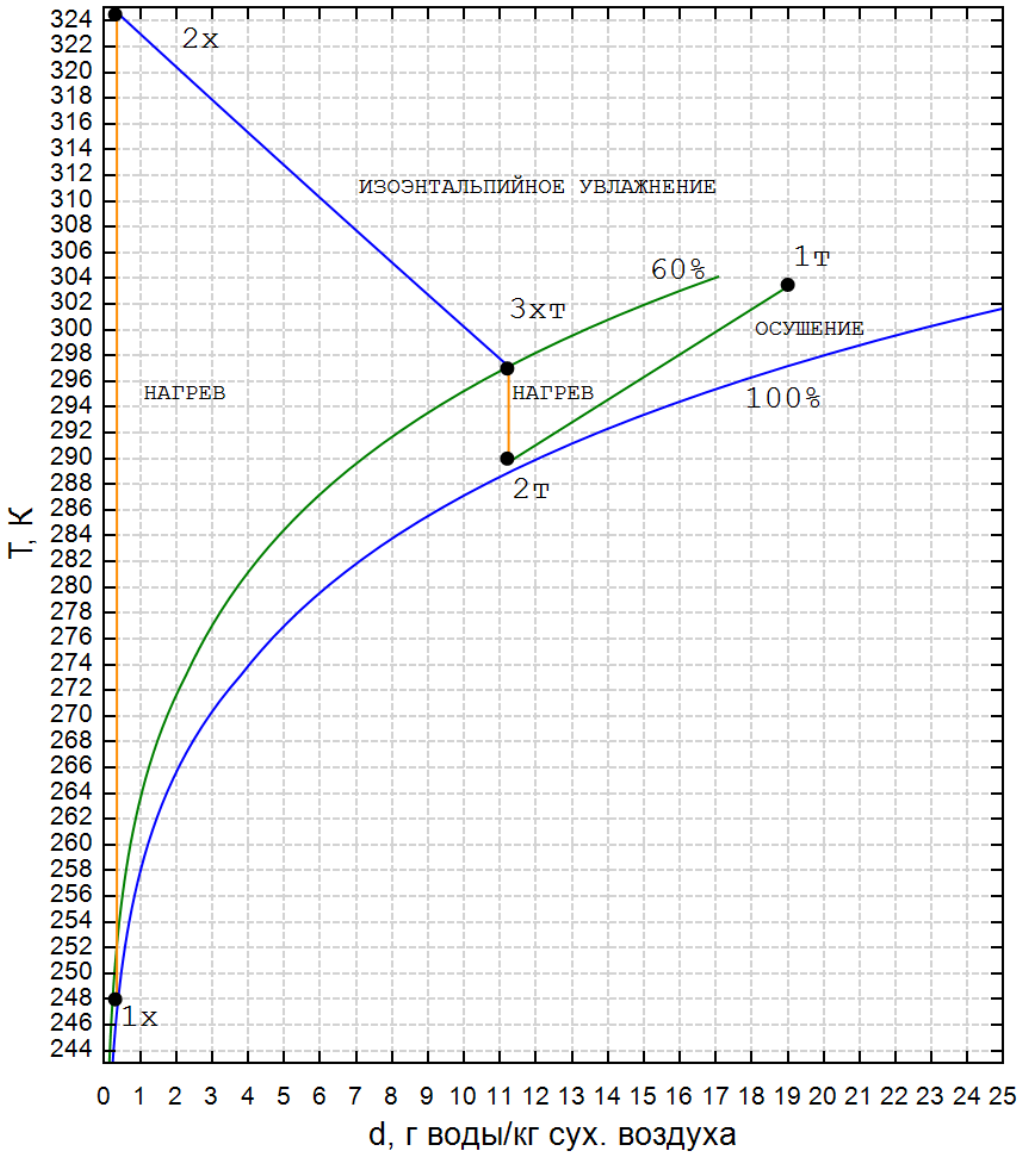
Название линии:

$Tnameheat2 := 296\ К$

$NamehS := \text{augment}\left(\frac{dвп}{г\ кг} - 1; \frac{Tnameheat2}{К}; "НАГРЕВ"; 7; "black"\right)$

Рис. 5.19. Построение и расчет процессов подготовки воздуха для теплого периода для h, d-диаграммы

Построенная *h, d*-диаграмма с линиями процессов рассчитанной задачи показана на рисунке 5.20.




```
hd1
Name100%
hd06
Name60%
HeatingWinter
NamehW
Wet
NameW
Dry
NameD
HeatingSummer
NamehS
Points
Points1
```

Рис. 5.20. Построенная h, d-диаграмма с отображением процессов подготовки воздуха

*Где 1х – 2х – нагрев сухого холодного воздуха по неизменному влагосодержанию; 2х – 3х*т *– изоэнтальпийный процесс увлажнения и охлаждения; 1*т *– 2*т *– нагрев воздуха после осушения до необходимой температуры и относительной влажности.*

Рисунок и подписи исправлены.

Осушение идет с понижением влагосодержания до влагосодержания при точке приточки (к началу желтой линии, к точке 2т,) к относительной влажности 95%.

Задание читателям

1. Пересчитайте систему для случая, когда температура наружного воздуха в холодный период будет равна 5 °С.
2. Рассчитайте систему, если относительная влажность на входе в теплом периоде увеличится на 10%.
3. Пересчитайте систему, если относительная влажность на выходе из камеры орошения будет равна 90% в тёплом периоде. Как скажется это на затратах теплоты?

Список литературы:

1. Вентиляция воздуха в производственных, общественных и жилых зданиях: учеб. пособие / А. Я. Шелгинский, М. Н. Степаненко, А. С. Маленков и др. – М.: Издательство МЭИ, 2017. – 116 с. ISBN 978-5-7046-1837-9.
2. Шелгинский А. Я., Борисов К. Б. Вентиляция и кондиционирование воздуха в помещениях промышленных, общественных и жилых зданий: Конспект лекций по курсу «Энергетические системы обеспечения жизнедеятельности»: Учебное пособие / Под ред. В. В. Галактионова – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 88 с.: ил. ISBN 5-7046-0497-8.
3. http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/martynov.html

Глава 6. Расчет процесса ожижения природного газа

(написано вместе с Н.Л. Будариным)

Сжиженный природный газ (СПГ) представляет собой природный газ, превращённый для удобства хранения и транспортировки в жидкость через охлаждения до минус 162 °С. Основную долю газа составляет метан CH_4. СПГ как топливо для промышленных и бытовых потребителей занимает все большую и большую долю в топливно-энергетическом балансе многих стран. Основное преимущество СПГ – это возможность транспортировки без прокладки дорогих протяженных газопроводов.

Для сжижения газов используются криогенные циклы. В 1885 г. Карл фон Линде (1842-1934) построил и испытал первый промышленный ожижитель газа (воздуха), в котором внутреннее охлаждение осуществлялось дросселированием (эффект Джоуля-Томпсона). Схема и цикл Линде показана на рис. 6.1.

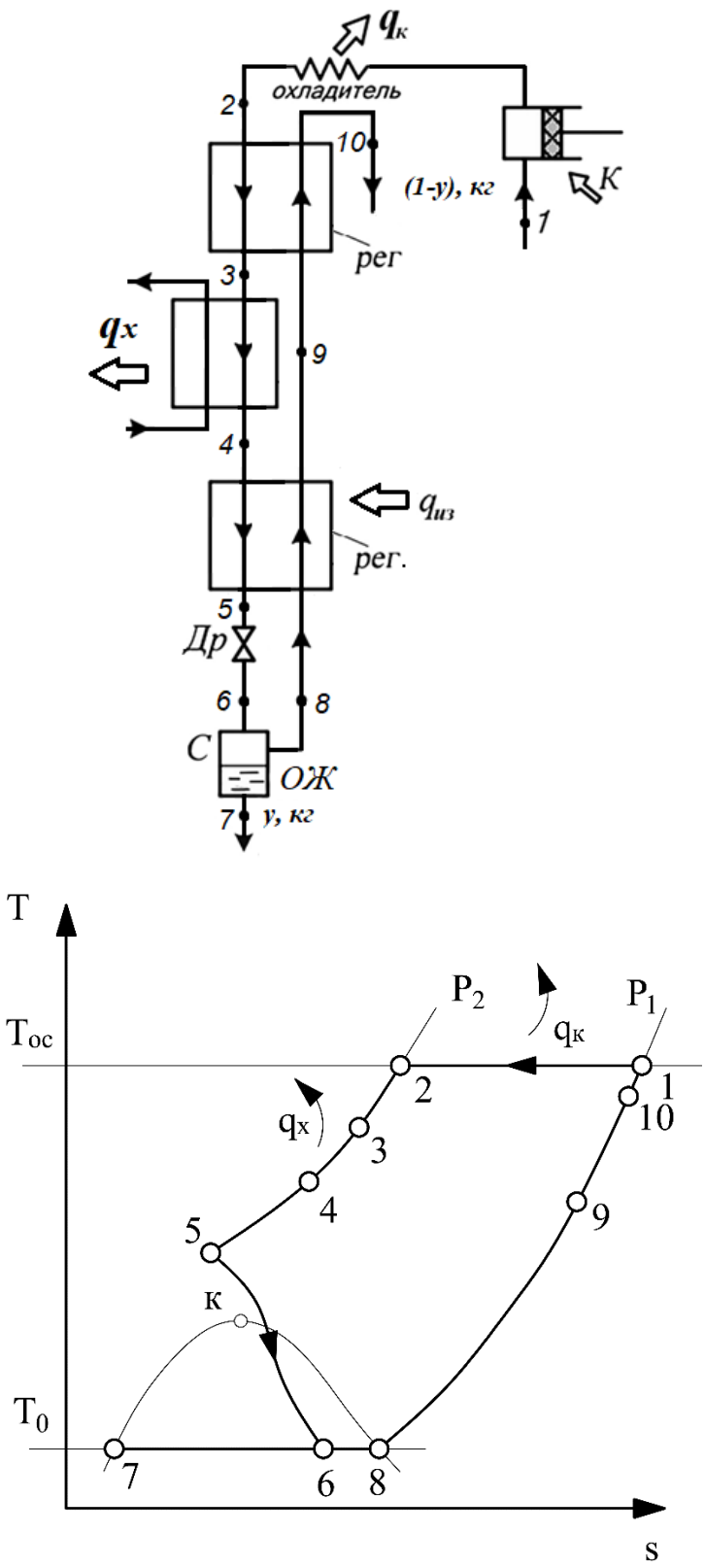


Рис. 6.1. Схема и цикл Линде

Установка работает следующим образом. Газ при температуре, близкой к температуре окружающей среды $T_{ос}$, и давлении P_1 поступает в компрессор, где его давление повышается до давления P_2 и охлаждается в холодильнике-охладителе до первоначальной температуры. При этом в окружающую среду отводится теплота $q_к$. На T, s-диаграмме процесс 1–2 сжатия

и охлаждения газа показан условно как изотермический. Далее газ проходит последовательно регенеративный теплообменник первой ступени (линия 2 – 3), где охлаждается обратным потоком, внешний теплообменный аппарат (линия 3 – 4), охлаждаемый каким-либо хладагентом и регенератор второй ступени (линия 4 – 5). Это позволяет охлаждать газы до более низких температур. После теплообменников газ подается к дроссельному вентилю, где происходит дросселирование по линии h = const до давления P_6, в результате чего получается смесь пара с жидкостью. Жидкость отделяется в сепараторе ОЖ и поступает потребителю в количестве *y* кг (точка 7), а газ, пройдя регенератор, выходит в количестве *(1-y)* кг (точка 10) [1].

Расчет в программе SMath

Постановка задачи. Рассчитать дроссельный ожижитель природного газа, работающий по схеме Линде с внешним охлаждением. Исходное давление газа P_1 = 0,1 МПа, температура T_1 = 293 К. Давление сжатого газа P_2 = 20 МПа, температура T_2 = 293 К. Разность температур недорекуперации $\Delta t_н = \Delta t_{2\text{-}10}$ = 5°С, теплоприток через изоляцию $q_{из}$ = 12,6 кДж/кг сжатого газа. Теплоприток внешнего охладителя 30 кДж/кг сжатого газа, холодильный коэффициент ε = 1,5. Изотермический и электромеханический КПД компрессора соответственно $\eta_{из_к}$ = 60% и $\eta_{эм_к}$ = 90%. Определить термодинамические свойства рабочего тела в ключевых точках процесса, используя пакет CoolProp. Построить цикл на T, s – диаграмме с помощью пакета «График».

Решение.

Работа с функциями пакета CoolProp

С учетом недорекуперацией холода определим параметры метана в точке 10 (формулы 6.1 – 6.3).

$$\Delta t_{2_10} := \Delta t_H = 5\ К \tag{6.1}$$

$$T_{10} := T_2 - \Delta t_{2_10} = 288\ К \tag{6.2}$$

$$P_{10} := P_1 = 0,1\ МПа \tag{6.3}$$

С помощью пакета CoolProp Wrapper по давлению "P" и температуре "T" определим значение удельной энтальпии h_{10} (формула 6.4).

$$h_{10} := \text{CoolProp_Props}\left("H"; "P"; P_{10}; "T"; T_{10}; "CH4"\right) = 887,4\ \frac{кДж}{кг} \tag{6.4}$$

Также определим значения удельных энтальпий и энтропий газа в точках 1 и 2 (формулы 6.5 – 6.8).

$$h_1 := \text{CoolProp_Props}\left("H"; "P"; P_1; "T"; T_1; "CH4"\right) = 898,5\ \frac{кДж}{кг} \tag{6.5}$$

$$h_2 := \text{CoolProp_Props}\left("H"; "P"; P_2; "T"; T_2; "CH4"\right) = 710,5\ \frac{кДж}{кг} \tag{6.6}$$

$$s_1 := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "P"; P_1; "T"; T_1; "CH4"\right) = 6,6\ \frac{кДж}{кг\ К} \tag{6.7}$$

$$s_2 := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "P"; P_2; "T"; T_2; "CH4"\right) = 3,4\ \frac{кДж}{кг\ К} \tag{6.8}$$

Величина изотермического дроссель-эффекта определяется по формуле 6.9.

$$\Delta h_T := h_1 - h_2 = 188 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (6.9)$$

Потеря холода с недорекуперцией определяется по формуле 6.10.

$$\Delta h_H := h_1 - h_{10} = 11,1 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (6.10)$$

Примем значения удельной энтальпии и энтропии в точке ожижения газа (формуляция 6.11).

$$h_7 := 0 \ \frac{кДж}{кг} \qquad s_7 := 0 \ \frac{кДж}{кг\ К} \qquad (6.11)$$

Разность удельных значений энтальпии газа в начальном и сжиженном состоянии (формулы 6.12 и 6.13).

$$\Delta h_{1_7} := h_1 - h_7 = 898,5 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (6.12)$$

$$\Delta h_{ож} := \Delta h_{1_7} = 898,5 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (6.13)$$

Доля сжиженного газа, полученного из 1 кг сжатого, определяется по формуле 6.14.

$$y := \frac{\Delta h_T - \Delta h_H - q_{из} + q_x}{\Delta h_{ож} - \Delta h_H} = 0,219 \qquad (6.14)$$

Определим параметры метана в точке 8 (формулы 6.15 – 6.17).

$$P_8 := P_1 = 0,1 \ МПа \qquad (6.15)$$

$$T_8 := \text{CoolProp_Props}\left("T"; "P"; P_8; "Q"; 1; "CH4"\right) = 111,5 \ К \qquad (6.16)$$

$$h_8 := \text{CoolProp_Props}\left("H"; "P"; P_8; "Q"; 1; "CH4"\right) = 510,6 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (6.17)$$

где Q – степень сухости, обозначаемая в пакете CoolProp.

Здесь определяется температура $"T"$ и энтальпия $"H"$ по давлению $"P"$, в частности по P_8 и степени сухости $"Q"$, равной 1 (насыщенный пар; это значение можно задавать от 0 (жидкость на линии насыщения) до 1).

Параметры газа перед дросселированием находятся из уравнения теплового баланса определим по формулам 6.18 – 6.20.

$$\left(h_2 - h_5\right) + q_{из} - q_x = \left(1 - y\right) \cdot \left(h_{10} - h_8\right) \qquad (6.18)$$

$$h_5 := h_2 + q_{из} - \left(1 - y\right) \cdot \left(h_{10} - h_8\right) = 428,8 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (6.19)$$

$$T_5 := \text{CoolProp_Props}\left("T"; "P"; P_5; "H"; h_5; "CH4"\right) = 222,4 \ К \qquad (6.20)$$

Значения удельных энтальпий в начале и в конце охлаждения в дополнительном внешнем теплообменнике (формулы 6.21 и 6.22).

$$h_3 := \text{CoolProp_Props}\left("H"; "P"; P_3; "T"; T_3; "CH4"\right) \quad (6.21)$$

$$h_4 := h_3 - q_x = 512{,}5 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.22)$$

Значение удельной работы, затраченной во внешней холодильной установке (формула 6.23).

$$l_x := \varepsilon \cdot q_x = 45 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.23)$$

Удельный расход электроэнергии на получение 1 кг сжиженного газа (формула 6.24).

$$N_{y1} := \frac{R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_{2сж}}{p_{1исх}}\right)}{y \cdot \eta_{из_к} \cdot \eta_{эм_к}} + l_x = 6850{,}5 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.24)$$

где R – индивидуальная газовая постоянная метана, равная 0,518 кДж/кг·К

Удельная эксергия сжиженного газа (формула 6.25).

$$e_7 := h_7 - h_{oc} - T_{oc} \cdot \left(s_7 - s_{oc}\right) = 1047{,}8 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.25)$$

где $h_{oc} := h_1$ и $s_{oc} := s_1$

Значение удельной эксергии определяем по e, h – диаграмме [2] (формула 6.26).

$$e_2 := 810 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.26)$$

Работа, затраченная в компрессоре на сжатие 1 кг газа определяется по формуле 6.27.

$$l_к := \frac{e_2}{\eta_{из_к}} = 1350 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.27)$$

Удельный расход электроэнергии на получение 1 кг сжиженного газа определяется по формуле 6.28.

$$N_{y3} := \frac{e_2}{y \cdot \eta_{из_к} \cdot \eta_{эм_к}} = 6851 \ \frac{кДж}{кг} \quad (6.28)$$

что практически совпадает с рассчитанным ранее.

Эксергетический КПД установки (формула 6.29).

$$\eta_e := \frac{e_7}{N_{y3}} = 15{,}3 \ \% \quad (6.29)$$

Определим параметры метана в недостающих точках цикла с помощью пакета CoolProp (полный расчет см. на расчетном сервере [3]).

Данные для построения диаграммы

Для построения T, s-диаграммы сначала необходимо определить температуры метана в критической и тройной точках. Для этого воспользуемся нашей пользовательской функцией *Prps* с такими первыми аргументами как *"Tcrit"* и *"Ttriple"* (формулы 6.30 и 6.31).

$$T_{Cr} := \text{CoolProp_Props}\left("\text{Tcrit}"; ""; 0; ""; 1; "\text{CH4}"\right) = 190{,}6\ \text{К} \qquad (6.30)$$

$$T_{Tr} := \text{CoolProp_Props}\left("\text{Ttriple}"; ""; 0; ""; 0; "\text{CH4}"\right) = 90{,}7\ \text{К} \qquad (6.31)$$

Эти температуры также можно найти в сайте coolprop.org в разделе свойств метана [4].

Необходимо также задать количество n точек (элементов) вектора TT_{sat} значений температур и диапазон итераций для построения кривых на диаграмме (см. формуляцию 3.28 в главе 3). Встроенный оператор «Диапазон с указанием второго значения» и оператор векторизации (с функцией применения данного действия к каждому элементу вектора) находятся в диалоговом окне «Матрицы» панели инструментов SMath (см. рис. 3.3 и 3.4 в главе 3).

Далее необходимо задать векторы удельных энтропий, по которым строятся линии насыщения (формулы 6.32 и 6.33 с оператором векторизации).

$$sV_{sat} := \overrightarrow{\text{CoolProp_Props}\left("\text{S}"; "\text{T}"; TT_{sat}; "\text{Q}"; 1; "\text{CH4}"\right)} \qquad (6.32)$$

$$sL_{sat} := \overrightarrow{\text{CoolProp_Props}\left("\text{S}"; "\text{T}"; TT_{sat}; "\text{Q}"; 0; "\text{CH4}"\right)} \qquad (6.33)$$

Чтобы кривые отобразились на диаграмме, необходимо воспользоваться встроенной функцией *augment* и оператором «Алгебраическая система» (см. рис. 3.5 в главе 3).

Итоговая система для построения кривых насыщения (saturation lines) будет выглядеть так (формуляция 6.34).

$$SL_{Ts} := \begin{cases} \text{augment}\left(\dfrac{sV_{sat}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \dfrac{TT_{sat}}{\text{К}} - 273{,}15; "."; 1; "\text{red}"\right) \\ \text{augment}\left(\dfrac{sL_{sat}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \dfrac{TT_{sat}}{\text{К}} - 273{,}15; "."; 1; "\text{blue}"\right) \end{cases} \qquad (6.34)$$

Внесем переменную «SL_{Ts}» в T, s-диаграмму (рис. 6.3).

Примечания: здесь ведется перевод в единицы измерения (кДж/кг К и °C), элемент построения линии (точка размером «1») и цвет линий (красный *"red"* и синий *"blue"*). Таким образом, получаем кривые насыщения, показанные на рис. 6.3.

Далее построим линии дроссельного цикла Линде с контуром предварительного охлаждения. Для этого необходимо построить соответствующие процессам диапазон давления, энтальпии, температуры и энтропии в теоретических точках процесса (формулы 6.35 – 6.37).

$$P_{12} := \left[P_1 ; P_1 - \frac{P_1 - P_2}{n} .. P_2 \right] \tag{6.35}$$

$$\overrightarrow{T_{12} := \text{CoolProp_Props}\left("T"; "P"; P_{12}; "S"; s_{12}; "CH4"\right)} \tag{6.36}$$

$$\overrightarrow{s_{12} := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "P"; P_{12}; "T"; T_1; "CH4"\right)} \tag{6.37}$$

Таким образом, процесс сжатия метана в компрессоре определяется по формуле 6.38.

$$l_{12,Ts} := \text{augment}\left(\frac{s_{12}}{\text{кДж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}} ; \frac{T_{12}}{\text{К}} - 273{,}15 \right) \tag{6.38}$$

Повторим вычисления для процесса дросселирования метана (формулы 6.39 – 6.42) и внесем новые функции в T, s-диаграмму (рис. 6.3).

$$P_{56} := \left[P_5 ; P_5 - \frac{P_5 - P_6}{n} .. P_6 \right] \tag{6.39}$$

$$\overrightarrow{T_{56} := \text{CoolProp_Props}\left("T"; "P"; P_{56}; "H"; h_5; "CH4"\right)} \tag{6.40}$$

$$\overrightarrow{s_{56} := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "P"; P_{56}; "H"; h_5; "CH4"\right)} \tag{6.41}$$

$$l_{56,Ts} := \text{augment}\left(\frac{s_{56}}{\text{кДж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}} ; \frac{T_{56}}{\text{К}} - 273{,}15 \right) \tag{6.42}$$

Для построения линий и характерных точек дроссельного цикла Линде воспользуемся функцией *augment* и оператором «Алгебраическая система» (формуляция 6.43). Важно, чтобы T и s-координаты были введены в тело функции таким образом, чтобы линия проходила последовательно все точки, не прерываясь: получение сжиженного газа (точки 6 и 7), испарение доли сжиженного газа (точки 6 и 8), нагрев в регенераторах (точки 8, 9 и 10), недорекуперация (точки 10 и 1), сжатие и охлаждение газа (точки 1 и 2), охлаждение в регенераторе первой ступени (точки 2 и 3), охлаждение в контуре предварительного охлаждения (точки 3 и 4), охлаждение в регенераторе второй ступени (точки 4 и 5) и дросселирование (точки 5 и 6).

$$Cycle_{Ts} := \text{augment}\left(\left[\begin{array}{c} \frac{s_7}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_6}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_8}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_{10}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_2}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_3}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_4}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \\ \frac{s_5}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} \end{array}\right]; \left[\begin{array}{c} \frac{T_7}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_6}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_8}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_{10}}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_3}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_4}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_5}{\text{К}} - 273{,}15 \end{array}\right]\right) \quad (6.43)$$

Полученную переменную $Cycle_{Ts}$ добавляем к диаграмме. Точки координат следует последовательно вводить в переменную $Points_{Ts}$ с соответствующим обозначением литеров размера 14 цвета "*black*" (формуляция 6.44).

$$Points_{Ts} := \left\{ \begin{array}{l} \text{augment}\left(\frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"1"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_2}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"2"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_3}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_3}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"3"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_4}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_4}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"4"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_5}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_5}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"5"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_6}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_6}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"6"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_7}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_7}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"7"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_8}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_8}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"8"}; 14; \text{"black"} \right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_{10}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}}; \frac{T_{10}}{\text{К}} - 273{,}15; \text{"10"}; 14; \text{"black"} \right) \end{array} \right. \quad (6.44)$$

Для построения графиков воспользуемся меню «Вставка» в панели инструментов пакета SMath и выберем в диалоговом окне «X-Y График» (рис. 6.2). В итоге всех построений получаем искомую T, s-диаграмму дроссельного цикла ожижения метана (рис. 6.3). Аргументы для построения графика см. на расчетном сервере [3].

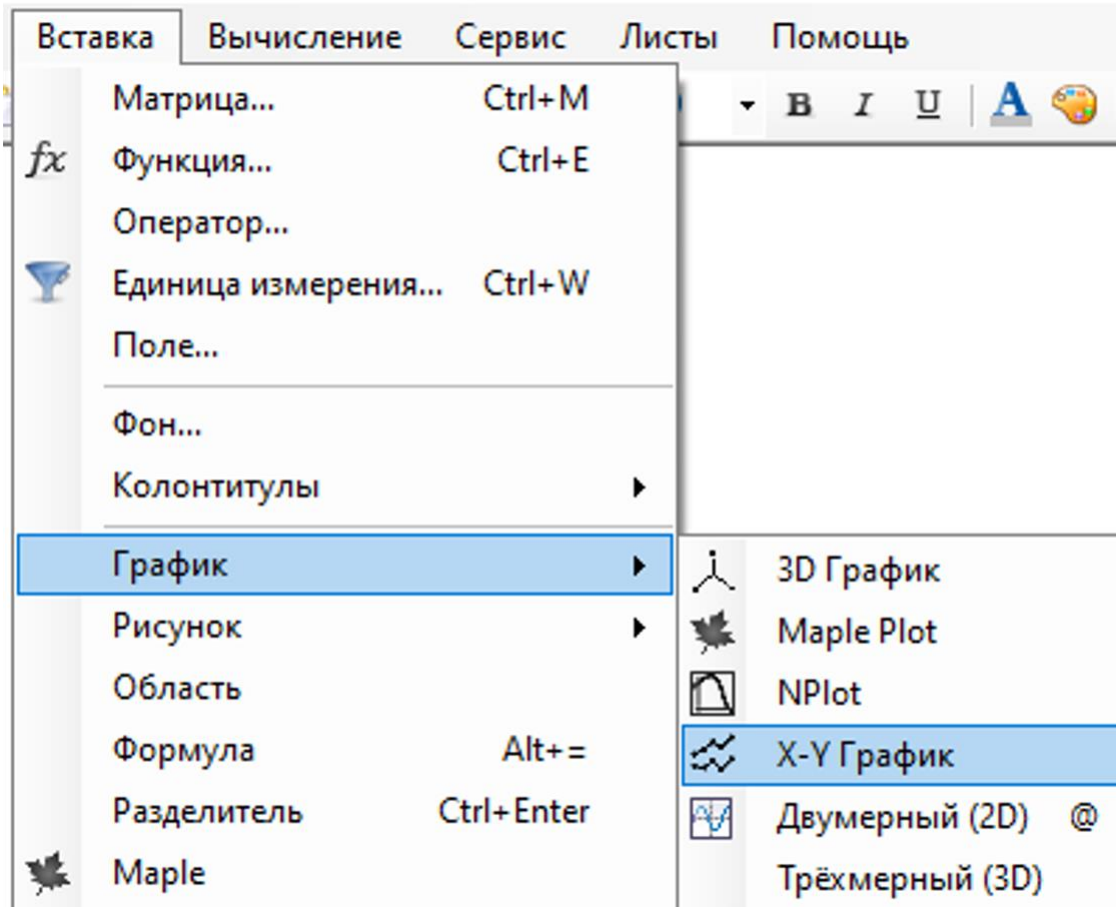


Рис. 6.2. Меню вставки графика

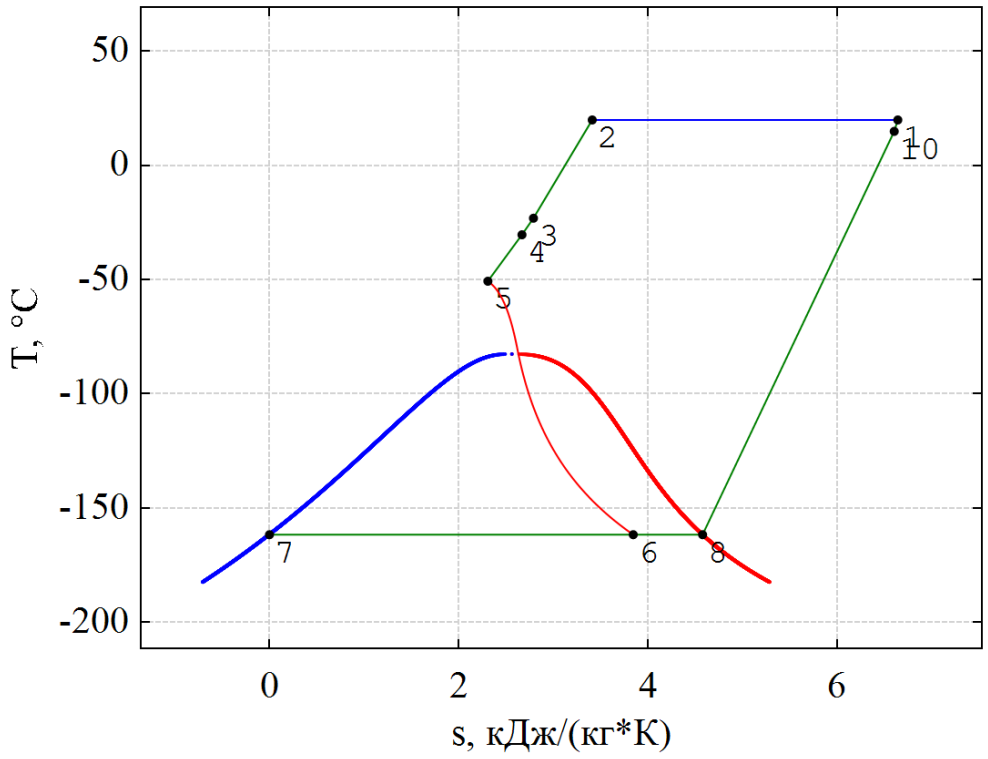


Рис. 6.3. T, s-диаграмма дроссельного цикла ожижения метана

Дивертисмент. Цифровой двойник пропана-бутана

При ожижении природного газа получаются побочные продукты, более тяжелые, чем метан (CH_4) углеводороды – пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}). Второй источник получения этого топлива – нефть и нефтяные попутные газы, которые часто, увы, просто сжигают.

Давайте решим такую задачу.

Новый пустой баллон емкостью 27 литров (переменная `V`) для хранения пропана-бутана поставили на весы и зафиксировали его массу в 14,5 кг (m_1 – см. начало расчета на рис. 6.4). Затем этот баллон заправили сжиженным газом так, что весы стали показывать 25 кг (m_2). Определить объемы и массы жидкой и газообразной частей (фаз) в баллоне, если температура баллона и газа в нем стала равной температуре окружающей среды 20°C (`T`). Массовая доля пропана равна 60% (переменная `Propane`), а бутана 40% (переменная `Butane`). Это соотношение бывает летним и зимним. Дело в том, что пропан намного дороже бутана и его экономят. Но зимой долю пропана в смеси приходится увеличивать, чтобы давление в баллоне оставалось достаточно высоким при низких температурах, газ "кипел" и сам без дополнительного насоса (турбины) поступал в горелки котлов и кухонных плит или в цилиндры автомобилей, многие из которых "ездят" на СПГ. Пропорция 60/40 зимняя. Летом долю пропана можно снизить до 40 и менее процентов.

$V := 27\ \mathrm{L}$ $m_1 := 14.5\ \mathrm{kg}$ $m_2 := 25\ \mathrm{kg}$ $T := 20\ ^\circ\mathrm{C}$ (1)

$m_{Air} := V \cdot \mathrm{CoolProp_Props}("D", "T", T, "P", 1\ \mathrm{atm}, "Air") = 32.52\ \mathrm{g}$ (2)

$m_1 := m_1 - m_{Air} = 14.47\ \mathrm{kg}$ $m := m_2 - m_1 = 10.53\ \mathrm{kg}$ (3)

$Propane := 60\ \%$ $Butane := 100\ \% - Propane = 40\ \%$ (4)

$Propane := \mathrm{num2str}(Propane, "n5") = "0.6"$ (5)

$Butane := \mathrm{num2str}(Butane, "n5") = "0.4"$ (6)

$Смесь := \mathrm{concat}("Propane", "[", Propane, "]\&Butane[", Butane, "]")$ (7)

$Смесь = "Propane[0.6]\&Butane[0.4]"$ (8)

$\mathrm{CoolProp_Props}("P", "T", T, "Q", 0, "Butane") = 2.049\ \mathrm{atm}$ (9)

$p := \mathrm{CoolProp_Props}("P", "T", T, "Q", 0, Смесь) = 5.615\ \mathrm{atm}$ (10)

$\mathrm{CoolProp_Props}("P", "T", T, "Q", 0, "Propane") = 8.255\ \mathrm{atm}$ (11)

$\rho_G := \mathrm{CoolProp_Props}("D", "T", T, "Q", 1, Смесь) = 8.624\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ (12)

$\rho_L := \mathrm{CoolProp_Props}("D", "T", T, "Q", 0, Смесь) = 536.7\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ (13)

$Q := \mathrm{solve}\left(\frac{Q \cdot m}{\rho_G} + \frac{(1 - Q) \cdot m}{\rho_L} = V, Q, 0, 1\right) = 6.137\ \%$ (14)

$m_G := m \cdot Q = 64.64\ \mathrm{g}$ $m_L := m \cdot (1 - Q) = 10.47\ \mathrm{kg}$ (15)

$V_G := \frac{m_G}{\rho_G} = 7.495\ \mathrm{L}$ $V_L := \frac{m_L}{\rho_L} = 19.51\ \mathrm{L}$ (16)

Рис. 6.4 Расчет смеси пропана и бутана

На рис. 6.4 показан ввод исходных данных (п. 1), расчет массы воздуха в пустом баллоне (п. 2) и массы баллона m с выкаченным из него воздухом (п. 3). Воздух в пустом баллоне можно и не учитывать, но почему бы это не сделать, если это так легко посчитать на компьютере.

В пункте 4 задаются массовые доли пропана и бутана в смеси, которые далее переводятся из чисел в строки (п.п. 5 и 6) и формируют строковую переменную *Смесь* (п.п. 7 и 8). Используется встроенные в SMath функции `num2str` (перевод числа в строку) и `concat` (сцепление строк, включая квадратные скобки и знак &). Далее (п.п. 9, 10 и 11) рассчитываются давления насыщения (упругость) чистого бутана (п. 9), смеси 60/40 (п. 10) и чистого пропана (п. 11). Видно, что упругость пропана выше. Поэтому-то его и больше в зимней смеси. Используется единица давления атмосфера физическая (760 мм ртутного столба), а не мегапаскали, чтобы сразу было видно, насколько давление в баллоне превышает атмосферное. Давление, полученное в расчете, естественно абсолютное, а не избыточное, какое бы показал манометр, установленный на баллоне. К показанию такого манометра нужно прибавить значение атмосферного давления, считанного с барометра.

В п. 12 и п. 13 рассчитываются плотности газа и жидкости пропан-бутановой смеси в нашем баллоне. Далее решается уравнение материального баланса (п. 14), по которому определяется массовая доля Q газа в баллоне (выведено в промилле) и массы газа и жидкости (п. 15).

Если же температуру сделать равной не 20, а минус 25°C, то пропан закипит при 2.008 атм, а бутан при 0,3544 атм, то есть при давлении, ниже атмосферного. Поэтому-то, повторяем, долю бутана в зимней смеси уменьшают, обогащая его более дорогим пропаном.

Здесь, конечно, нужно, как и в случае со смесью этанола с водой (см. рис. 4.13 в главе 4), проверить, правильные ли значения плотности выдают функции на рис. 6.4. В интернете, где продублированы данные из бумажных справочников, есть много таких таблиц и графиков. Пара из них из них показана на рис. 6.5. Таблица плотности (рис. 6.5a) окружена расчетными данными. Легко заметить несовпадения в "угловых" данных (чистый пропан или чистый бутан). Данные из таблицы даны в скобках. Не такое существенное (кричащее), какое мы видели на рис. 4.13 в главе 4, но опять же несовпадение. В центре таблицы (смесь) можно также увидеть несовпадение плотностей: согласно расчету на рис. 6.4 плотность жидкой смеси пропана с бутаном в соотношении 60/40 при 20°C равна 0.5367, а согласно таблице на рис. рис. 6.5a – 0.529 тонн на метр кубический. Правда, настораживает тот факт, что в таблице на рис. 5.6 в отличие от таблицы на рис. 4.18 в главе 4 не указано явно, о какой доле идет речь – о массовой (весовой), объемной или молярной. Не прописано также, что речь идет о плотности именно жидкой фазы – см. нуль, какой задается для параметра "Q" у функций с именем ρ на рис. 6.4 и 6.5a. Такое умолчание – беда многих подобных таблиц и бумажных, и интернетовских.

Из графика (рис. 6.5b) видно, что данные по давлению насыщения (упругости паров) более-менее совпадают для бутана. В случае с пропаном наблюдается довольно существенное несовпадение. На рис. (рис. 6.5a) всё наоборот.

Отсюда вывод, который прописан в названии четвертой главы этого учебного пособия – доверяй, но проверяй. Кстати, на сайте пакета CoolProp Wrapper в инструкциях «мелким шрифтом» написано, что со смесями жидкостей нужно работать очень осторожно, так как часто выдается неправильный результат. Но кто из нас читает инструкции!? Повторяем, бесплатный сыр бывает только в мышеловке. А пакет CoolProp – это бесплатный несертифицированный пакет. Сертифицированный пакет – это WaterSteamPro, о котором говорилось в главе 1 этого раздела учебного пособия. Но там, увы, пока нет данных по

пропану, бутану и другим подобным жидкостям и газам. Авторы постараются в будущем восполнить этот пробел.

$$\rho_P(T) := \text{CoolProp_Props}(\text{"D"}, \text{"T"}, T, \text{"Q"}, 0, \text{"Propane"})$$

$$\rho_P((-25)\ °C) = 0.5606\ \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} \quad (0.559) \qquad \rho_P(0\ °C) = 0.5286\ \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} \quad (0.528) \qquad \rho_P(25\ °C) = 0.4924\ \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} \quad (0.490)$$

Зависимость плотности пропан-бутановой смеси от ее состава и температуры

Таблица плотностей сжиженной пропан-бутановой смеси (в т/м³) в зависимости от ее состава и температуры

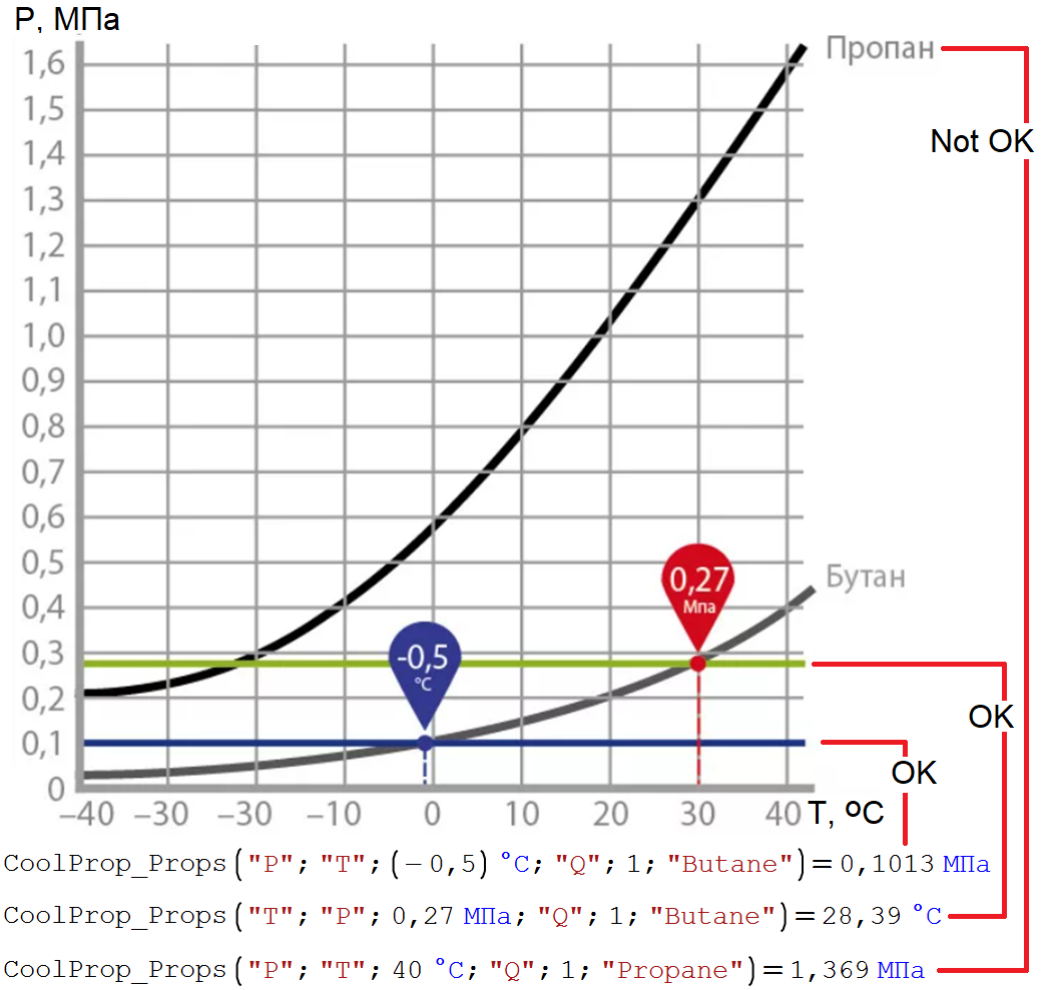
T, °C / P/B, %	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
100/0	0,559	0,553	0,548	0,542	0,535	0,528	0,521	0,514	0,507	0,499	0,490
90/10	0,565	0,559	0,554	0,548	0,542	0,535	0,528	0,521	0,514	0,506	0,498
80/20	0,571	0,565	0,561	0,555	0,548	0,541	0,535	0,528	0,521	0,514	0,505
70/30	0,577	0,572	0,567	0,561	0,555	0,548	0,542	0,535	0,529	0,521	0,513
60/40	0,583	0,577	0,572	0,567	0,561	0,555	0,549	0,542	0,536	0,529	0,521
50/50	0,589	0,584	0,579	0,574	0,568	0,564	0,556	0,549	0,543	0,536	0,529
40/60	0,595	0,590	0,586	0,579	0,575	0,568	0,562	0,555	0,550	0,543	0,536
30/70	0,601	0,596	0,592	0,586	0,581	0,575	0,569	0,562	0,557	0,551	0,544
20/80	0,607	0,603	0,598	0,592	0,588	0,582	0,576	0,569	0,565	0,558	0,552
10/90	0,613	0,609	0,605	0,599	0,594	0,588	0,583	0,576	0,572	0,566	0,559
0/100	0,619	0,615	0,611	0,605	0,601	0,595	0,590	0,583	0,579	0,573	0,567

T — температура газовой смеси (среднесуточная температура воздуха); P/B — соотношение пропана и бутана в смеси, %

$$\rho_B(T) := \text{CoolProp_Props}(\text{"D"}, \text{"T"}, T, \text{"Q"}, 0, \text{"Butane"})$$

$$\rho_B((-25)\ °C) = 0.6268\ \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} \quad (0.619) \qquad \rho_B(0\ °C) = 0.6007\ \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} \quad (0.595) \qquad \rho_B(25\ °C) = 0.5728\ \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} \quad (0.567)$$

a)



b)

Рис. 6.5 Сравнение табличных и расчетных данных по пропану и бутану: a) плотность, b) упругость паров

Отличия в табличных и расчётных данных у бутана (см. нижнюю часть рис. 6.5a.) можно объяснить и тем, что у этого углеводорода есть изомеры: н-бутан (нормальный бутан) и изобутан. У прорана же изомеров нет – см. верхнюю часть рис. 6.5a.

Отметим, что НИСТ, который упоминался во второй главе книги, начинал свою работу с такой задачи. По трубам перекачивается природный газ или газ, полученный в результате газификации угля. Параметры такого газа разные на концах трубопровода. Как рассчитываться при этом покупателю газа с его продавцом?! Эту задачу не решить без знания теплофизических свойств газа. Чем и стал заниматься НИСТ с момента его создания в 1901 году. Поэтому-то НИСТ относится к департаменту торговли, а не к какому-то другому ведомству США.

Задание читателям

1. Рассчитать схему дроссельной установки Линде с предварительным хладоновым охлаждением для ожижения воздуха на следующие условия: начальные параметры воздуха p_1 = 0,1 МПа и T_1 = 293 К; параметры сжатого воздуха p_2 = 20,0 МПа и T_2 = 293 К; разность температур ΔT = 5 °С; теплоприток через изоляцию $q_{из}$ = 12,6 кДж/кг сжатого воздуха. Холодильный коэффициент хладоновой установки ε = 2; в ее испарителе воздух охлаждается с T_2', = 255 К до T_2'' = 220 К. Изотермический и электромеханический КПД компрессора $\eta_{из_к}$ = 0,6 и $\eta_{эм_к}$ = 0,9. Определить параметры в характерных точках процесса помощью пакета CoolProp, долю ожижаемого воздуха, удельный расход электроэнергии и эксергетический КПД установки. Построить процесс сжижения на T, s и h, s-диаграммах.
2. Определить эксергетический КПД установки Линде, если доля ожижаемого пропана составляет y = 6%. Параметры пропана перед компрессором P_1 = 0,1 МПа и T_1 = 293 К. Параметры сжатого пропана P_2 = 16,0 МПа и T_2 = 293 К. КПД компрессора: $\eta_{из_к}$ = 60%, $\eta_{эм_к}$ = 95%
3. Построить процесс ожижения метана на h, s-диаграмме, используя оператор «График» в панели инструментов пакета SMath.
4. Рассчитать дроссельный цикл Линде ожижения метана без предварительного охлаждения во внешнем теплообменнике (рис. 6.4) и сравнить с циклом, разобранным в настоящей главе. Определить параметры в характерных точках процесса помощью пакета CoolProp, долю сжижаемого воздуха, удельный расход электроэнергии и эксергетический КПД установки. Построить процесс сжижения на T, s-диаграмме.

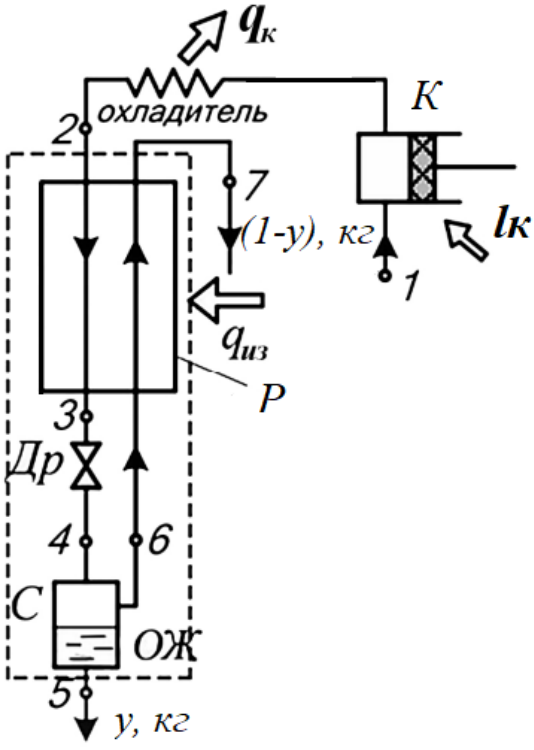


Рис. 6.4. Схема установки, работающей по ожижительному циклу Линде: К – компрессор, Р – регенератор, Др – дроссель, ОЖ – отделитель жидкости

Литература

1. Технологические энергоносители и энергосистемы предприятий: учебник / Н.В. Калинин, Н.А. Логинова, Е.В. Жигулина и др. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 344 с.
2. Мартынов А. В. Установки для трансформации тепла и охлаждения: Сборник задач: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 200 с.; ил.
3. http://www.twt.mpei.ac.ru/TTHB/Martynov/Methane-Liquid.sm
4. http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/Methane.html

Глава 7 Расчет парокомпрессионной холодильной установки (написано совместно с Е.А. Шелгинским)

Произведем расчет аммиачной одноступенчатой холодильной установки при заданных условиях. Задача основана на примере 2.3. из [1].

Исходные данные для задачи показаны на рисунке 7.1.

Рассчитать схему аммиачной одноступенчатой компрессионной холодильной установки для следующих условий:

Холодопроизводительность установки: $Qи := 17,45$ кВт

Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор (точка В2): $Tв2 := 20$ °C

Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора (точка В2): $Tв1 := 25$ °C

Температура хладоносителя на входе в испаритель (точка Н1): $Tн1 := (-15)$ °C

Температура хладоносителя на выходе из испарителя (точка Н2): $Tн2 := (-22)$ °C

В качестве хладносителя примем вещество - воздух

Зададимся давлением воды в конденсаторе: $Pв := 0,5$ МПа

Температура окружающей среды. Примем: $Tос := 20$ °C

Зададимся давлением воздуха в испарителе: $Pн := 1$ МПа

Внутренний относительный КПД компрессора: $\eta_{oi} := 80$ %

Электромеханический КПД компрессора: $\eta_{эм} := 90$ %

КПД электродвигателя компрессорного агрегата: $\eta_{эд} := 80$ %

Рис. 7.1. Исходные данные задачи

Схема холодильной установки показана на рисунке 7.2.

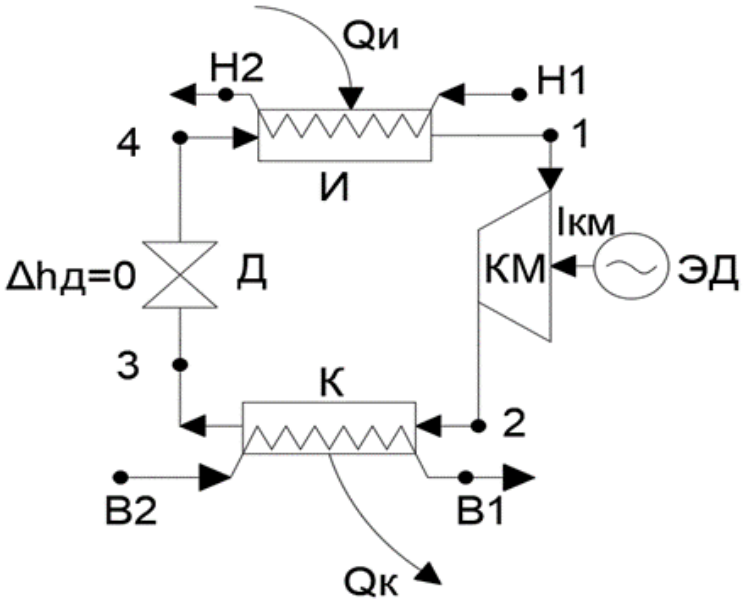


Рис. 7.2. Схема компрессионной холодильной машины,

где К – конденсатор; И – испаритель; Д – дроссель; ЭД – электродвигатель; lкм – работа компрессора; Qи – теплота, воспринятая аммиаком в испарителе; Qк – теплота, отведенная в конденсаторе к воздуху; В – охлаждающая вода в конденсаторе; Н – воздух.

Зададимся разностью температур между теплоносителями в конденсаторе и испарителе (см. рис. 7.3).

Зададимся минимальной разностью температур в испарителе для определения температуры испарения аммиака в испарителе:

$$\Delta Tи := 3\ К$$

Зададимся разностью температур между температурой конденсации аммиака и между температурой воды на выходе из конденсатора для определения температуры конденсации аммиака в конденсатор:.

$$\Delta Tк := 10\ К$$

Рис. 7.3. Минимальная разность температур в конденсаторе и испарителе

7.1. Определение ТФС веществ в характерных точках установки

Определение ТФС веществ в каждой точке схемы показаны на рисунках 7.4 - 7.6.

Температура испарения аммиака: $Tи := Tн2 - \Delta Tи = 248{,}15\ К$

Температура конденсации аммиака: $Tк := Tв2 + \Delta Tк = 303{,}15\ К$

ТОЧКА В2

Энтальпия воды в данной точке:

$$hв2 := \text{CoolProp_Props}("H"; "P"; Pв; "T"; Tв2; "water") = 84{,}3824\ \frac{кДж}{кг}$$

Проверим агрегатное состояние воды в данной точке:

$$Phaseв2 := \text{CoolProp_Props}("Phase"; "P"; Pв; "T"; Tв2; "water") = 0$$ Жидкость

ТОЧКА В1

Энтальпия воды в данной точке:

$$hв1 := \text{CoolProp_Props}("H"; "P"; Pв; "T"; Tв1; "water") = 105{,}2892\ \frac{кДж}{кг}$$

Проверим агрегатное состояние воды в данной точке:

$$Phaseв1 := \text{CoolProp_Props}("Phase"; "P"; Pв; "T"; Tв1; "water") = 0$$ Жидкость

ТОЧКА Н1

Энтальпия воздуха в данной точке:

$$hн1 := \text{CoolProp_Props}("H"; "P"; Pн; "T"; Tн1; "Air") = 381{,}4671\ \frac{кДж}{кг}$$

Проверим агрегатное состояние воздуха в данной точке:

$$Phaseн1 := \text{CoolProp_Props}("Phase"; "P"; Pн; "T"; Tн1; "Air") = 2$$ Газ

ТОЧКА Н2

Энтальпия воздуха в данной точке:

$$hн2 := \text{CoolProp_Props}("H"; "P"; Pн; "T"; Tн2; "Air") = 374{,}2779\ \frac{кДж}{кг}$$

Проверим агрегатное состояние воздуха в данной точке:

$$Phaseн2 := \text{CoolProp_Props}("Phase"; "P"; Pн; "T"; Tн2; "Air") = 2$$ Газ

Рис. 7.4. Расчет ТФС веществ в точках В2, В1, Н1, Н2 установки

ТОЧКА 3

Температура конденсации аммиака: $Тк := Тв2 + \Delta Тк = 303,15$ К

Энтальпия аммиака в данной точке:

$h3 := \text{CoolProp_Props}("H"; "Q"; 0; "T"; Тк; "ammonia") = 487,2476 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Энтропия аммиака в данной точке:

$S3 := \text{CoolProp_Props}("S"; "Q"; 0; "T"; Тк; "ammonia") = 1,9709 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$

Давление аммиака в данной точке:

$P3 := \text{CoolProp_Props}("P"; "Q"; 1; "T"; Тк; "ammonia") = 1,1665$ МПа

ТОЧКА 1

Температура испарения аммиака: $Ти := Тн2 - \Delta Ти = 248,15$ К

Энтальпия аммиака в данной точке:

$h1 := \text{CoolProp_Props}("H"; "Q"; 1; "T"; Ти; "ammonia") = 1576,1814 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Энтропия аммиака в данной точке:

$S1 := \text{CoolProp_Props}("S"; "Q"; 1; "T"; Ти; "ammonia") = 6,4656 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$

Давление аммиака в данной точке:

$P1 := \text{CoolProp_Props}("P"; "Q"; 1; "T"; Ти; "ammonia") = 0,1514$ МПа

Рис. 7.5. Расчет ТФС веществ в точках 3 и 1 установки

ТОЧКА 4

Температура испарения аммиака: $Tи := Tн2 - \Delta Tи = 248,15$ К

Энтальпия аммиака в данной точке:

$h4 := h3 = 487,2476 \frac{кДж}{кг}$

Энтальпия аммиака на линии насыщения при степени сухости "0":

$hи0 := CoolProp_Props("H"; "Q"; 0; "T"; Tи; "ammonia") = 231,7108 \frac{кДж}{кг}$

Степень сухости после дросселирования (точка 4): $qи4 := \frac{h4 - hи0}{h1 - hи0} = 0,1901$

Энтропия аммиака в точке 4:

$S4 := CoolProp_Props("S"; "Q"; qи4; "T"; Tи; "ammonia") = 2,0774 \frac{кДж}{кг\ К}$

Давление аммиака в данной точке:

$P4 := CoolProp_Props("P"; "Q"; 0; "T"; Tи; "ammonia") = 0,1514$ МПа

ТОЧКА 2и и 2

ТОЧКА 2и

Давление аммиака в данной точке: $P2и := P3 = 1,1665$ МПа

Энтропия аммиака в точке 2и: $S2и := S1 = 6,4656 \frac{кДж}{кг\ К}$

Энтальпия аммиака в точке 2и:

$h2и := CoolProp_Props("H"; "P"; P2и; "S"; S2и; "ammonia") = 1880,1934 \frac{кДж}{кг}$

Температура аммиака в точке 2и:

$T2и := CoolProp_Props("T"; "H"; h2и; "P"; P2и; "ammonia") = 395,6927$ К

ТОЧКА 2

Энтальпия аммиака в точке 2: $h2 := h1 + \frac{(h2и - h1)}{\eta_{oi}} = 1956,1965 \frac{кДж}{кг}$

Давление аммиака в данной точке: $P2 := P3 = 1,1665$ МПа

Температура аммиака в точке 2:

$T2 := CoolProp_Props("T"; "H"; h2; "P"; P2; "ammonia") = 426,422$ К

Энтропия аммиака в точке 2:

$S2 := CoolProp_Props("S"; "T"; T2; "P"; P2; "ammonia") = 6,6506 \frac{кДж}{кг\ К}$

Рис. 7.6. Расчет ТФС веществ в точках 4, 2и, 2 установки

7.2. Расчет испарителя и конденсатора

Расчеты испарителя и конденсатора продемонстрированы на рисунке 7.7.

Испаритель

Холодопроизводительность установки: $Qи := 17,45$ кВт

Расход аммиака в установке равен: $G_{NH3} := \frac{Qи}{(h1 - h4)} = 0,016 \frac{кг}{с}$

Расход воздуха в установке равен: $G_{air} := \frac{Qи}{(hн1 - hн2)} = 2,4273 \frac{кг}{с}$

Конденсатор

Тепловая мощность, переданная в конденсаторе от аммиака:

$Q_к := G_{NH3} \cdot (h2 - h3) = 23,5397$ кВт

Расход воды будет равен: $G_{water} := \frac{Q_к}{(hв1 - hв2)} = 1,1259 \frac{кг}{с}$

Температура конденсации аммиака: $Tк := Tв2 + \Delta Tк = 303,15$ К

Рис. 7.7. Расчет теплоэнергетических параметров испарителя и конденсатора.

7.3. Расчет компрессора

Расчет компрессора приведен на рисунках 7.8 - 7.10.

Компрессор

Внутренняя работа компрессора: $lвк := h2 - h1 = 380,0151 \frac{кДж}{кг}$

Проверка сходимости теплового баланса установки:

$Qприход = Qуход$

$Qприход := lвк + (h1 - h4) = 1468,9489 \frac{кДж}{кг}$

$Qуход := h2 - h3 = 1468,9489 \frac{кДж}{кг}$

Рис. 7.8. Расчет теплоэнергетических параметров компрессора

Определим объемную производительность компрессора:

Плотность аммиака на входе в компрессор (точка 1):

$$DNH31 := \text{CoolProp_Props}("D"; "P"; P1; "H"; h1; "ammonia") = 1{,}2961 \ \frac{кг}{м^3}$$

Производительность компрессора: $Vк := \left(\frac{G_{NH3}}{DNH31}\right) = 0{,}0124 \ \frac{м^3}{с}$

$G_{NH3} = 0{,}016 \ \frac{кг}{с}$

В минутах и в часах: $Vк = 0{,}7419 \ \frac{м^3}{мин}$ $Vк = 44{,}5113 \ \frac{м^3}{ч}$

Удельная работа компрессорного агрегата: $lк := \frac{lвк}{\eta_{эд} \cdot \eta_{эм}} = 527{,}7988 \ \frac{кДж}{кг}$

Потребляемая электрическая мощность компрессора: $Nк := lк \cdot G_{NH3} = 8{,}4579 \ кВт$

Удельный расход электроэнергии на единицу выработанного холода:

$$Эх := \frac{lк}{(h1 - h4)} = 0{,}4847$$

Холодильный коэффициент установки: $Eуст := \frac{(h1 - h4)}{lк} = 2{,}0632$

Средняя температура хладоносителя: $Tнср := \frac{Tн1 - Tн2}{\ln\left(\frac{Tн1}{Tн2}\right)} = 254{,}634 \ К$

Коэффициент работоспособности холода: $\tau qн := 1 - \left(\frac{Tос}{Tнср}\right) = -0{,}1513$

Удельный расход электроэнергии при идеальном цикле данной установки:

$$(Эн \equiv -\tau qн) \equiv 0{,}1513$$

$$Эн := |\tau qн| = 0{,}1513$$

Рис. 7.9. Расчет теплоэнергетических параметров компрессора

КПД холодильной установки с учетом потерь эксергии в испарителе (по хладоносителю):

$$\eta устхл := \frac{Qи \cdot Эн}{Nк} = 31,2075\ \%$$

Коэффициент работоспособности холода (по хладагенту):

$$\tau qNH3 := 1 - \left(\frac{Tос}{Tи}\right) = -0,1813$$

КПД холодильной установки с учетом потерь эксергии в испарителе (по хладагенту):

$$\eta устхд := \frac{Qи \cdot |\tau qNH3|}{Nк} = 37,4138\ \%$$

Рис. 7.10. Расчет теплоэнергетических параметров компрессора

7.4. Расчет процессов установки на *T, s*-диаграмме

Как и в предыдущих пунктах, построение начнем с линий насыщения.

Определение параметров аммиака в критической точке и в тройной точке показано на рисунке 7.11.

Критическая точка

Температура: `Tcrit := CoolProp_Props("Tcrit"; ""; 0; ""; 0; "ammonia") = 405,4 К`

Давление: `Pcrit := CoolProp_Props("Pcrit"; ""; 0; ""; 0; "ammonia") = 11,333 МПа`

Энтальпия: `Hcrit := CoolProp_Props("H"; "P"; Pcrit; "T"; Tcrit; "ammonia")`

Энтропия: `Scrit := CoolProp_Props("S"; "P"; Pcrit; "T"; Tcrit; "ammonia")`

Тройная точка

Температура: `Ttriple := CoolProp_Props("Ttriple"; ""; 0; ""; 0; "ammonia") = 195,495 К`

Энтальпия: `Hcrit := CoolProp_Props("H"; "P"; Pcrit; "T"; Tcrit; "ammonia")`

Энтропия: `Scrit := CoolProp_Props("S"; "P"; Pcrit; "T"; Tcrit; "ammonia")`

options.p is not valid in saturation_T_pure_1D_P for T = 405.4 : PropsSI("S","P",11333000,"T",405.4,"ammonia")

Рис. 7.11. Расчет тривиальных параметров аммиака

В отличие от расчета параметров изобутана, при расчете удельной энтальпии и энтропии аммиака возникает ошибка. Для аммиака данные параметры программа CoolProp Wrapper не может рассчитать и выдается ошибка.

Построение линий насыщений показано на рисунке 7.12.

Линия насыщения при степени сухости 0

Интервал температур построения: $TTsat := [Ttriple .. Tcrit]$

Энтропия аммиака при различных температурах и степени сухости 0:

$$\overrightarrow{Ssat0 := \text{CoolProp_Props}("S"; "Q"; 0; "T"; TTsat; "ammonia")}$$

Зададим координаты: $SSsat0 := \text{augment}\left(\frac{Ssat0}{\text{кДж К}^{-1}}; \frac{TTsat}{\text{К}}\right)$

Линия насыщения при степени сухости 1

Энтропия аммиака при различных температурах и степени сухости 1:

$$\overrightarrow{Ssat1 := \text{CoolProp_Props}("S"; "Q"; 1; "T"; TTsat; "ammonia")}$$

Зададим координаты: $SSsat1 := \text{augment}\left(\frac{Ssat1}{\text{кДж К}^{-1}}; \frac{TTsat}{\text{К}}\right)$

Рис. 7.12. Построение линий насыщения аммиака

Произведем расчет линий охлаждения и конденсации в конденсаторе (процесс 2 – 3).

Зададим интервал температур и определим значения энтропии (см. рис. 7.13).

Температура в начале охлаждения (точка 2): $T2 = 426,422$ К

Температура в конце конденсатора и в начале конденсации: $Tк = 303,15$ К

Давление в конденсаторе: $P2 = 1,1665$ МПа

Интервал температур в конденсаторе: $TT23 := [T2 .. Tк]$

Значения энтропии в процессе 2 - 3:

```
S23 := CoolProp_Props("S"; "P"; P2; "T"; TT23; "ammonia")
```

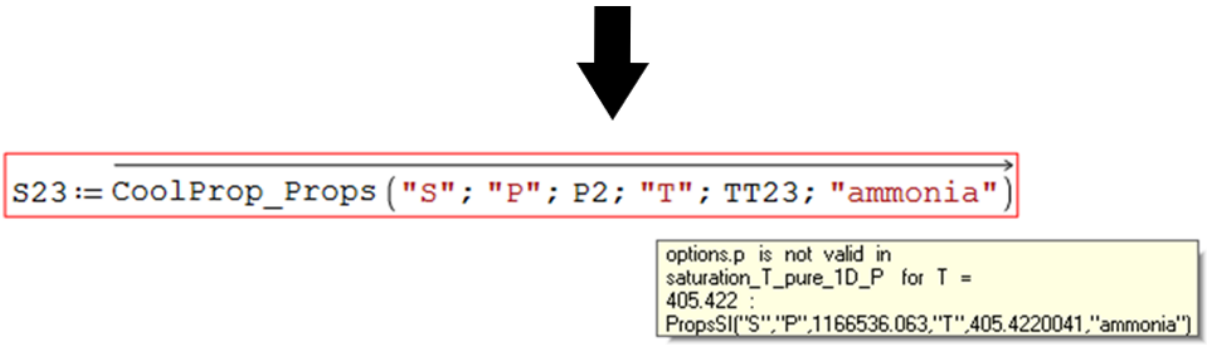


Рис. 7.13. Расчет энтропии в конденсаторе через интервал температуры

Энтропию в процессе 2-3 по постоянному давлению и заданному интервалу температур не считает, выдавая ошибку.

Расчет производится до температуры 405.4220041 К и далее расчет не производится. Значение температуры совпадает со значением критической температуры аммиака.

Произведем расчет плотности аммиака в процессе 2-3. См. рис. 7.14.

Значения плотности в процессе 2 - 3:

```
D23 := CoolProp_Props("D"; "P"; P2; "T"; TT23; "ammonia")
```

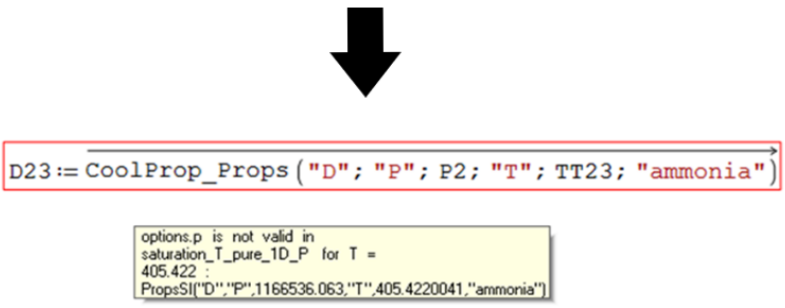


Рис. 7.14. Ошибка при определении плотности аммиака

Создадим искусственный разрыв на линии, где не производится расчет для демонстрации данного места на диаграмме. Примем (+/-) 10 К от значения температуры, выдающей ошибку. См. рис. 7.15.

$$Тк` := 405,4220041\ К + 10\ К$$

Интервал температур в конденсаторе: $TT23Er := [T2\ ..\ Тк`]$

Значения энтропии в процессе 2 - 3: $\overrightarrow{S23Er := CoolProp_Props("S"; "P"; P2; "T"; TT23Er; "ammonia")}$

Продолжение линии после разрыва и соответствующие значения энтропии:

$$Тк`` := (405,4220041\ К - 10\ К)$$

Интервал температур в конденсаторе: $TT23Err := [Тк``\ ..\ Тк]$

Значения энтропии в процессе 2 - 3: $\overrightarrow{S23Err := CoolProp_Props("S"; "P"; P2; "T"; TT23Err; "ammonia")}$

Зададим координаты:

$$SS23Er := augment\left(\frac{S23Er}{кДж\ К^{-1}}; \frac{TT23Er}{К}\right)$$

$$SS23Err := augment\left(\frac{S23Err}{кДж\ К^{-1}}; \frac{TT23Err}{К}\right)$$

Покажем точки искусственного разрыва:

Энтропия в верхнем разрыве: $SEr1 := CoolProp_Props("S"; "P"; P2; "T"; Тк`; "ammonia")$

Энтропия в нижнем разрыве: $SEr2 := CoolProp_Props("S"; "P"; P2; "T"; Тк``; "ammonia")$

$$PointsError := \begin{cases} augment\left(\frac{SEr1}{кДж\ кг^{-1}\ К^{-1}}; \frac{Тк`}{К}; "."; 6; "Brown"\right) \\ augment\left(\frac{SEr2}{кДж\ кг^{-1}\ К^{-1}}; \frac{Тк``}{К}; "."; 6; "Brown"\right) \end{cases}$$

Рис. 7.15. Создание искусственного разрыва в нерасчетной области аммиака через CoolProp Wrapper и построение линии охлаждения аммиака до состояния насыщения

Для построения линии конденсации в конденсаторе зададим интервал степени сухости аммиака, по которому будет произведен расчет. Аммиак на выходе из конденсатора имеет степень сухости 0 (линия насыщения). См. рис. 7.16.

$$Q23 := [0; 0,001\ ..\ 1]$$

Значения энтропии при конденсации: $\overrightarrow{S23к := CoolProp_Props("S"; "P"; P2; "Q"; Q23; "ammonia")}$

Зададим координаты: $SS23к := augment\left(\frac{S23к}{кДж\ К^{-1}}; \frac{Тк}{К}\right)$

Рис. 7.16. Расчет координат линии конденсации аммиака

Произведем расчет координат точек процесса дросселирования. См. рис. 7.17.

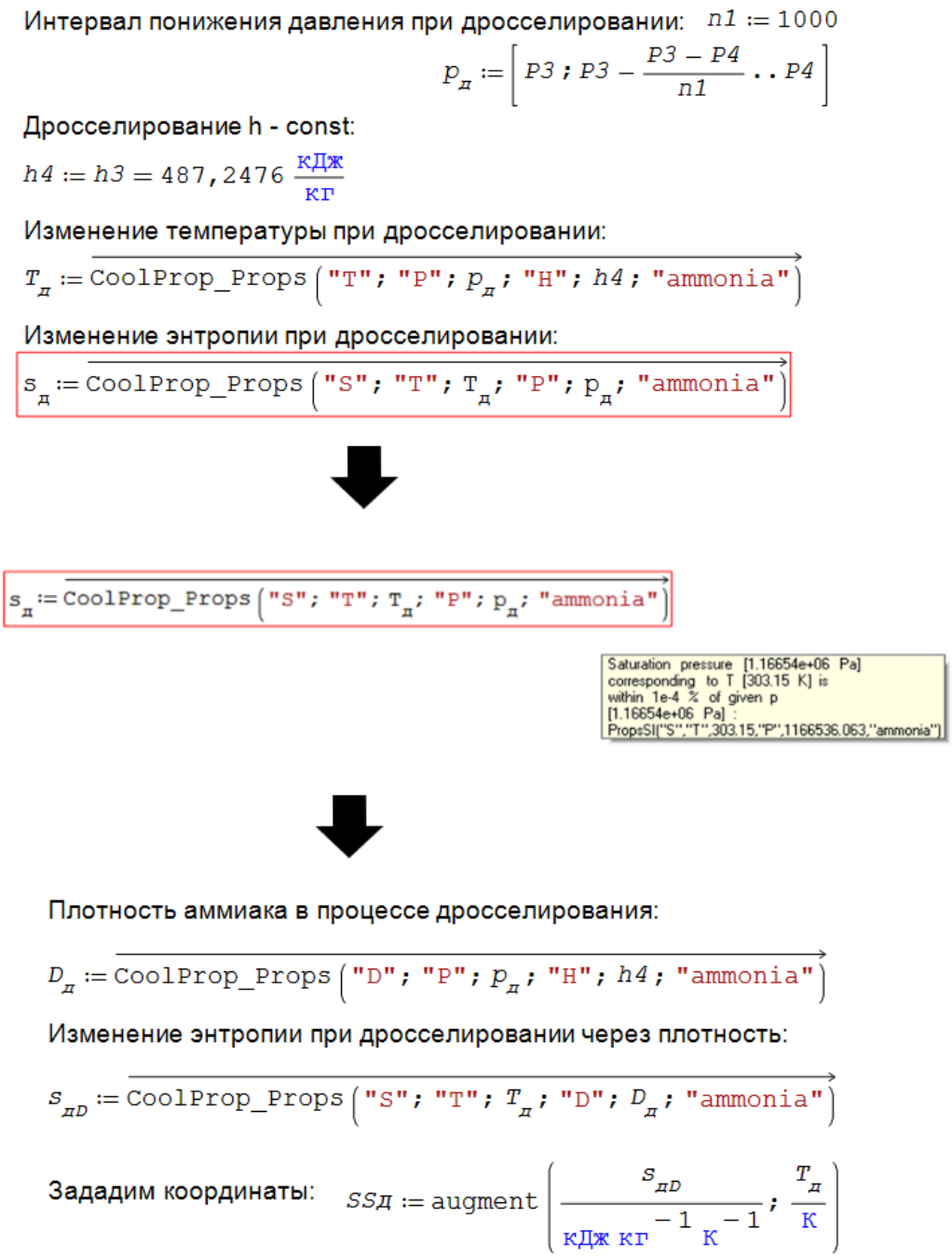


Рис. 7.17. Расчет координат точек процесса дросселирования

Расчет произведен через дополнительную функцию плотности аммиака, так как расчет через интервал давления не происходит напрямую.

Для построения линии испарения аммиака в испарителе, определим точку (координату) после дросселирования. Затем, от координаты этой точки, построим прямую линию испарения до степени сухости 1 (выход из испарителя). См. рис. 7.17.

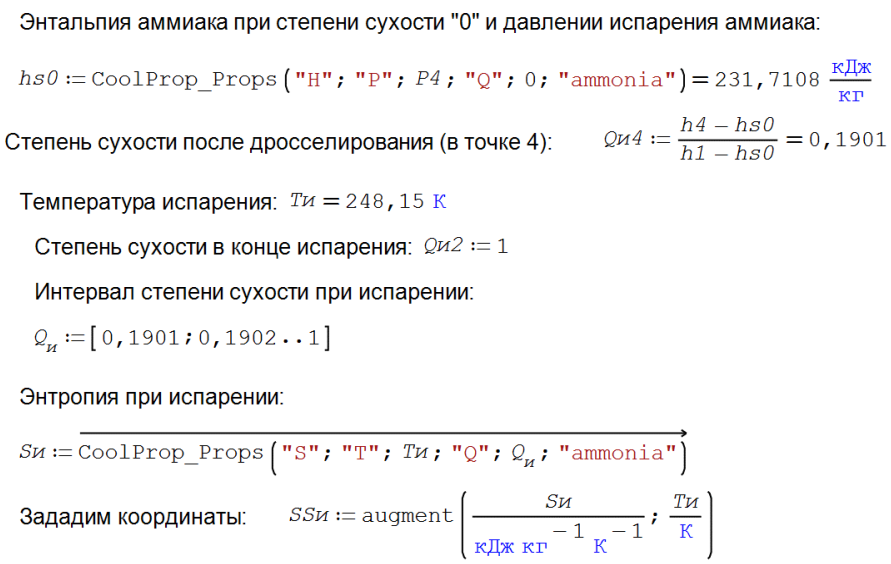


Рис. 7.18. Расчет линии испарения аммиака

Для построения линий идеального сжатия и реального сжатия, давление в начальной точке сжатия, т.е. на всасе в компрессор (точка 1), увеличим на 0.1%. Это мера необходима для того, чтобы программа CoolProp смогла произвести расчет точек. Так как CoolProp не рассчитывает значения непосредственно на линиях насыщения, а точка 1 находится на линии насыщения при степени сухости 1. Увеличив начальное давление (в точке 1) на 0.1%, на диаграмме существенного отличия наблюдаться не будет, зато решиться проблема построения линий сжатия.

(*Если в расчет поставить давление исходное, P1, то программа выдаст ошибку и расчет не будет произведен*).

В первую очередь задается интервал давлений. Затем, по данному интервалу и постоянной энтропии рассчитываются значения температуры идеального сжатия (*S=const*).

Для построения линии реального сжатия в каждой точке по ходу интервала определяется через расчет удельной работы значения последующих точек. См. рис. 7.19.

Для обозначения точек на диаграмме зададим координаты этих точек. Координаты наименований точек внесем в систему *Points*.

Полученная *T, s*-диаграмма через инструмент X-Y график со всеми полученными системами координат во входных параметрах графика показана на рисунке 7.20.

Интервал давлений:

$$n3 := 1000 \quad P1` := P1 \cdot 100,1\ \%$$

$$P`_{сж} := \left[ P1` ; P2 - \frac{P2 - P1`}{n3} .. P2 \right]$$

Идеальное сжатие

Энтропия в конце идеального сжатия равна энтропии в начале сжатия: $Sисж := S2и$

Изменение температуры аммиака при идеальном сжатии:

$$\overrightarrow{Тисж` := \text{CoolProp_Props}\left("T"; "S"; Sисж; "P"; P`_{сж}; "ammonia"\right)}$$

Зададим координаты:

$$SSисж` := \text{augment}\left( \frac{Sисж}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} ; \frac{Тисж`}{\text{К}} \right)$$

Реальное сжатие

Энтальпия аммиака перед компрессором (точка 1): $h1 = 1576,1814\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Энтальпия аммиака в каждой точке процесса идеального сжатия:

$$\overrightarrow{hисж` := \text{CoolProp_Props}\left("H"; "T"; Тисж`; "P"; P`_{сж}; "ammonia"\right)}$$

Работа при идеальном сжатии в каждой точке: $\overrightarrow{lисж` := hисж` - h1}$

Работа реального сжатия в каждой точке: $\overrightarrow{lсж` := \frac{lисж`}{\eta_{oi}}}$

Энтальпия в каждой точке при реальном сжатии: $\overrightarrow{hсж` := h1 + lсж`}$

Температура аммиака в каждой точке при реальном сжатии:

$$\overrightarrow{Тсж` := \text{CoolProp_Props}\left("T"; "H"; hсж`; "P"; P`_{сж}; "ammonia"\right)}$$

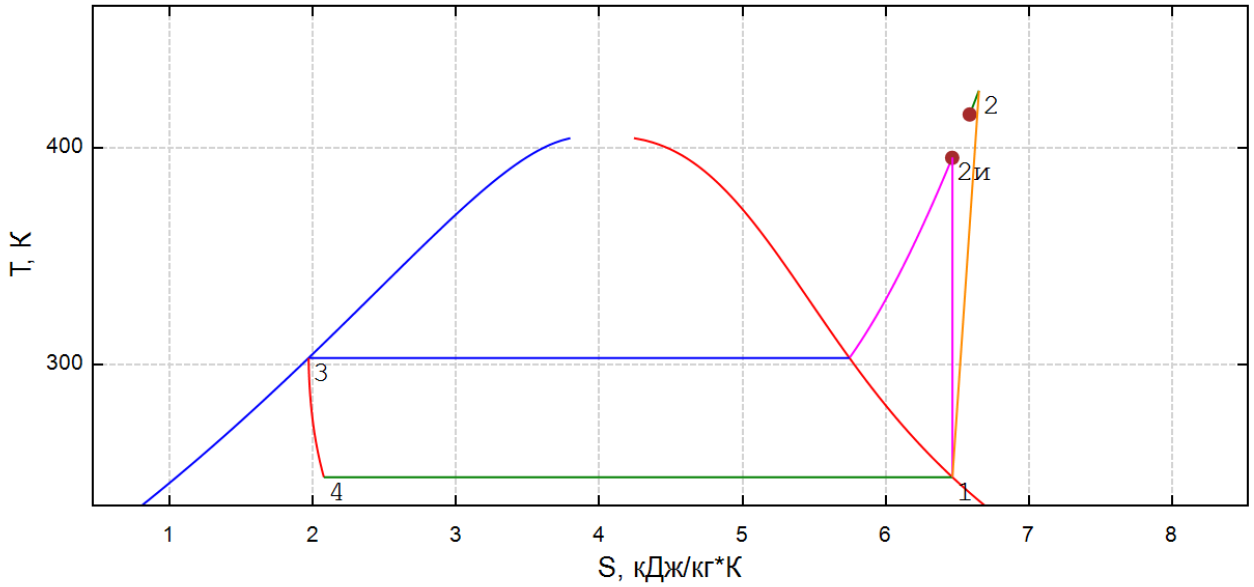
Энтропия в каждой точке при реальном сжатии:

$$\overrightarrow{Sсж` := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "T"; Тсж`; "P"; P`_{сж}; "ammonia"\right)}$$

Зададим координаты:

$$SSсж` := \text{augment}\left( \frac{Sсж`}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} ; \frac{Тсж`}{\text{К}} \right)$$

Рис. 7.19. Расчет точек линий сжатия в компрессоре установки



SSsat0
SSsat1
SS23Er
SS23Err
PointsError
SS23к
SSд
SSи
SSисж`
SSсж`
Points

Рис. 7.20. Цикл парокомпрессионной установки на T, s-диаграмме аммиака

Ниже описано будет описано, почему диаграмма не достроена и будет приведена достроенная диаграмма для аммиака с меньшим шагом, где программа также построила линии насыщения «горизонтально в стороны», что и стало причиной ошибки, из-за которой не строится процесс охлаждения в области бордовых точек.

Бордовыми точками указана граница области, в которой программа CoolProp Wrapper не рассчитывает значения ТФС.

Необходимо сказать, что если уменьшить шаг в интервале температур при построении линий насыщения аммиака, то линии насыщения строятся следующим образом (см. рис. 7.21).

Линия насыщения при степени сухости 0

$$n := 1000$$

Интервал температур построения: $TTsat := \left[Ttriple ; Ttriple + \frac{Tcrit - Ttriple}{n} .. Tcrit \right]$

Энтропия аммиака при различных температурах и степени сухости 0:

$$\overrightarrow{Ssat0 := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "Q"; 0; "T"; TTsat; "ammonia"\right)}$$

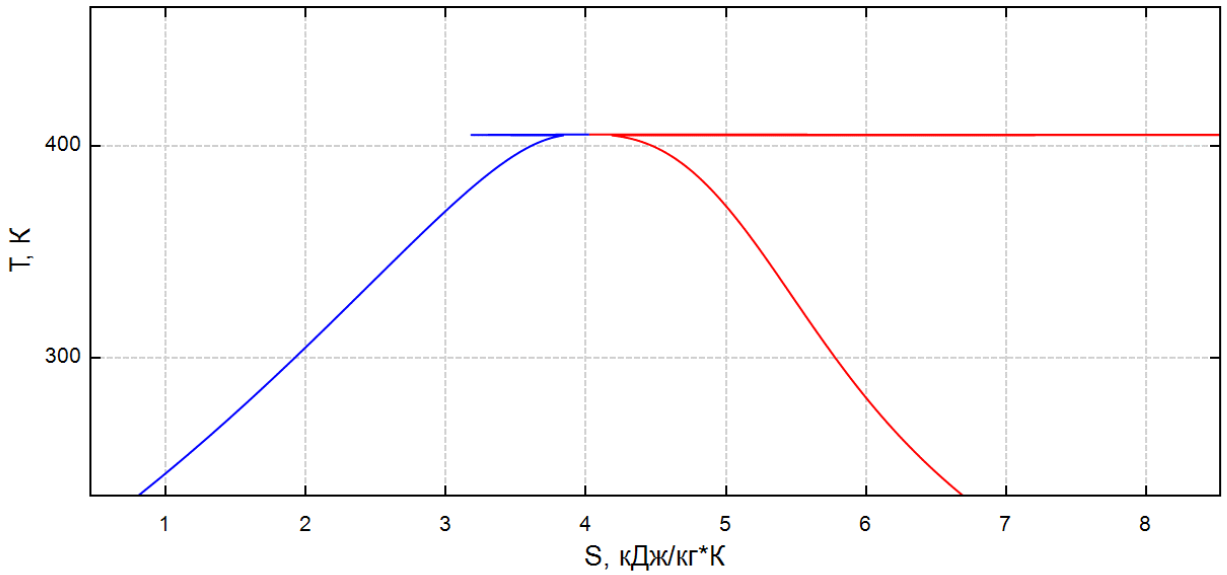
Зададим координаты: $SSsat0 := \text{augment}\left(\frac{Ssat0}{\text{кДж К}^{-1}} ; \frac{TTsat}{\text{К}} \right)$

Линия насыщения при степени сухости 1

Энтропия аммиака при различных температурах и степени сухости 1:

$$\overrightarrow{Ssat1 := \text{CoolProp_Props}\left("S"; "Q"; 1; "T"; TTsat; "ammonia"\right)}$$

Зададим координаты: $SSsat1 := \text{augment}\left(\frac{Ssat1}{\text{кДж К}^{-1}} ; \frac{TTsat}{\text{К}} \right)$



$$\begin{cases} SSsat0 \\ SSsat1 \end{cases}$$

Рис. 7.21. Линии насыщения аммиака с меньшим шагом построения в интервале температур

Как видно из полученных результатов, то значения линий насыщения дополнительно продлеваются горизонтально в сторону увеличения и уменьшения энтропии.

Можно сделать вывод о том, что именно такое «продолжение» линии насыщения при степени сухости 1 «вправо», т.е. в сторону увеличения энтропии, и является причиной ошибки при построении процесса охлаждения в конденсаторе.

Дополнительно можно ознакомиться с расчетом и построением t-Q диаграммы процесса теплообмена в конденсаторе и испарителя данной задачи на сайте [2].

Задание читателям

1. Рассчитайте при тех же условиях установку, но в качестве рабочего вещества выберите R407A.
2. Пересчитайте данный пример, но при условии, что аммиак в точке 3 будет иметь состояние жидкости, а не насыщенной жидкости. Постройте процесс дросселирования на графике.
3. Для рассмотренного примера рассчитайте коэффициент трансформации тепла, приняв, что установка работает в качестве теплового насоса.

Список литературы

1. Мартынов А. В. Установки для трансформации тепла и охлаждения: Сборник задач: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.; ил. ISBN 5-283-00060-5
2. http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/martynov.html

Глава 8. Диаграммы цикла паротурбинной установки Или Дежавю

Дежавю – это состояние человека, когда он чувствует, что он *это* когда-то давно уже видел. А как называется чувство, когда знаешь, что раньше видел видимое не один, а двадцать или тридцать раз подряд каждый год? Супердежавю? Такое происходит с авторами данного учебного пособия, когда их студенты приносят на проверку выпускную квалификационную работу (ВКР), один из разделов которой посвящен тепловому расчету паротурбинного цикла тепловой электростанции, где обязательно присутствует картинка, показанная на рис. 8.1.

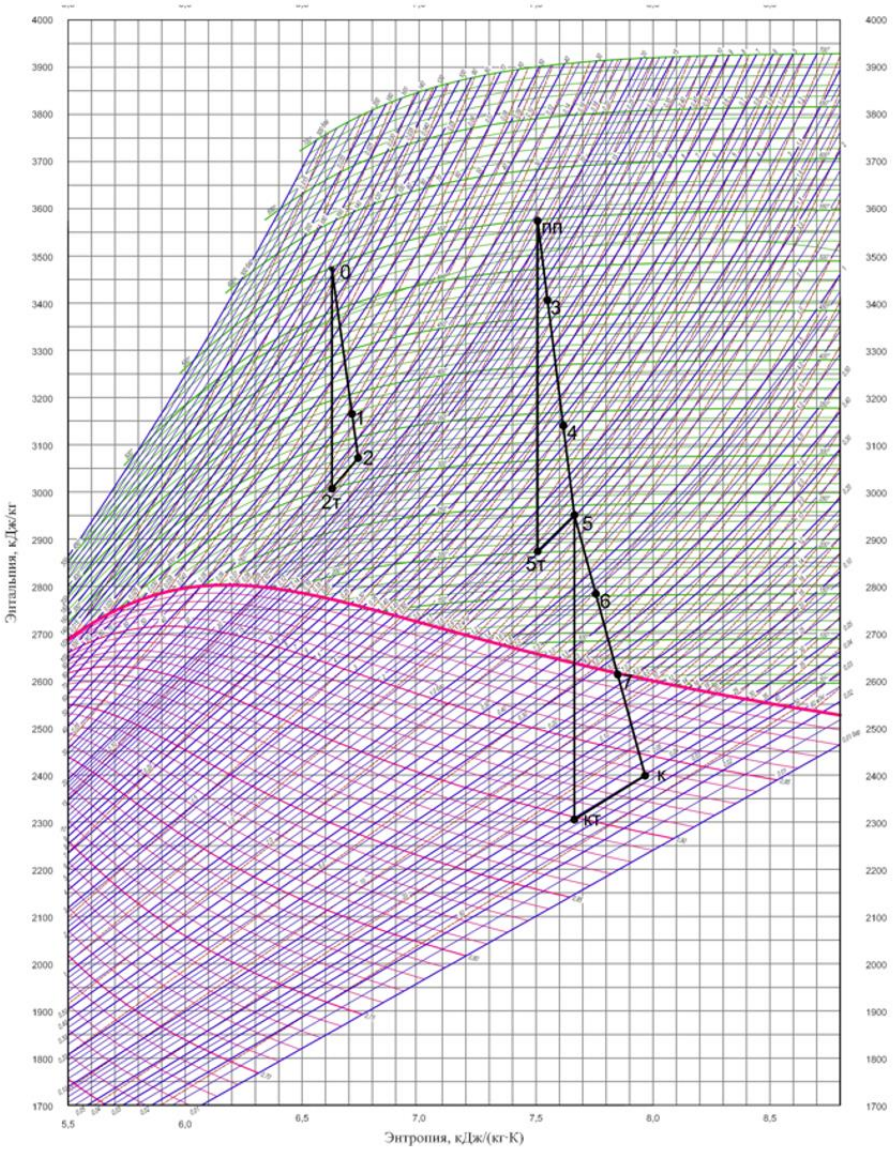


Рис. 8.1 Бумажная h, s диаграмма расширения пара в турбине

Студент при выполнении ВКР берёт готовую заготовку диаграммы с прочерченными на ней изобарами, изотермами и линиями одинаковой влажности водяного пара, проставляет на диаграмме точки, координаты которых определены в результате

теплового расчета паротурбинной установки (ПТУ – см. примеры в главах 9 и 11), и соединяет эти точки прямыми линиями. Получаются три треугольника, характеризующие процесс расширения пара в частях высокого, среднего и низкого давлений паровой турбины. При этом первый треугольник всегда оказывается оторванным от двух других. А там должна быть линия, характеризующая процесс промежуточного перегрева водяного пара!

Раньше заготовки диаграммы, показанной на рис. 8.1, были бумажными. Затем они в духе-времени стали электронными. Но сути работы студента это не поменяло.

О нумерации точек. Точка входа пара в турбину нумерована нулем, хотя в курсе технической термодинамики там рекомендовано ставить единицу (см., например, рис. 9.3 и 9.4 в главе 9). Оставим там нуль, который похож на букву О – Острый пар. И второе. В информатике и в программировании счёт обычно начинают с нуля, а не с единицы.

А давайте научим студентов создавать такие живые диаграммы – диаграммы, где убраны лишние изотермы, изобары и линии одной влажности. Но главным будет то, что изменение исходных данных приведет к построению новых треугольников, показанных на рис. 8.1. Будем использовать для этого функции пакета CoolProp Wrapper (см. главу 2) вперемешку с функциями пакета WaterSteamPro (глава 1).

Примеры вызова функций пакета CoolProp Wrapper показаны на рис. 8.2: 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 8.2 показаны примеры вызова функций, возвращающих теплофизические свойства воды и водяного пара по формуляции 1997 года Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара – см. главу 1. То, что это формуляция именно 1997, а не 1995 года свидетельствует запись `wm:="IF97::H2O"`. Для работы с формуляцией 1995 кода необходима укороченная запись `wm:="H2O"` (см. начало рис. 1.21 в главе 1).

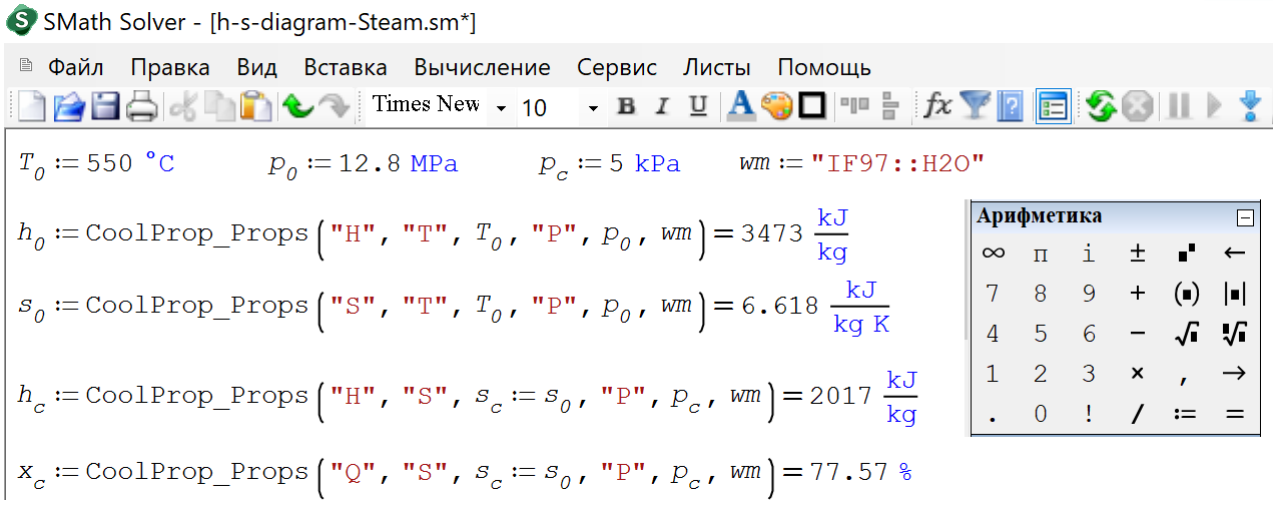


Рис. 8.2 Примеры вызова функций пакета CoolProp Wrapper

На рисунке 8.3 показано продолжение SMath-расчета, начало которого отображено на рис. 8.2. Он связан с подготовкой к построению диаграмм процесса адиабатного (обратимого) расширения водяного пара от давления 12.8 МПа (температура 550°C) до давления 5 кПа – см. первую строку расчета на рис. 8.2. Мы начнем с простейшей задачи и не будем пока разделять турбину на три части – высокого, среднего и низкого давления. Операторами, показанными на рис. 8.3, определяются параметры критической (cr) и тройной (tr) точек воды и водяного пара. В пятом операторе на рис. 8.2 фигурирует переменная Q – степень сухости водяного пара (**Q**uality – 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. 8.2 (расчет температуры в конденсаторе T_c) 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 – см. знаменатель дроби в выражении арифметической прогрессии для T_{Sat}) и они расположены близко друг от друга, то они сливаются в сплошную линию.

Операторы, показанные на рис. 8.3 не требуют особых комментариев. Заполняются три вектора с именами T_{Sat} (температура), s_{satS} (удельная энтропия сухого насыщенного пара), s_{satW} (удельная энтропия воды на линии насыщения), по которым будет построена линия насыщения – её синяя и красная части на T, s- или h, s-диаграмме.

Для построения изобары давления p_0 по арифметической прогрессии табулируются значения удельной энтропии. По вектору s_p и скаляру p_0 генерируется вектор T_0 для построения изобары на T, s-диаграмме. Вектор s_x хранит значения удельной энтальпии влажного пара при заданном значении его сухости x_c (скаляр) и значениях температуры в векторе T_{Sat}.

Для построения изоэнтальпы при давлении p_0 по арифметической прогрессии опять же табулируются значения удельной энтропии, но в другом диапазоне значения. По вектору s_h и скаляру h_0 генерируется вектор T_h для построения линии одинаковой энтальпии на T, s-диаграмме. Оператор векторизации (верхняя стрелочка, направленная вправо) заставляет пакет SMath, как мы уже не раз отмечали в этой книге, выполнять нужные действия над каждым элементом соответствующего вектора, а не над вектором в целом.

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. В этом контексте термин "критическая точка" приобретает новый, информационный смысл – точка, где расчет даёт сбой.

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

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

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

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

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

Saturated line

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

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

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

Isobar

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

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

x - const

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

h - const

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

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

Рис. 8.3 Заполнение векторов, формирующих диаграмму расширения водяного пара в турбине

Имея под рукой заполненные векторы, несложно построить нужные диаграммы. Для этого в расчёт вводится переменная `Plot`, в которую заносятся операторы построения графиков, объединенные фигурными скобками – см. рис. 8.4. Эти операторы вложены в матрицу с одной строкой и двумя столбцами – в горизонтальный вектор, первый элемент которого – это действующий оператор, а второй – это комментарий, текст, обрамлённый кавычками (авторский прием ввода поясняющих замечаний). Функция `augment`, встроенная в пакет 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, кельвины, а не градусы по шкале Цельсия. 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 через константу 273.15.

Линия обратимого расширения пара в турбине (вертикальный отрезок прямой линии – левая сторона треугольников, показанных на рис. 8.1) строится через ввод матрицы с двумя строками и двумя столбцами, элементы которой фиксируют координаты начала и конца отрезка прямой.

Некоторые точки графика помечены либо кружочком (критическая точка), либо соответствующей подписью. Подпись имеют линии одинаковой сухости пара, изобара (мы поменяли 12.8 МПа на сверхкритические 24 МПа) и изоэнтальпа. 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 они отображаются на месте отмеченной точки.

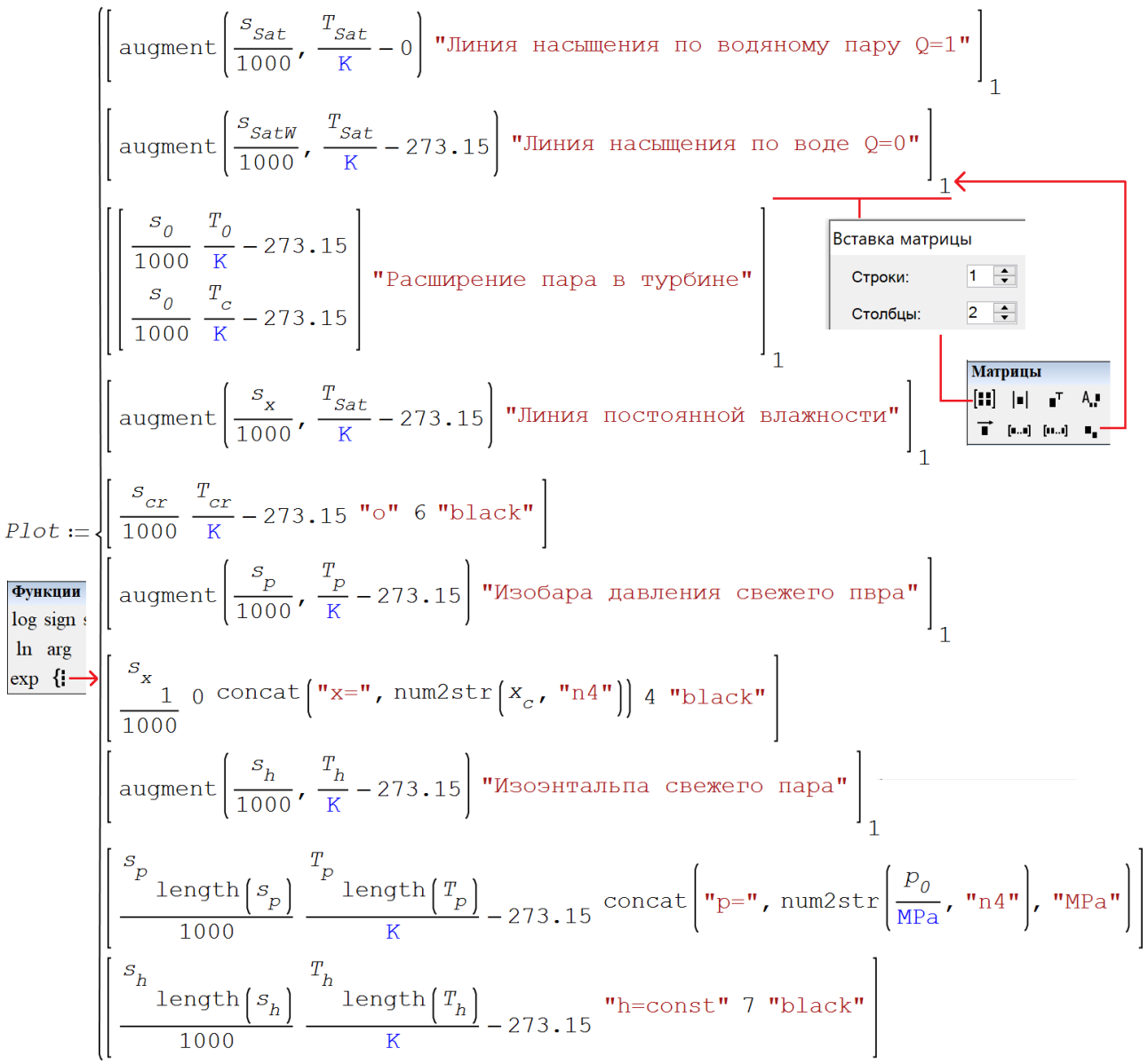


Рис. 8.4 Формирование аргумента графика

На рисунке 8.5 показана T, s-диаграмма, формирование которой зафиксировано операторами, отображенными на рис. 8.3 и 8.4.

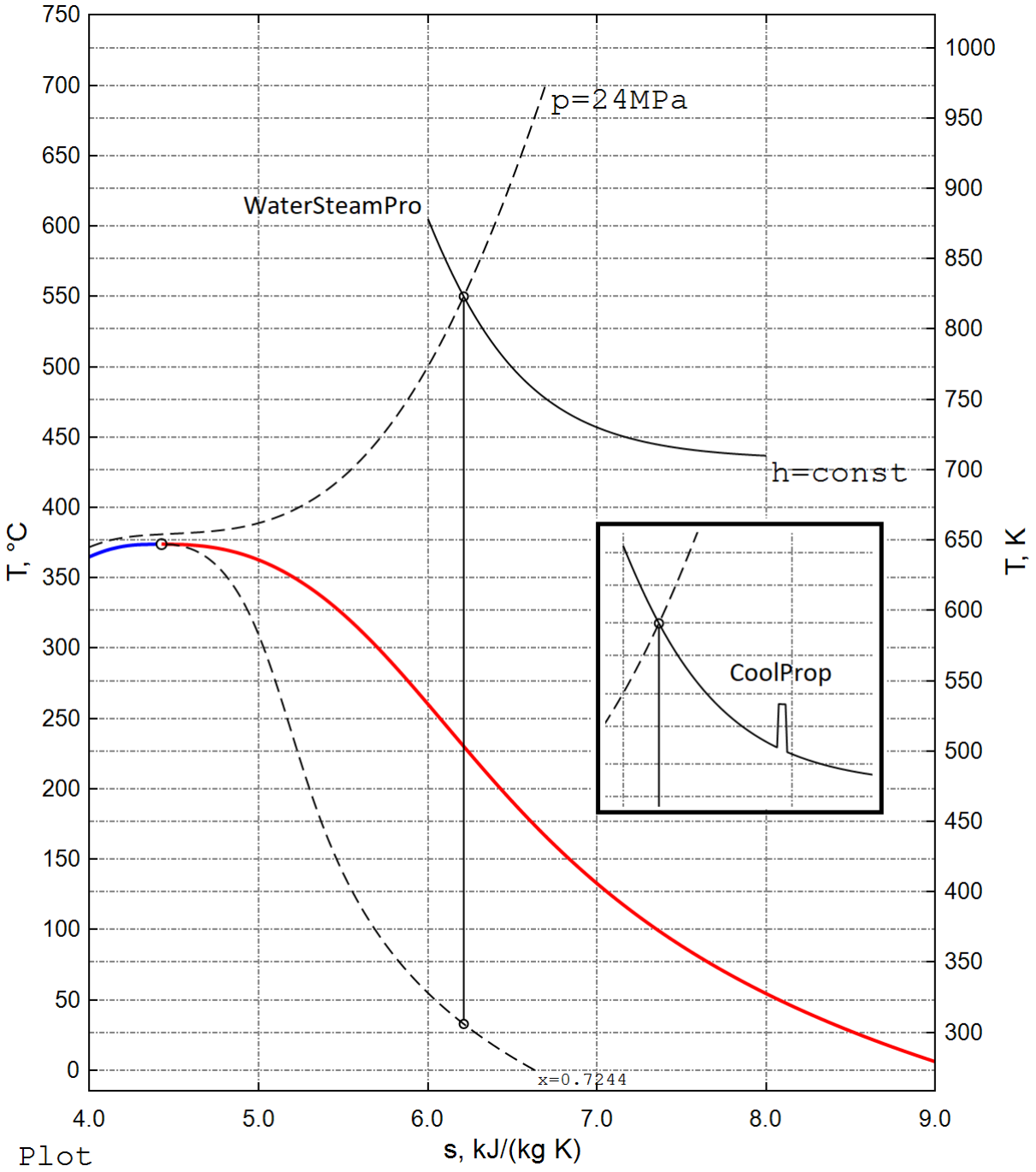


Рис. 8.5 T-s диаграмма обратимого расширения пара в турбине

О выделенной квадратной области на рис. 8.5 будет рассказано ниже.

На рисунке 8.6 показано два диалоговых окна формирования графика, через которые на концах отрезка прямой, изображающей обратимое расширение тара в турбине, проставлены кружочки.

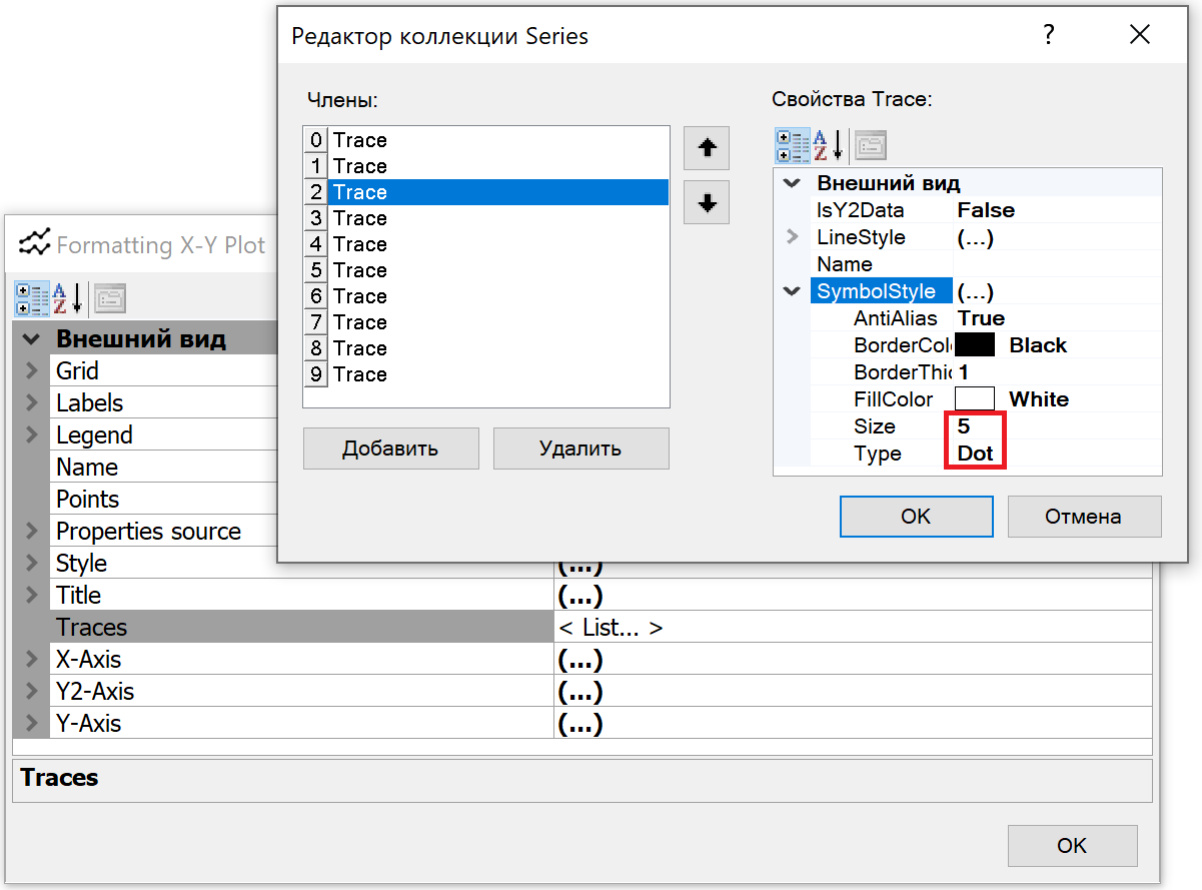


Рис. 8.6 Форматирование отрезка прямой с двумя кружочками на концах

Диаграмма, показанная на рис. 8.5, имеет две оси ординат. Левая ось отображает температуру по шкале Цельсия, а правая – по шкале Кельвина (абсолютная термодинамическая температура). Получить такую диаграмму можно, включив в работу через переключатель false/true вторую ось Y (см. рис. 8.7) и соответствующим образом отформатировав её: цвет, толщина и др. Рисунок 8.7 показывает, что на графике построено 10 кривых от нулевой до десятой.

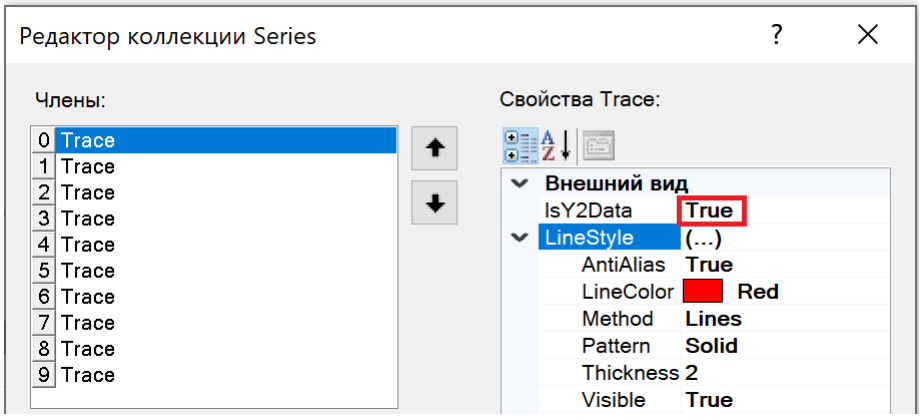


Рис. 8.7 Работа со второй осью ординат

При особом желании можно сформировать и вторую ось абсцисс – см. рисунок 8.8, отображающий зависимость изобарной удельной теплоемкости воды от температуры при атмосферном давлении.

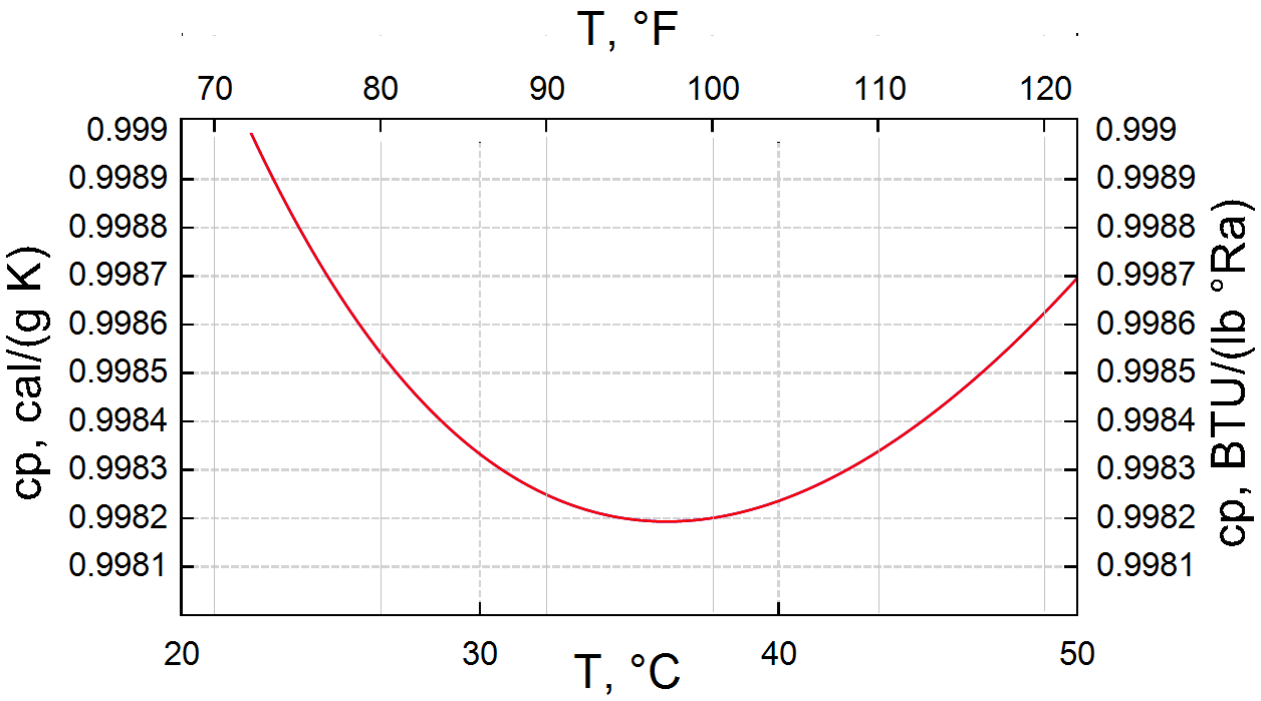


Рис. 8.8 Зависимость изобарной удельной теплоемкости воды от температуры при атмосферном давлении

График на рисунке 8.12 – это коллаж из двух графиков – графика со шкалою Цельсия по оси абсцисс и графика со шкалою Фаренгейта по той же оси. Такой коллаж получен в среде графического редактора Paint. 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 адресу https://en.smath.com/forum/yaf_poststt25243_2-d-X-axes.aspx.

На рисунке 8.9 показана h, s-диаграмма (диаграмма Молье) процесса 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, опираясь на операторы, показанные на рис. 8.10 и пользуясь информацией, приведенной выше. При этом правая сторона треугольника, о котором упоминалась в начале главы (см. рис. 8.1), оказалась изогнутой. В расчёте было возвращено докритическое начальное давление пара в 12.8 МПа – изобара этого давления в нижней части графика оказалась в

двухфазной области. На рисунке 8.5 прочерчена изобара давления для 24 МПа, которая вся находится в однофазной области.

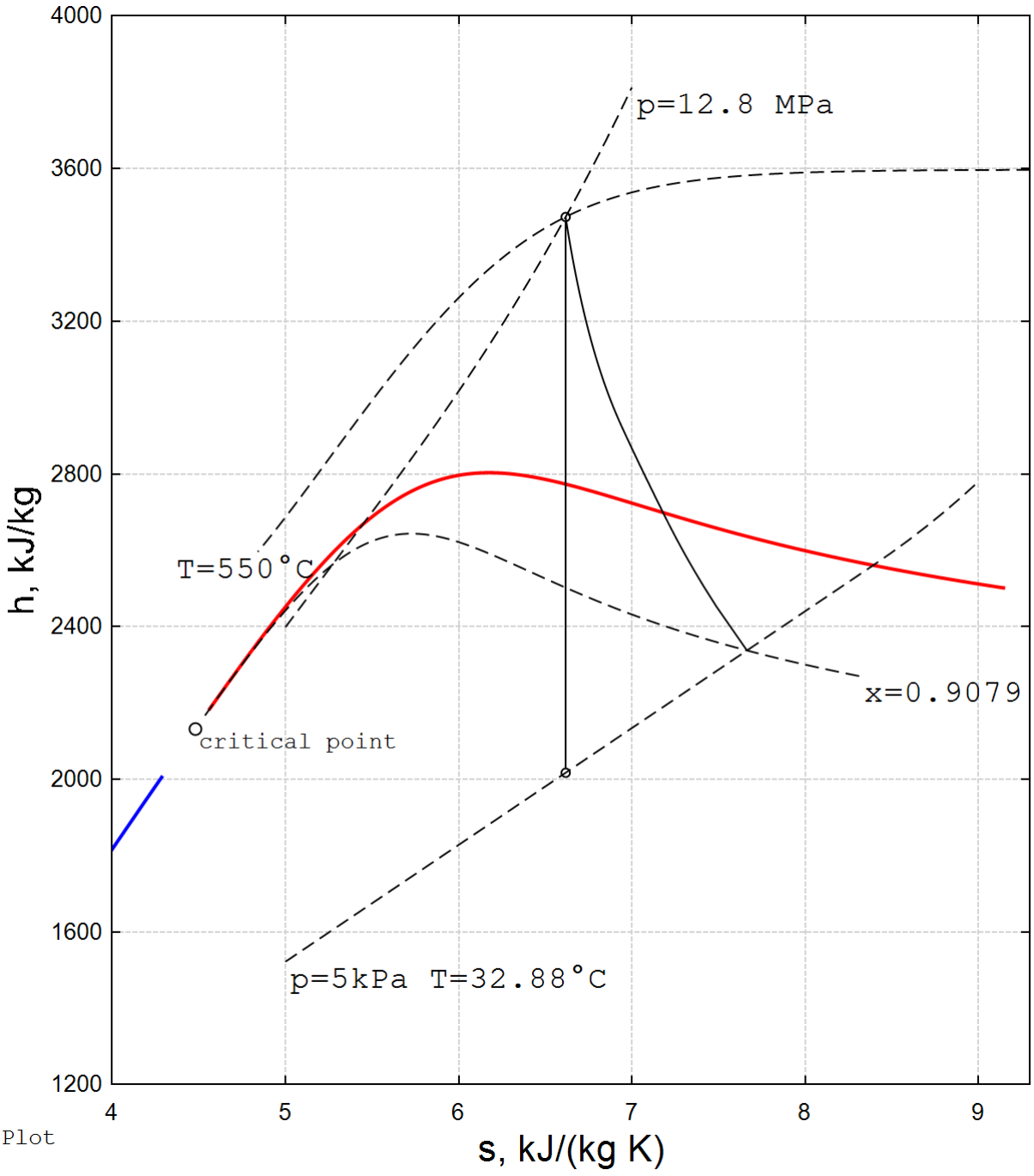


Рис. 8.9 h, s-диаграмма необратимого расширения пара в турбине

На рисунке 8.10 показаны операторы, формирующие векторы для построения h, s-диаграммы, изображенной на рис. 8.9. Используется не приложение CoolProp Wrapper, а приложение WaterSteamPro с очень удобными двум функциями `wspHEXPANSIONPTPEFF` и `wspXEXPANSIONPTPEFF`, возвращающими удельную энтальпию (см. букву H в названии функции) и степень сухости пара (X) в зависимости от давления и температуры

исходной точки, конечного давления и внутреннего относительного КПД процесса расширения пара в турбине. Таких функций нет в пакете CoolProp Wrapper. Зато там есть функции, возвращающие параметры критической и тройной точек – см. начало рис. 8.3. Оптимальное решение – это использование обоих пакетов при решении теплотехнических задач, избегая недостатков одного пакета, и опираясь на достоинства другого. Так на рис. 8.5 в выделенной квадратной области показано, что пакет CoolProp Wrapper дал сбой при расчете параметров линии одной удельной энтальпии. В этом случае соответствующую функцию этого пакета нужно заменить на функцию из пакета WaterSteamPro.

$T_0 := 550\ °C \qquad p_0 := 12.8\ MPa \qquad p_c := 5\ kPa \qquad \eta_{oi} := 78\ \%$

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

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

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

$T_{cr} := 373.95\ °C \qquad T_{tr} := 0.01\ °C \qquad p_{cr} := 22.064\ MPa$

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

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

Saturated line

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

$s_{SatS} := \overrightarrow{\text{wspSSST}\left(T_{Sat}\right)} \qquad h_{SatS} := \overrightarrow{\text{wspHSST}\left(T_{Sat}\right)}$

$s_{SatW} := \overrightarrow{\text{wspSSWT}\left(T_{Sat}\right)} \qquad h_{SatW} := \overrightarrow{\text{wspHSWT}\left(T_{Sat}\right)}$

Isobar

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

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

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

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

Isotherm

$pp := \left[(1\ kPa), 10\ kPa .. (50\ MPa)\right]$

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

x - const

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

Turbine

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

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

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

Рис. 8.10 Операторы, формирующие векторы с параметрами необратимого расширения пара в турбине

А теперь мы перекинем мостик из термодинамики в гидрогазодинамику и теплообмен.

Самая верхняя точка h, s-диаграммы на рис. 8.9 фиксирует параметры водяного пара на выходе из парового котла – на входе в паровую турбину. Но там фактически должна быть не одна точка, а две, между которыми расположен паропровод – главный паропровод тепловой электростанции. Давайте увеличим область этой точки так, чтобы на графике можно было увидеть соответствующую линию изменения параметров пара. Затем этот график можно будет внедрить в график, показанный на рис. 8.9, примерно так, как это было сделано на рис. 3.10 в главе 3 для питательного насоса ПТУ.

Функция `wspHEXPANSIONPTPEFF` из пакета WaterSteamPro поможет нам решить такую частную проблему (подзадачу), возникающую при построении диаграмм, показанных на рисунках выше.

На рисунке 8.11 показан ввод в расчет давления (p_0) и температуры (T_0) пара, выходящего из парового котла. Сделано допущение, что пар по пути в турбину через главный паропровод потеряет 5 процентов своего давления. Это связано с трением пара о внутреннюю поверхность трубы с её поворотами и запорно-регулирующей арматурой. На рисунке 9.31 в главе 9 показан расчет потери давления флюида (жидкости или газа) при протекании его на прямолинейном участке трубопровода.

В идеальном случае (идеальная теплоизоляция) течения пара в трубе его энтальпия не должна меняться. Такой процесс дросселирования пара показан на рис. 9.34 в главе 9. На рисунке 8.11 в первой его части до горизонтальной черты проведен расчёт снижения температуры пара в паропроводе при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Для этого в известную нам функцию `wspXEXPANSIONPTPEFF` подставили нулевое значение внутреннего относительного КПД η. Энтальпия при этом не изменилась, а температура снизилась. Наш паропровод хорошо теплоизолирован, тем не менее потери тепла имеют место. Это нежелательное явление в нашем расчёте отмечено тем, что значение η стало ненулевым, а, допустим, равным 10% – см. операторы под чертой на рис. 8.11.

$p_0 := 12.8\ \text{MPa} \qquad T_0 := 550\ °\text{C} \qquad p'_0 := p_0 \cdot (1 - 5\ \%) = 12.16\ \text{MPa}$

$h_0 := \text{wspHPT}(p_0, T_0) = 3473\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\eta := 0\ \%$

$h'_0 := \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_0, T_0, p'_0, \eta) = 3473\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_0 = h'_0 = 1$

$T'_0 := \text{wspTPH}(p'_0, h'_0) = 547.5\ °\text{C}$

$\eta := 10\ \%$

$h'_0 := \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_0, T_0, p'_0, \eta) = 3472\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h_0 = h'_0 = 0$

$T'_0 := \text{wspTPH}(p'_0, h'_0) = 546.8\ °\text{C}$

Рис. 8.11 Оценка потерь в главном паропроводе ПТУ

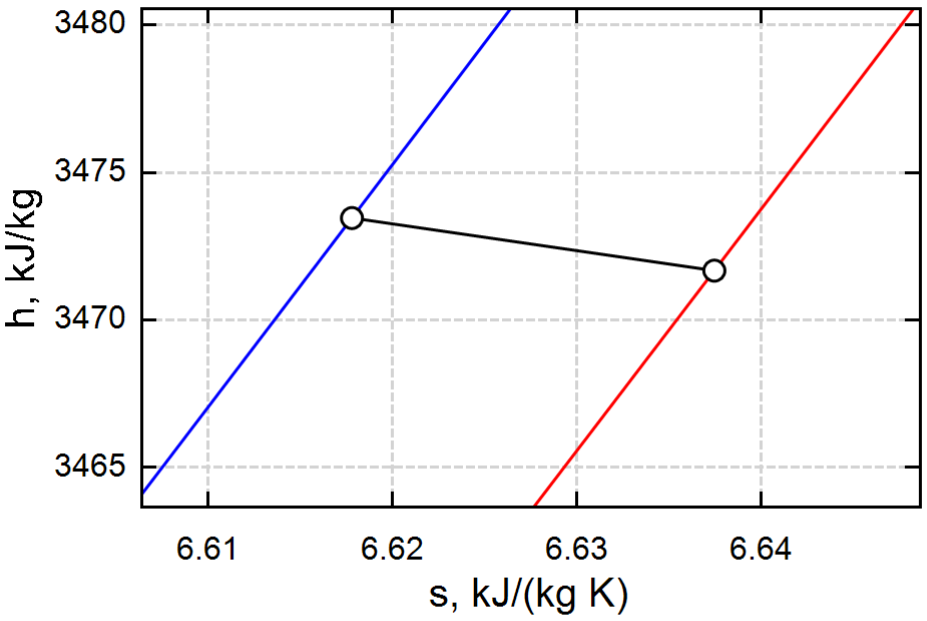
Примечание. Дросселирование пара в трубопроводе в нашем случае – это вредный процесс, снижающий КПД установки. Но в циклах некоторых холодильных машин дросселировании – это основной процесс, связанный с получением холода – см. главу 7. Следует также отметить, что в наступившую эру интернете термин "дросселирование" стали применять и в информатике. Специальные дроссели ("удушители") ставят во Всемирной Паутине для искусственного замедления трафика в благих целях.

Данные, полученные в расчёте на рисунке 8.11 позволяют построить h, s-диаграмму изменения параметров пара на его пути от котла до турбины – см. рис. 8.12.

$$T := \left[540\ °C , 540\ °C + 0.1\ K .. 560\ °C \right]$$

$$h_{p0} := \overrightarrow{\text{wspHPT}\left(p_0 , T\right)} \qquad s_{p0} := \overrightarrow{\text{wspSPT}\left(p_0 , T\right)}$$

$$h'_{p0} := \overrightarrow{\text{wspHPT}\left(p'_0 , T\right)} \qquad s'_{p0} := \overrightarrow{\text{wspSPT}\left(p'_0 , T\right)}$$



$$\begin{cases} \text{augment}\left(\frac{s_{p0}}{1000} , \frac{h_{p0}}{1000}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{s'_{p0}}{1000} , \frac{h'_{p0}}{1000}\right) \\ \begin{bmatrix} \frac{s_0}{1000} & \frac{h_0}{1000} \\ \frac{s'_0}{1000} & \frac{h'_0}{1000} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Рис. 8.12 Диаграмма изменения параметров пара в главном паропроводе ПТУ

Сравнивая рисунки 8.9 и 8.12, можно сделать такой вывод. Если у функции `wspHEXPANSIONPTPEFF` четвертый аргумент близок к ста процентам (к единице), то ведется расчет паровой турбины, а если он близок к нулю, то паровой турбины без… ротора, то есть трубопровода.

С давлением в паропроводе мы немного разобрались (гидрогазодинамика), попробуем теперь разобраться с температурой в нём (теплообмен[44]).

На рисунке 8.13 показан разрез паропровода, состоящего из стальной трубы с радиусом внутренней поверхности r_1, с радиусом внешней поверхности r_2 и с теплоизоляцией толщиной $r_3 - r_2$. Все это покрыто жестяным листом толщиной $r_4 - r_3$. Известны температуры пара T_{b1} и окружающего трубопровод воздуха T_{b2}, а так же условия теплообмена на границах пар-сталь и жестяной кожух-воздух – значения соответствующих коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 – см. рис. 8.15. Найти значения температур внутри такого трехслойного пирога – на границах слоев, а также тепловой поток q (ватт на метр) через все три слоя.

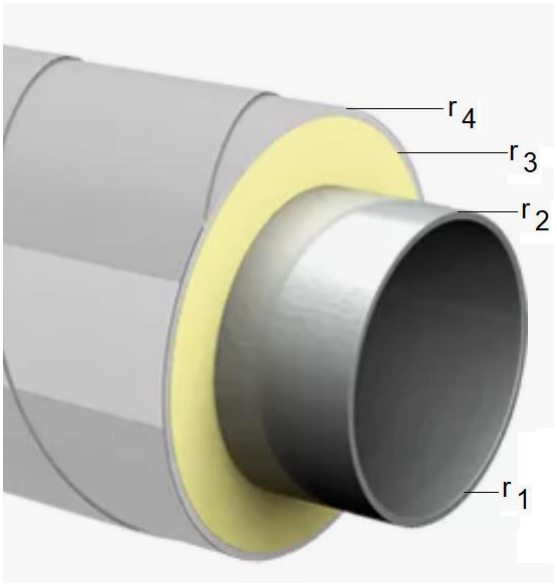


Рис. 8.13. Разрез паропровода

Задача, казалось бы, хорошо известна, и её решить довольно просто – достаточно найти в учебниках [1] или в интернете формулу теплообмена на круглом бесконечном цилиндре с натуральным логарифмом отношения радиусов. Такая формула кочует из книги в книгу, с одного сайта интернета в другой. В некоторых учебниках, но далеко не во всех показано, как получена эта формула в процессе аналитического решения дифференциального уравнения теплообмена. Логарифм же получается из-за того, что берется интеграл от такого подынтегрального выражения: 1/x. Логарифм пропадает, когда

[44] Это учебное пособие по термодинамике, но авторы решили, что нелишним будет включить в него и типичную задачу по теплообмену. Эти научные и учебные дисциплины тесно связаны. Более того, есть мнение, что термодинамику стоит называть термостатикой, а теплообмен – термодинамикой. А можно придумать и загадочную промежуточную термокинетику. В курсе физики студенты изучают механику с её тремя составными частями – статика, кинетика и динамика.

решается аналогичная задача для плоской бесконечной стенки или для сферической стенки. Но мы постараемся внести в эту задачу что-то новое, связанное с использованием пакета SMath для решения задач теплотехники, в частности, задач тепломассообмена [2].

На рисунке 8.13 показана попытка решить цепочку из уравнений теплового потока через нашу трехслойную трубу. Некоторые математические пакеты умеют решать подобные уравнения-цепочки, но не наш пакет SMath. Вернее, пакет Maple, который внедрили в пакет SMath. Было возвращено не аналитическое решение цепочки уравнений по четырем переменным T с текстовыми индексами 1, 2, 3 и 4 (температуры на границе слоев), а исходное выражение. Тем не менее, всегда нужно пытаться решать задачи необычным способом.

$$\mathit{maple}\left(\mathit{solve}\left(r_1\cdot\alpha_1\cdot\left(T_{b1}-T_1\right)=\frac{\lambda_{12}\cdot\left(T_2-T_1\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}=\frac{\lambda_{23}\cdot\left(T_3-T_2\right)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}=\frac{\lambda_{34}\cdot\left(T-T_4\right)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}=r_4\cdot\alpha_2\cdot\left(T_4-T_{b2}\right),\begin{pmatrix}T_1\\T_2\\T_3\\T_4\end{pmatrix}\right)\right)=$$

$$=\mathit{maple}\left(\mathit{solve}\left(r_1\cdot\alpha_1\cdot\left(T_{b1}-T_1\right)=\frac{\lambda_{12}\cdot\left(T_2-T_1\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}=\frac{\lambda_{23}\cdot\left(T_3-T_2\right)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}=\frac{\lambda_{34}\cdot\left(T-T_4\right)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}=r_4\cdot\alpha_2\cdot\left(T_4-T_{b2}\right),\begin{pmatrix}T_1\\T_2\\T_3\\T_4\end{pmatrix}\right)\right)$$

Рис. 8.13. Попытка аналитического решения уравнения-цепочки

На рисунке 8.14 показано, как исходное уравнение-цепочка было разбито на четыре отдельных обычных уравнений, и что их аналитическое решение увенчалось успехом. Получены четыре выражения, которые полностью не показаны. В них просто нужно подставить исходные данные (рис. 8.14) и получить ответ (рис. 8.15). При этом пришлось вектор ответа с именем *ans* отсортировать с помощью функции `sort`, так как решение было выдано не в нужном порядке. Затем вектор *ans* был перевернут функцией `reverse` и вставлен в итоговый ответ. На стальных участках паропровода температура, как и ожидалось, почти не менялась, а на участке теплоизоляции меняется с 549 до 15 градусов по шкале Цельсия.

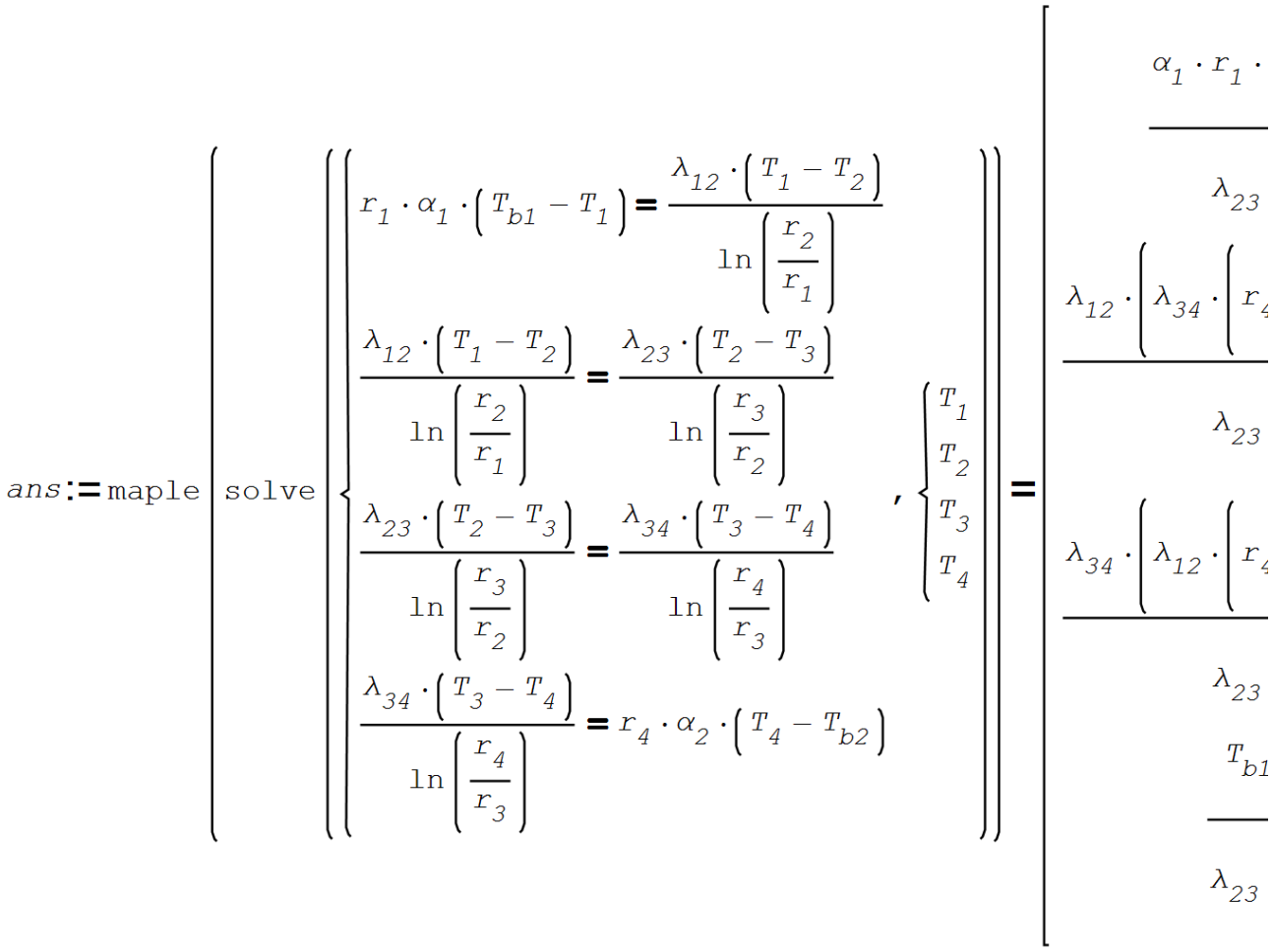


Рис. 8.14 Аналитическое решение четырех отдельных уравнений

$L := 20\ \mathrm{m}$

$T_{b1} := 550\ ^\circ\mathrm{C}$

$r_1 := 300\ \mathrm{mm}$

$r_2 := r_1 + 50\ \mathrm{mm} = 350\ \mathrm{mm}$

$r_3 := r_2 + 150\ \mathrm{mm} = 500\ \mathrm{mm}$

$r_4 := r_3 + 3\ \mathrm{mm} = 503\ \mathrm{mm}$

$T_{b2} := 10\ ^\circ\mathrm{C}$

$\alpha_1 := 220\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\ \mathrm{K}}$

$\lambda_{12} := 70\ \frac{\mathrm{W\ m}}{\mathrm{m}^2\ \mathrm{K}}$

$\lambda_{23} := 0.05\ \frac{\mathrm{W\ m}}{\mathrm{m}^2\ \mathrm{K}}$

$\lambda_{34} := 50\ \frac{\mathrm{W\ m}}{\mathrm{m}^2\ \mathrm{K}}$

$\alpha_2 := 30\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\ \mathrm{K}}$

Рис. 8.15 Ввод исходных данных задачи о трехслойном паропроводе

$$ans = \begin{bmatrix} 14.97 \\ 14.96 \\ 548.9 \\ 548.7 \end{bmatrix} °C$$

$$ans := \mathrm{sort}(ans) = \begin{bmatrix} 14.96 \\ 14.97 \\ 548.7 \\ 548.9 \end{bmatrix} °C$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} := \mathrm{reverse}(ans) = \begin{bmatrix} 548.9 \\ 548.7 \\ 14.97 \\ 14.96 \end{bmatrix} °C$$

$$T := \mathrm{stack}\left(T_{b1}, \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, T_{b2}\right) = \begin{bmatrix} 550 \\ 548.9 \\ 548.7 \\ 14.97 \\ 14.96 \\ 10 \end{bmatrix} °C$$

Рис. 8.16 Формирование итогового ответа в задаче о паропроводе

Полученный ответ требует проверки, что было сделано – см. рис. 8.17. После проверки был подсчитаны и тепловые потоки – потери тепла в паропроводе.

$$r_1 \cdot \alpha_1 \cdot \left(T_{b1} - T_1 \right) = 74.82 \ \frac{W}{m}$$

$$\frac{\lambda_{12} \cdot \left(T_1 - T_2 \right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1} \right)} = 74.82 \ \frac{W}{m}$$

$$\frac{\lambda_{23} \cdot \left(T_2 - T_3 \right)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2} \right)} = 74.82 \ \frac{W}{m}$$

$$\frac{\lambda_{34} \cdot \left(T_3 - T_4 \right)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3} \right)} = 74.82 \ \frac{W}{m}$$

$$q := r_4 \cdot \alpha_2 \cdot \left(T_4 - T_{b2} \right) = 74.82 \ \frac{W}{m}$$

$$Q := q \cdot L = 1.496 \ kW \quad Q = 1287 \ \frac{kcal}{hr}$$

Рис. 8.17 Проверка аналитического решения задачи о паропроводе

Задачу можно решить и численно (см. рис. 8.18) с обращением к функции `roots`, встроенной в SMath.

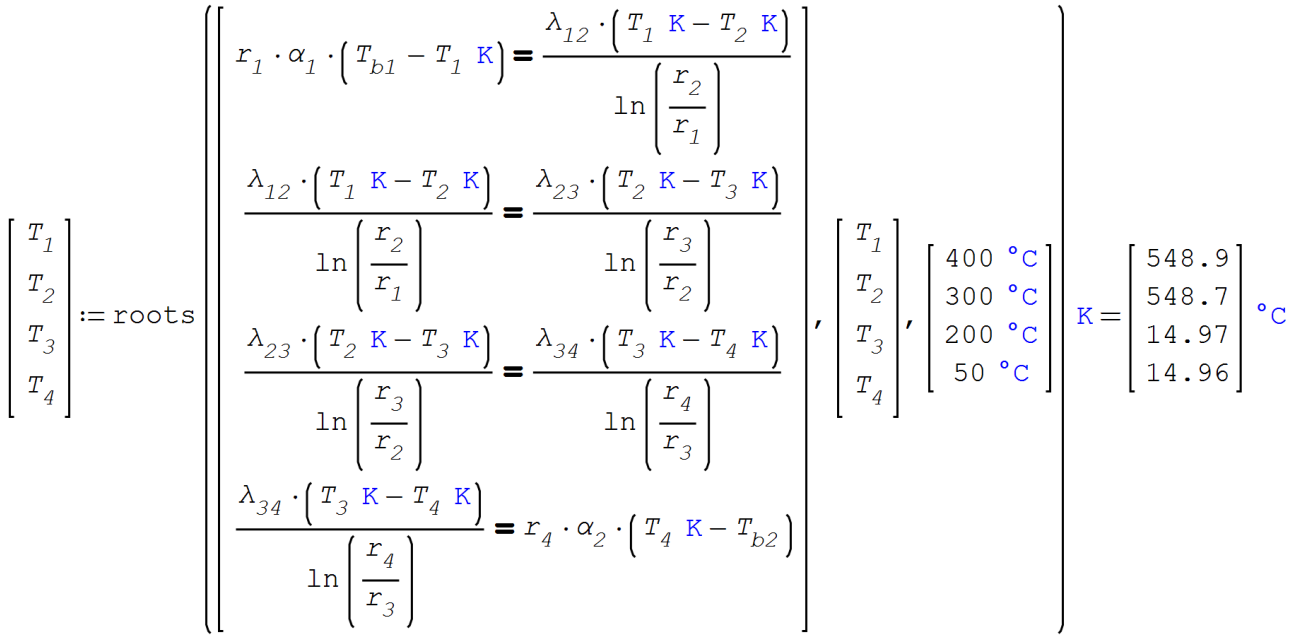


Рис. 8.18 Численное решение задаче о паропроводе

Несложно сообразить, что наша система четырех уравнений линейная, и решить её соответствующим способом (рис. 8.19) через формирование квадратной матрицы M коэффициентов при неизвестных, а также вектора свободных членов V. Перед решением следует убедиться, что определитель матрицы M не равен нулю. После этого можно найти обратную (инвертированную) матрицу M_{inv}, умножение которой на матрицу M дает единичную матрицу. В ней на главной диагонали стоят единицы, а вместо нулей числа, близкие к нулю как следствие того, что используется численная математика – математика приближенных вычислений. Умножение инвертированной матрицы на вектор свободных членов дает искомый ответ.

$$k1 := \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot r_1 \cdot \alpha_1 \qquad k2 := \frac{\lambda_{12}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$k3 := \frac{\lambda_{23}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}$$

$$k4 := \frac{\lambda_{34}}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \qquad k5 := \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \cdot r_4 \cdot \alpha_2$$

$$M := \begin{bmatrix} \lambda_{12} + k1 & -\lambda_{12} & 0 & 0 \\ -k2 & k3 + k2 & -k3 & 0 \\ 0 & -k3 & k4 + k3 & -k4 \\ 0 & 0 & -\lambda_{34} & k5 + \lambda_{34} \end{bmatrix} \qquad V := \begin{bmatrix} k1 \cdot T_{b1} \\ 0 \\ 0 \\ k5 \cdot T_{b2} \end{bmatrix}$$

$$|M| = 3.527 \cdot 10^{6} \ \frac{\mathrm{kg}^{4}\ \mathrm{m}^{4}}{\mathrm{K}^{4}\ \mathrm{s}^{12}}$$

$$M_{inv} := M^{-1} = \begin{bmatrix} 0.09808 & 0.01512 & 0.0001394 & 0.02326 \\ 0.09805 & 0.01731 & 0.0001596 & 0.02664 \\ 0.0009041 & 0.0001596 & 0.06578 & 10.98 \\ 0.0009025 & 0.0001593 & 0.06566 & 10.98 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{K\ s}^{3}}{\mathrm{m\ kg}}$$

$$M \cdot M_{inv} = \begin{bmatrix} 1 & 5.3 \cdot 10^{-16} & 1.9 \cdot 10^{-17} & 2.2 \cdot 10^{-15} \\ -1.8 \cdot 10^{-14} & 1 & -1.4 \cdot 10^{-16} & -1.5 \cdot 10^{-14} \\ -1.8 \cdot 10^{-14} & -2.2 \cdot 10^{-15} & 1 & 3.3 \cdot 10^{-11} \\ 1 \cdot 10^{-16} & 1.2 \cdot 10^{-17} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} := M_{inv} \cdot V = \begin{bmatrix} 548.9 \\ 548.7 \\ 14.97 \\ 14.96 \end{bmatrix} {}^{\circ}\mathrm{C} \qquad M \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8375 \\ 3.755 \cdot 10^{-10} \\ -2.001 \cdot 10^{-9} \\ 25.56 \end{bmatrix} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}}$$

Рис. 8.19 Решение системы линейных алгебраических уравнений трехслойного паропровода

Из трех приведенных выше решений предпочтительным будет второе. Дело в том, что значения теплопроводности λ_{12}, λ_{23} и λ_{34} материала слоев паропровода (рис. 8.15) на практике оказываются не константами, а функциями, зависящими от температуры. В этом случае аналитического решения (рис. 8.14) может не быть, а работа с матрицей и вектором (8.19) станет невозможной. Здесь придется работать с численными методами (рис. 8.18), заменяя выражение $\lambda \cdot \Delta T$ на интеграл с температурой в пределах.

Постановка и решение задачи о трехслойной цилиндрической стенке были сделаны на сайте пользователей SMath https://en.smath.com/forum/yaf_poststst25266_Solve-the-equation--linear.aspx.

Задание студентам

1. Перестройте диаграмму на рис. 8.5 в координатах h и s, а также в координатах T и h.
2. Перестройте диаграмму на рис. 8.9 в координатах T и s, а также в координатах T и h.
3. Постройте "живую" диаграмму, «мертвый» вариант которой показан на рис. 8.1. И не только h, s, но и T, s и T, h диаграммы. Исходные данные возьмите из интерактивного расчёта турбины К-300-240 – см. http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/Exp_Steam_K_300_240_LMZ.html.

Литература

1. Цветков Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену: учебное пособие / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. — 2-е изд., исправ. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 196 с., ил. (https://studfile.net/preview/6812655)
2. Решение задач теплообмена в среде SMath Studio: практич. пособие / В.Ф. Очков, Ю.В. Шацких. - М.: Издательство МЭИ, 2023. - 48 с.

Глава 9. Паротурбинный цикл АЭС
или
Считаем снизу вверх

В главе 3 мы рассказали 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. [1] и рис. 9.1.

Рис. 9.1 Схема атомовоза

На железных дорогах атомные поезда так и не появились[45], 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. 9.1), 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. 9.2.

[45] В интернете можно найти интересное фото: поезд не успел затормозить перед тупиком на вокзале, пробил вокзальное здание и выкатился на привокзальную площадь. Этот поезд был с обычным паровозом. А что бы произошло, если б у этого паровоза топка была бы не угольная, а урановая!? См. также сноску 21 во Ведении.

Рис. 9.2 Компоновка плавучей атомной теплоэлектростанции

А давайте оценим КПД типичной ядерной энергетической установки, которая могла бы быть установлена и на локомотиве (рис. 9.1), и на барже. И применим при этом несколько экзотический способ расчета: не сверху вниз (так мы поступали ранее), а снизу вверх.

На рисунке. 9.3 показана принципиальная схема паротурбинного блока ВВЭР – водо-водяного 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 9.2 можно видеть контур реактора, справа и слева от которого установлены парогенераторы вертикального типа[46]. 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 ЦНД. Без таких усложнений схемы паротурбинного блока (цикла Ренкина) влажность пара на последних ступенях турбины была бы недопустимо высокой, что будет показано на диаграммах ниже.

[46] Ранее термин «парогенератор» применялся и для обозначения также и паровых котлов на органическом топливе. Но после появления АЭС современное значение этого термина стало вытеснять первоначальное. В МЭИ когда-то была кафедра ПГЭС (Парогенераторы электростанций), которую переименовали в КУиЭЭ (Котельные установки и экология энергетики). Отечественные парогенераторы на АЭС, как правило, горизонтальные, а зарубежные вертикальные.

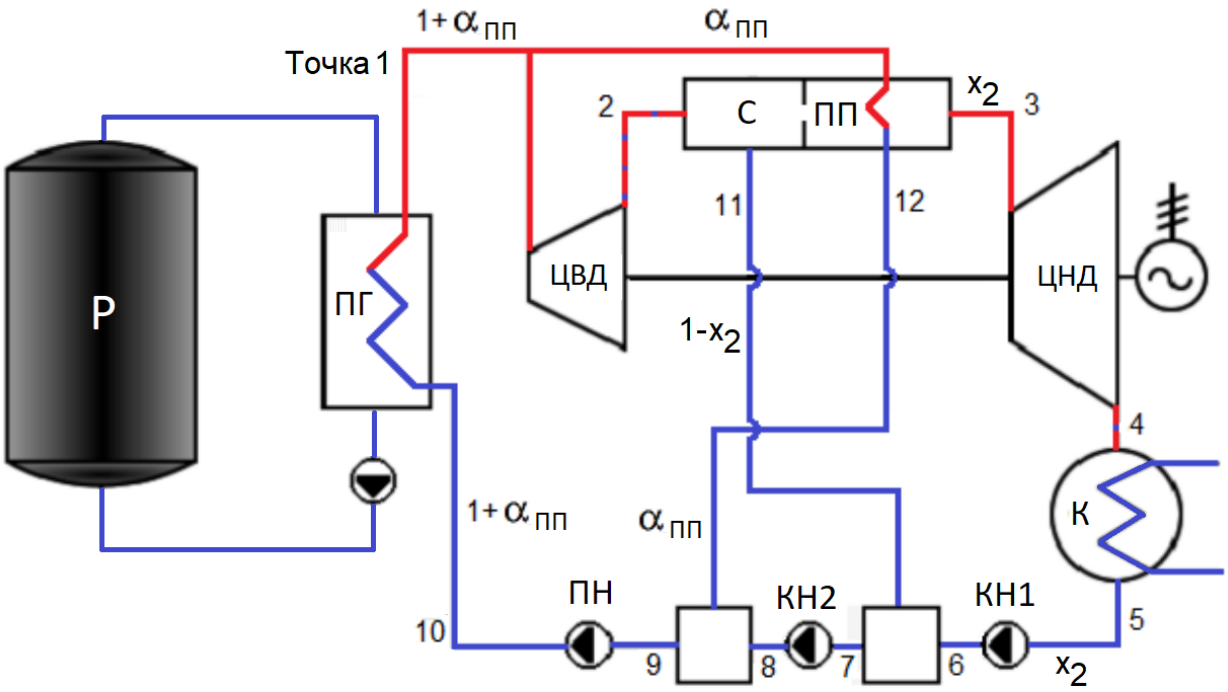


Рис. 9.3 Схема паротурбинного блока АЭС с ВВЭР, принятая к расчету

На рисунке 9.4 показан ввод исходных данных – известных (входных) параметров для расчета термического КПД энергоблока (η_T) – отношение полезной работы к подведенному теплу.

$p_1 := 6.2\ \text{MPa}$ $\quad \eta_{oi_цвд} := 89\ \%$

$p_2 := 0.5\ \text{MPa}$ $\quad \eta_{oi_цнд} := 86\ \%$

$p_4 := 4\ \text{kPa}$ $\quad \eta_{oi_н} := 80\ \%$

$T_3 := 250\ °\text{C}$ $\quad \alpha_{пп} := 11\ \%$

$wf := \text{"H2O"}$

$p_{10} := (1 + 5\ \%) \cdot p_1 = 6.510\ \text{MPa}$

Рис. 9.4 Исходные данные для расчета термического КПД цикла АЭС с ВВЭР

На рисунке 9.5 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 находиться на линии насыщения. Функции на рис. 9.5 – это аналоги функций `wspHEXPANSIONPTPEFF` и `wspHEXPANSIONPTXPEFF` с четырьмя или пятью аргументами авторского пакета

WaterSteamPro, который наряду с пакетом CoolPro Wrapper используется для решения задач этого учебного пособия.

Функции пользователя

$$h_{ExpansionPPEFF}(p_0, p_1, \eta) := \left|\begin{array}{l} \text{"Расширение пара в ЦВД"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_0, \text{"Q"}, 1, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, p_0, \text{"Q"}, 1, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 - (h_0 - h_1) \cdot \eta \end{array}\right.$$

$$h_{ExpansionPTPEFF}(p_0, T_0, p_1, \eta) := \left|\begin{array}{l} \text{"Расширение пара в ЦНД"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_0, \text{"T"}, T_0, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, p_0, \text{"Q"}, 1, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 - (h_0 - h_1) \cdot \eta \end{array}\right.$$

$$h_{CompressionPPEFF}(p_0, p_1, \eta) := \left|\begin{array}{l} \text{"Сжатие воды в КН1"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_0, \text{"Q"}, 0, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, p_0, \text{"Q"}, 0, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 + \dfrac{h_1 - h_0}{\eta} \end{array}\right.$$

$$h_{CompressionPTPEFF}(p_0, T_0, p_1, \eta) := \left|\begin{array}{l} \text{"Сжатие воды в КН2 и ПН"} \\ h_0 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_0, \text{"T"}, T_0, wf) \\ s := \text{CoolProp_Props}(\text{"S"}, \text{"P"}, p_0, \text{"T"}, T_0, wf) \\ h_1 := \text{CoolProp_Props}(\text{"H"}, \text{"P"}, p_1, \text{"S"}, s, wf) \\ h_0 + \dfrac{h_1 - h_0}{\eta} \end{array}\right.$$

Рис. 9.5 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. 9.3 и 9.4 вход в паровую турбину обозначен цифрой 1. Дело в том, что аргументы функций на рис. 9.5 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. 9.5), и в насосе (последние две функции), а давление p_1 – это *конечное* давление и в паровой турбине (две первые функции на рис. 9.5), и в насосе (последние две функции).

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

Из рисунка 9.6 видно, что пользователь после задания исходных данных (рис. 9.4) и определения функций пользователя (рис. 9.5) 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).

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

l.ЦВД - неопределено.

Рис. 9.6 Начало расчета

Чтобы исправить эту ошибку, выше формулы[47], показанной на рис. 9.6, вводится формула для расчета $l_{цвд}$. Возникает новая аналогичная ошибка, которую исправляют аналогичным методом – см. рис. 9.7-9.9.

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

h.1 - неопределено.

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

Рис. 9.7 Продолжение расчёта, показанного на рис. 9.6

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

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

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

[47] В формуле для расчета удельной работы цилиндра высокого давления на рис. 9.8 присутствует единица, которую можно спутать с латинской прописной буквой эль. Отличаются они шрифтом – прямым и курсивом.

Рис. 9.8 Продолжение расчёта, показанного на рис. 9.7

$$h_2 := h_{ExpansionPPEFF}\left(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}\right) = 2394\ \frac{kJ}{kg}$$

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

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

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

l.ЦНД - неопределено.

Рис. 9.9 Продолжение расчёта, показанного на рис. 9.8

Из рисунка 9.9 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 расчета, 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. 9.10 и пункт 3 задания читателям.

$$a = \blacksquare\ \blacksquare$$

a - неопределено.

$$a := 1$$

$$a = 1$$

$$\sim a = 1$$

$$\sim a := 1$$

$$\sim a = 1$$

$$\pi = 3.142$$

$$e = 2.718$$

Рис. 9.10 ввод в расчет глобальной переменной

Следуя запросам расчёта – следя за красной подсветкой не заданных переменных, отображенных на рис. 9.6-9.9, и проводя в некоторых местах перестановку расчётных операторов, можно в коне концов получить итоговый расчёт, показанный на рис. 9.11, с итоговой формулой внизу.

$$p_6 := p_2$$

$$p_5 := p_4$$

$$h_6 := h_{CompressionPPEFF}\left(p_5, p_6, \eta_{oi_H}\right) = 122.0\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 := h_{ExpansionPPEFF}\left(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}\right) = 2394\ \frac{kJ}{kg}$$

$$x_2 := CoolProp_Props\left("Q", "P", p_2, "H", h_2, wf\right) = 83.20\ \%$$

$$h_{11} := CoolProp_Props\left("H", "P", p_2, "Q", 0, wf\right) = 640.1\ \frac{kJ}{kg}$$

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

$$p_7 := p_2$$

$$T_7 := CoolProp_Props\left("T", "P", p_7, "H", h_7, wf\right) = 49.83\ °C$$

$$p_8 := p_1$$

$$h_8 := h_{CompressionPTPEFF}\left(p_7, T_7, p_8, \eta_{oi_H}\right) = 216.2\ \frac{kJ}{kg}$$

$$p_3 := p_2$$

$$h_3 := CoolProp_Props\left("H", "P", p_3, "T", T_3, wf\right) = 2961\ \frac{kJ}{kg}$$

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

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

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

$$T_9 := CoolProp_Props\left("T", "P", p_{10}, "H", h_9, wf\right) = 73.01\ °C$$

$$h_{10} := h_{CompressionPTPEFF}\left(p_1, T_9, p_{10}, \eta_{oi_H}\right) = 311.1\ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_{ПГ} := \left(1 + \alpha_{ПП}\right) \cdot \left(h_1 - h_{10}\right) = 2743\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 := h_{ExpansionPPEFF}\left(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}\right) = 2394\ \frac{kJ}{kg}$$

$$l_{ПН} := \left(1 + \alpha_{ПП}\right) \cdot \left(h_{10} - h_9\right) = 0.1604\ \frac{kJ}{kg}$$

$$l_{КН2} := 1 \cdot \left(h_8 - h_7\right) = 7.201\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_5 := CoolProp_Props\left("H", "P", p_4, "Q", 0, wf\right) = 121.4\ \frac{kJ}{kg}$$

$$l_{КН1} := x_2 \cdot \left(h_6 - h_5\right) = 0.5179\ \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 := h_{ExpansionPTPEFF}\left(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi_ЦНД}\right) = 2181\ \frac{kJ}{kg}$$

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

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

$$\eta_T := \frac{l_{ЦВД} + l_{ЦНД} - l_{КН1} - l_{КН2} - l_{ПН}}{q_{ПГ}} = 37.52\ \%$$

Рис. 9.11 Итоговый расчет с искомым ответом

Операторы, показанные на рис. 9.11, можно не писать отдельно, а объединить в программный блок через команду панели программирования `Line` и последующие запятые, расширяющие блок. Получиться 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[48] – 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. 9.12, которая подсвечена семь раз. Второе же преимущество такое – расчёт очень просто преобразовать в функцию и работать уже с ней – см. рис. 9.13 с графиком зависимости КПД от температуры T_3.

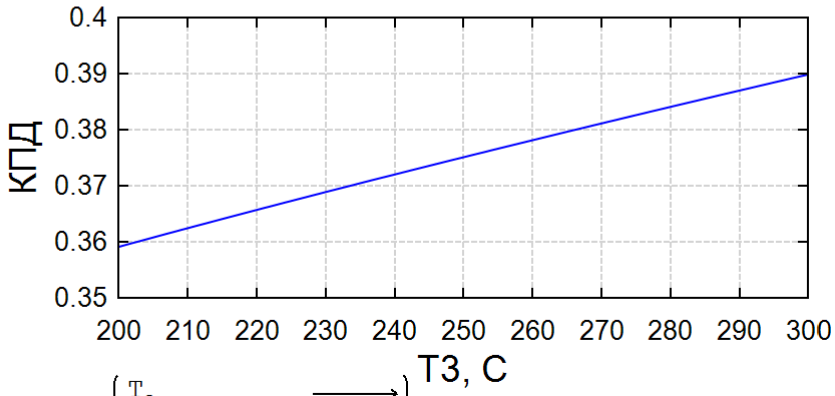
[48] Авторы отправили запрос на сайт пользователей SMath с просьбой исправить этот недостаток – см. https://en.smath.com/forum/yaf_poststt25260_It-will-be-very-good.aspx.

$$p_6 := p_2 \qquad = 37.52\ \%$$
$$p_5 := p_4$$
$$h_6 := h_{CompressionPPEFF}\left(p_5, p_6, \eta_{oi_H}\right)$$
$$h_2 := h_{ExpansionPPEFF}\left(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}\right)$$
$$x_2 := \text{CoolProp_Props}\left("Q", "P", p_2, "H", h_2, wf\right)$$
$$h_{11} := \text{CoolProp_Props}\left("H", "P", p_2, "Q", 0, wf\right)$$
$$h_7 := x_2 \cdot h_6 + \left(1 - x_2\right) \cdot h_{11}$$
$$p_7 := p_2$$
$$T_7 := \text{CoolProp_Props}\left("T", "P", p_7, "H", h_7, wf\right)$$
$$p_8 := p_1$$
$$h_8 := h_{CompressionPTPEFF}\left(p_7, T_7, p_8, \eta_{oi_H}\right)$$
$$p_3 := p_2$$
$$h_3 := \text{CoolProp_Props}\left("H", "P", p_3, "T", T_3, wf\right)$$
$$h_1 := \text{CoolProp_Props}\left("H", "P", p_1, "Q", 1, wf\right)$$
$$h_{12} := \frac{1 \cdot h_2 + \alpha_{ПП} \cdot h_1 - \left(1 - x_2\right) \cdot h_{11} - x_2 \cdot h_3}{\alpha_{ПП}}$$
$$h_9 := \frac{\alpha_{ПП} \cdot h_{12} + 1 \cdot h_8}{1 + \alpha_{ПП}}$$
$$T_9 := \text{CoolProp_Props}\left("T", "P", p_{10}, "H", h_9, wf\right)$$
$$h_{10} := h_{CompressionPTPEFF}\left(p_1, T_9, p_{10}, \eta_{oi_H}\right)$$
$$q_{ПГ} := \left(1 + \alpha_{ПП}\right) \cdot \left(h_1 - h_{10}\right)$$
$$h_2 := h_{ExpansionPPEFF}\left(p_1, p_2, \eta_{oi_ЦВД}\right)$$
$$l_{ПН} := \left(1 + \alpha_{ПП}\right) \cdot \left(h_{10} - h_9\right)$$
$$l_{КН2} := 1 \cdot \left(h_8 - h_7\right)$$
$$h_5 := \text{CoolProp_Props}\left("H", "P", p_4, "Q", 0, wf\right)$$
$$l_{КН1} := x_2 \cdot \left(h_6 - h_5\right)$$
$$h_4 := h_{ExpansionPTPEFF}\left(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi_ЦНД}\right)$$
$$l_{ЦНД} := x_2 \cdot \left(h_3 - h_4\right)$$
$$l_{ЦВД} := 1 \cdot \left(h_1 - h_2\right)$$
$$\eta_T := \frac{l_{ЦВД} + l_{ЦНД} - l_{КН1} - l_{КН2} - l_{ПН}}{q_{ПГ}}$$

Рис. 9.12 Итоговый расчет с искомым ответом

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

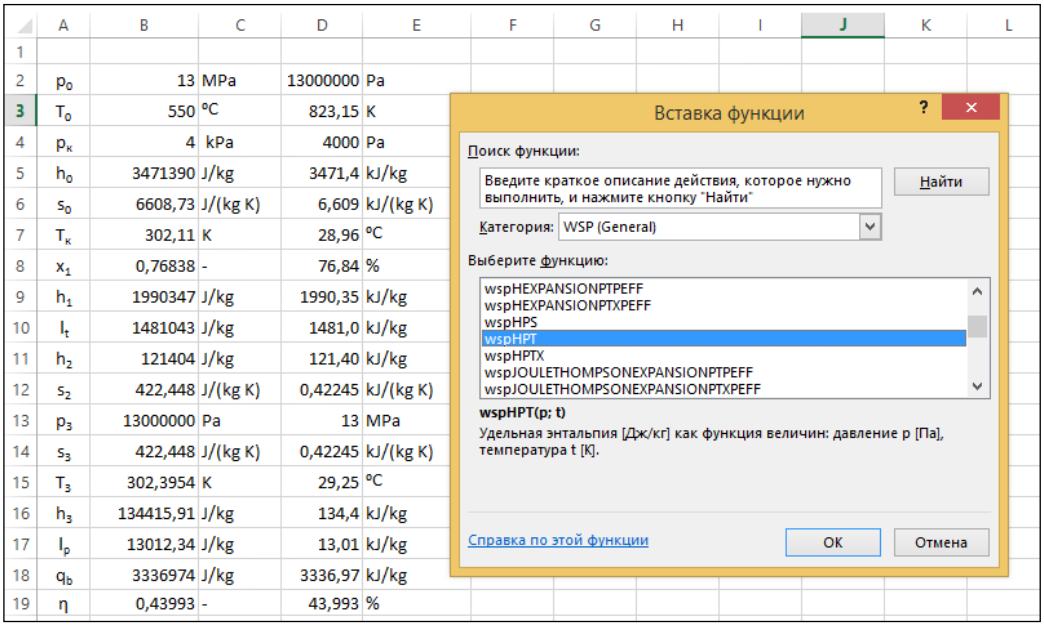
$\eta_T(250\ °C) = 0.3752$ $\quad T_3 := [(200\ °C), 201\ °C .. (300\ °C)]$



$\text{augment}\left(\frac{T_3}{K} - 273.15, \overrightarrow{\eta_T(T_3)}\right)$

Рис. 9.13 Превращение программы в функцию

Выделение подсветкой отдельных переменных расчёта (см. рис. 9.12) помогает отладке – нахождению в нем ошибок. Такой инструмент имеется, например, в среде Excel. Многие студенты, аспиранты, инженеры и научно-технические работники проводят расчеты в среде этого "бухгалтерского" табличного процессора. На рис. 9.14 показана таблица Excel, к которой прикреплены функции пакета WaterSteamPro. Их список можно видеть в диалоговом окне Excel вставки функций, показанном на этом же рисунке. Это позволило рассчитать КПД простейшего паротурбинного цикла. Исходные данные введены в ячейки **B2**, **B3** и **B4**. Остальные ячейки столбца **B** заполнены формулами, по которым ведутся расчеты. Эти формулы показаны на рис. 9.15. Такой показ становится возможным после выполнения команды **Показать формулы** на вкладе **Формулы**.



	A	B	C	D	E
1					
2	p_0	13	MPa	13000000	Pa
3	T_0	550	°C	823,15	K
4	$p_к$	4	kPa	4000	Pa
5	h_0	3471390	J/kg	3471,4	kJ/kg
6	s_0	6608,73	J/(kg K)	6,609	kJ/(kg K)
7	$T_к$	302,11	K	28,96	°C
8	x_1	0,76838	-	76,84	%
9	h_1	1990347	J/kg	1990,35	kJ/kg
10	l_t	1481043	J/kg	1481,0	kJ/kg
11	h_2	121404	J/kg	121,40	kJ/kg
12	s_2	422,448	J/(kg K)	0,42245	kJ/(kg K)
13	p_3	13000000	Pa	13	MPa
14	s_3	422,448	J/(kg K)	0,42245	kJ/(kg K)
15	T_3	302,3954	K	29,25	°C
16	h_3	134415,91	J/kg	134,4	kJ/kg
17	l_p	13012,34	J/kg	13,01	kJ/kg
18	q_b	3336974	J/kg	3336,97	kJ/kg
19	η	0,43993	-	43,993	%

Рис. 9.14 Расчет КПД простейшего паротурбинного цикла в среде Excel с использованием функций пакета WaterSteamPro

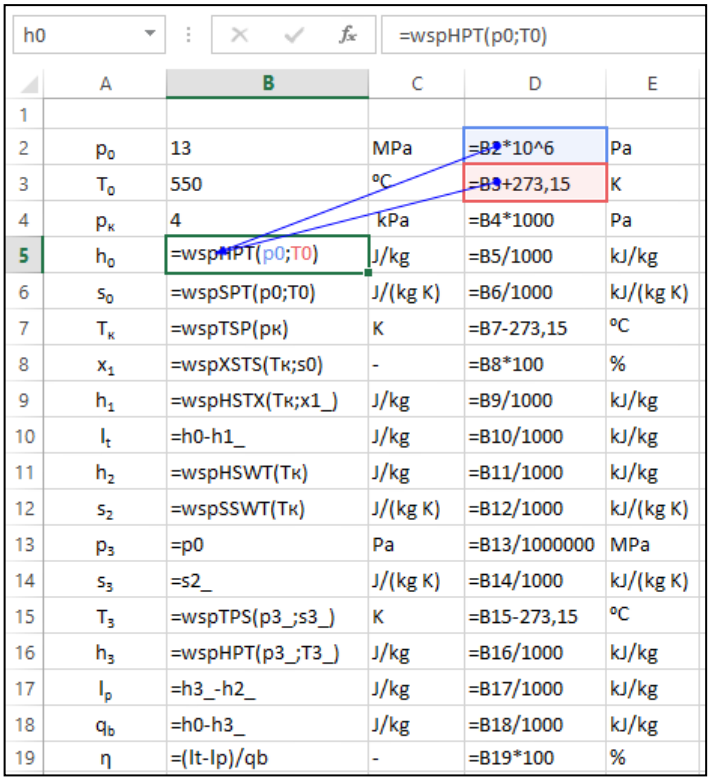
Сравнивая рисунок 9.11 (SMath) с рисунками 9.14 и 9.15 (Excel), можно лишний раз убедиться в том, что работа с табличным процессором намного труднее и запутаннее, чем работа с инженерным калькулятором SMath. В среде SMath, во-первых, мы освобождены от пересчетов единиц измерения и, во-вторых, одновременно видим формулу и результат ее работы. А в-третьих и главных, формулы в среде SMath записаны в привычном виде (числитель вверху, а знаменатель внизу дроби и т. д.), а не в виде текстовых строк: сравните, например, запись формулы термического КПД цикла, показанного в конце рис. 9.11, и в ячейке **B19** на рис. 9.15. Все это, как мы уже не раз отмечали, намного упрощает создание и отладку расчета, его модернизацию в будущем.

	A	B	C	D	E
1					
2	p_0	13	MPa	=B2*10^6	Pa
3	T_0	550	°C	=B3+273,15	K
4	$p_к$	4	kPa	=B4*1000	Pa
5	h_0	=wspHPT(D2;D3)	J/kg	=B5/1000	kJ/kg
6	s_0	=wspSPT(D2;D3)	J/(kg K)	=B6/1000	kJ/(kg K)
7	$T_к$	=wspTSP(D4)	K	=B7-273,15	°C
8	x_1	=wspXSTS(B7;B6)	-	=B8*100	%
9	h_1	=wspHSTX(B7;B8)	J/kg	=B9/1000	kJ/kg
10	l_t	=B5-B9	J/kg	=B10/1000	kJ/kg
11	h_2	=wspHSWT(B7)	J/kg	=B11/1000	kJ/kg
12	s_2	=wspSSWT(B7)	J/(kg K)	=B12/1000	kJ/(kg K)
13	p_3	=D2	Pa	=B13/1000000	MPa
14	s_3	=B12	J/(kg K)	=B14/1000	kJ/(kg K)
15	T_3	=wspTPS(B13;B14)	K	=B15-273,15	°C
16	h_3	=wspHPT(B13;B15)	J/kg	=B16/1000	kJ/kg
17	l_p	=B16-B11	J/kg	=B17/1000	kJ/kg
18	q_b	=B5-B16	J/kg	=B18/1000	kJ/kg
19	η	=(B10-B17)/B18	-	=B19*100	%

Рис. 9.15 Расчет КПД паротурбинного цикла в среде Excel: показ раскрытых формул

Несколько упрощает работу с формулами в среде Excel инструмент присвоения ячейкам таблицы *имен*, фиксирующих величины, которые в данной ячейке хранятся. На рис. 9.16 показан Excel-

расчёт с тем отличием, что в формулах столбца **B** фигурируют не координаты ячеек таблицы (**B5**, **D2** и т. д.), а имена этих ячеек (`h0`, `p0` и т. д.), которые им были заранее присвоены через команду **Имя диапазона**. Так ячейка таблицы **B5** в расчете, показанном на рис. 9.16, имеет имя `h0` (нижний индекс h_0 тут недопустим) и хранит удельную энтальпию водяного пара, поступающего в турбину. Этот параметр рассчитывается с помощью функции `wspHPT(p0; T0)`, аргументы которой, хранятся в ячейках **D2** и **D3**, с именами `p0` и `T0` соответственно. На рис. 9.16 эта связь дополнительно отображена через команду **Влияющие ячейки** вкладки **Формулы**.



	A	B	C	D	E
1					
2	p_0	13	MPa	=B2*10^6	Pa
3	T_0	550	°C	=B3+273,15	K
4	$p_к$	4	kPa	=B4*1000	Pa
5	h_0	=wspHPT(p0;T0)	J/kg	=B5/1000	kJ/kg
6	s_0	=wspSPT(p0;T0)	J/(kg K)	=B6/1000	kJ/(kg K)
7	$T_к$	=wspTSP(pк)	K	=B7-273,15	°C
8	x_1	=wspXSTS(Tк;s0)	-	=B8*100	%
9	h_1	=wspHSTX(Tк;x1_)	J/kg	=B9/1000	kJ/kg
10	l_t	=h0-h1_	J/kg	=B10/1000	kJ/kg
11	h_2	=wspHSWT(Tк)	J/kg	=B11/1000	kJ/kg
12	s_2	=wspSSWT(Tк)	J/(kg K)	=B12/1000	kJ/(kg K)
13	p_3	=p0	Pa	=B13/1000000	MPa
14	s_3	=s2_	J/(kg K)	=B14/1000	kJ/(kg K)
15	T_3	=wspTPS(p3_;s3_)	K	=B15-273,15	°C
16	h_3	=wspHPT(p3_;T3_)	J/kg	=B16/1000	kJ/kg
17	l_p	=h3_-h2_	J/kg	=B17/1000	kJ/kg
18	q_b	=h0-h3_	J/kg	=B18/1000	kJ/kg
19	η	=(lt-lp)/qb	-	=B19*100	%

Рис. 9.16 Расчет КПД паротурбинного цикла в среде Excel: работа с именованными ячейками

К некоторым именам ячеек таблицы, показанной на рис. 9.16, приписан "хвостик" — нижнее подчеркивание: `h1_`, `s2_` и т. д. Это сделано из-за того, что имена ячеек `h1`, `s2` и т. д. совпадают с "координатами" ячеек **H1**, **S2** и т. д. (**H1** — ячейка в столбце **H** и в строке **1**).

Для автоматизации и планирования вычислений можно нарисовать направленный граф, в котором вершины – это переменные и функции, а дуги – это связи межу ними. В экосистеме Python имеется для этогобиблиотека networkx. Методически это позволяет концентрировать внимание на решаемой в данный момент подзадаче, но требует удвоения работы: кроме написания функций, нужно описывать и взаимосвязи. Можно использовать для этого и документирование функций.

На рис. 9.17 показана схема паротурбинной установки, по которой проводился расчет. Подобных схем приведено много в данной книге. Рисуются они обычно с помощью какого-либо графического редактора (с помощью Paint, например, входящего в состав Windows) и вставляются в расчетный документ SMath. Знание схем теплотехнических устройств и их рисование "вручную" или на компьютере — это одна из форм обучения и проверки знаний студентов и специалистов-энергетиков, повышающих свою квалификацию. Второй автор книги входил в коллектив разработчиков специализированной программы для автоматизации этой работы [4]. Ознакомиться с демонстрационной версией этой программы можно на сайте **http://twt.mpei.ac.ru/CALCULON**.

На рис. 9.17 показано окно программы проверки знания схем с закруженной в неё эталонной схемой (нижняя часть) и схемой, нарисованной пользователем (верхняя часть). Прямая ссылка на этот пример — **http://twt.mpei.ac.ru/CALCULON/TWTSchemeQuest_BOOK1/TWTSchemeQuest_BOOK1.htm**. Для запуска демонстрационной программы необходимо установить специальную мультимедийную оболочку TBT Shell, ссылка на установку которой (**http://twt.mpei.ac.ru/twtshell/index.htm**) будет автоматически предложена на сайте.

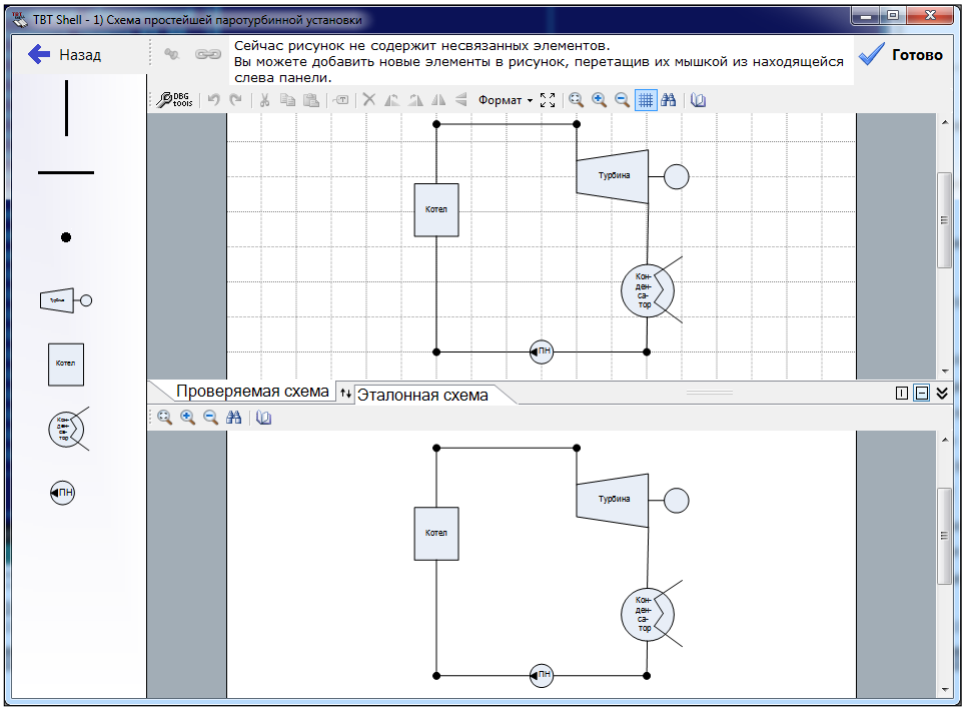


Рис. 9.17 Схема простейшей паротурбинной установки в программе автоматизированной проверки знания схем

После рисования пользователем схемы и нажатия кнопки **Готово** программа с помощью специального "хитрого" алгоритма сравнит нарисованную пользователем схему с заложенным в нее эталоном. В случае нахождения ошибок программой будет автоматически указано, что в схеме что-то отсутствует или что-то перепутано. Например, на рис. 9.18 показан результат работы программы в том случае, когда пользователь забыл нарисовать в схеме питательный насос.

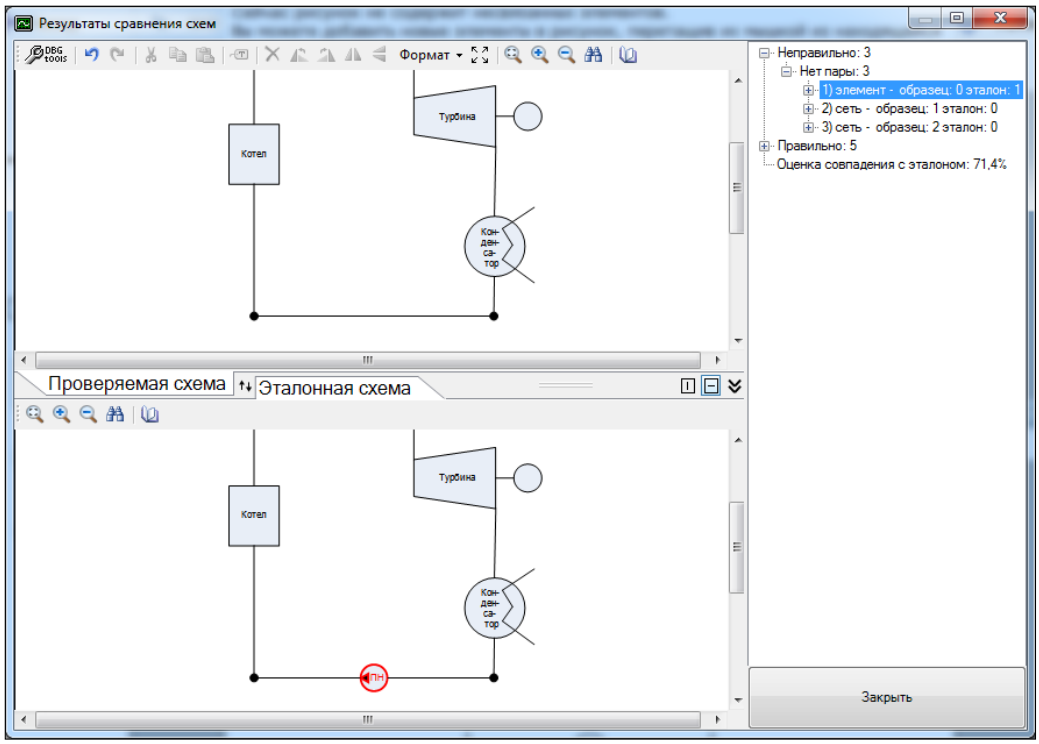


Рис. 9.18 Сравнение схемы паротурбинного блока с его эталоном

Алгоритм сравнения двух схем (названный CALCULON в честь одного мультипликационного персонажа, снимающегося в сериале "Все мои схемы") является самой важной частью этой

программы. Его подробное рассмотрение выходит за рамки этой книги, но описано на сайте программы.

За основу алгоритма сравнения графов схем взят оригинальный алгоритм Gemini II [5]. Семейство алгоритмов Gemini (Близнецы), основанных на итерационном вычислении и сравнении хеш-кодов для отдельных элементов и "сетей" графа, широко используется в электронной промышленной для решения задачи LVS (Layout-Versus-Schematic, сравнения принципиальной электрической схемы и итогового дизайна печатной платы или микросхемы).

В процессе разработки алгоритма CALCULON был внесен ряд изменений в оригинальный алгоритм, в частности, решена проблема невозможности использования "изопотенциальных сетей", т. к. сравнение технологических схем требует точного совпадения топологии "сетей" (трубопроводов, насосов, задвижек и т. п.). Кроме того, в связи с тем, что в оригинальной статье ряд вопросов рассматривается "вскользь" (например, критерии останова алгоритма, определения коэффициентов для портов элементов, изоляция ошибок и т. п. — Эбелинг только ставит эти вопросы, но о своем решении не рассказывает), то авторам пришлось искать для этих вопросов собственное оригинальное решение, что в итоге позволило им дать алгоритму другое имя — CALCULON.

Программа проверки знания схем является частью "Электронной энциклопедии энергетики" (**www.trie.ru**), в которой можно найти много теплотехнических схем с мультимедийными "прибамбасами". Одна из таких схем показана на рис. 9.19.

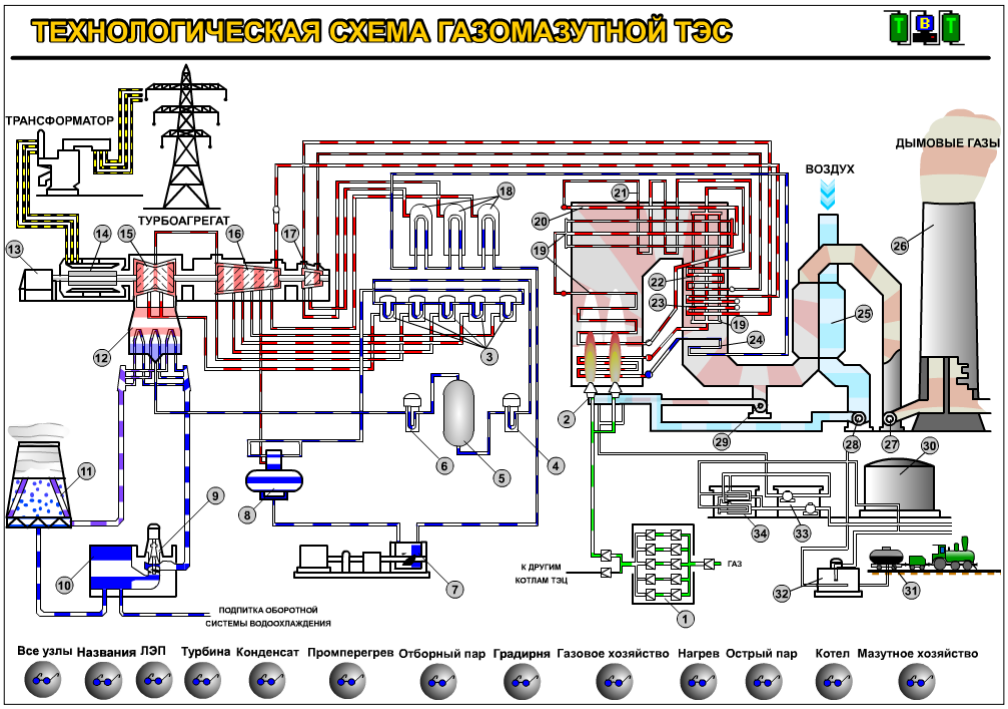


Рис. 9.19 Одна из мультимедийных теплотехнических схем "Электронной энциклопедии энергетики"

Нажимая круглые кнопки, показанные в нижней части рис. 9.19, можно выделять отдельные участки схемы электростанции. Кроме того, от данной мультимедийной схемы можно быстро переходить к соответствующим описаниям в Энциклопедии.

Традиционно мы заканчиваем расчёт термодинамического цикла АЭС с ВВЭР построением диаграмм – см. рис. 9.20, 9.22-13-15.

На рисунке 9.20 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 значение[49]. Другие же векторы создаются через вызов функций с оператором векторизации – стрелочка вправо над именем функции и её аргументами.

[49] 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рис. 9.20 Формирование векторов для построения графиков

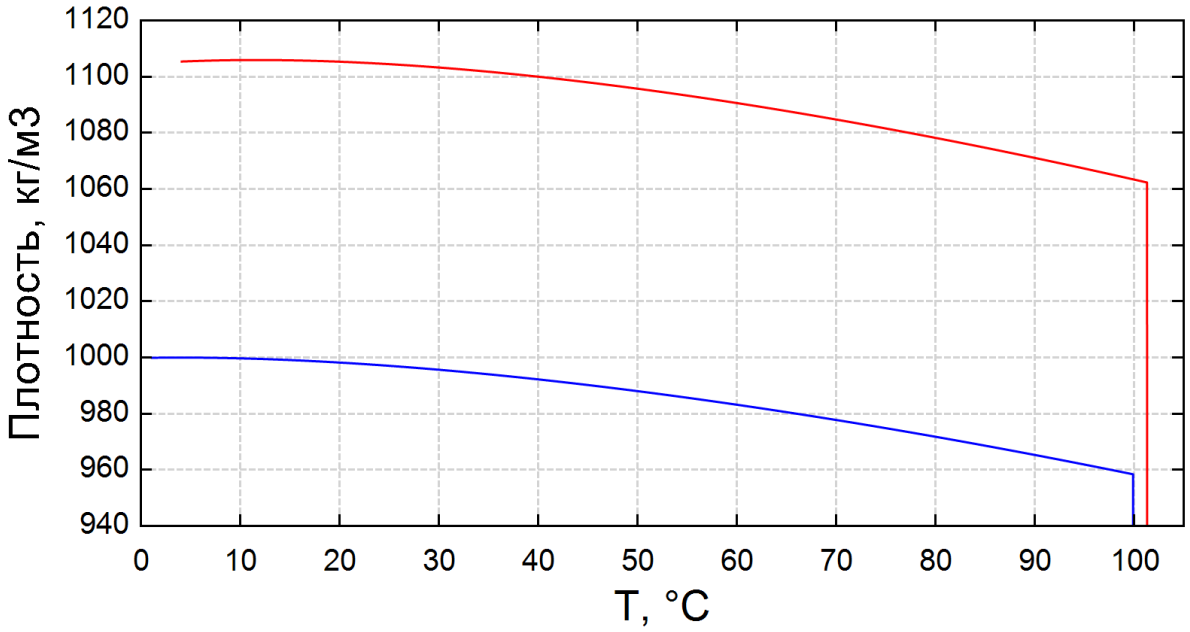
Два верхних оператора на рис. 9.20 включают функцию, возвращающую значения температуры критической и тройной точек воды. Лёгкой (обычной) воды! Если же в значении переменной *wf* (working fluid) букву H (водород) заменить на букву D (дейтерий), то… см. рис. 9.21. Тяжелая вода на АЭС иногда применяется в качестве замедлителя и теплоносителя первого контура. Если же обычную воду второго контура заменить на тяжёлую (заменить букву H на букву D в исходных данных, отображенных на рис. 9.4), то КПД цикла упадет с 37.52 % (см. конец рис. 9.11) 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. 9.21, оправдывающие названия этих двух вод.

$wf := \text{"D2O"}$ Тяжелая вода с дейтерием (D) вместо водорода (H)

$T_{cr} := \text{CoolProp_Props}(\text{"Tcrit"}, \text{""}, 0, \text{""}, 1, wf) = 370.7\ °C$

$T_{tr} := \text{CoolProp_Props}(\text{"Ttriple"}, \text{""}, 0, \text{""}, 1, wf) = 3.819\ °C$

$T_{H2O} := [(1\ °C), 1.1\ °C .. (110\ °C)]$ $T_{D2O} := [(4\ °C), 4.1\ °C .. (110\ °C)]$



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

Рис. 9.21 Тяжёлая и лёгкая вода

Из графика на рис.9.21 также видно, что при атмосферном давлении тяжёлая вода кипит не при 100, а примерно при 102 градуса Цельсия.

На рисунке 9.22 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.

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

Рис. 9.22 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 9.23-9.25 были вручную добавлены к диаграмме в среде графического редактора Paint – ещё одно «надувательство» (обман читателя), о котором говорилось во Введении (см. рис. В1).

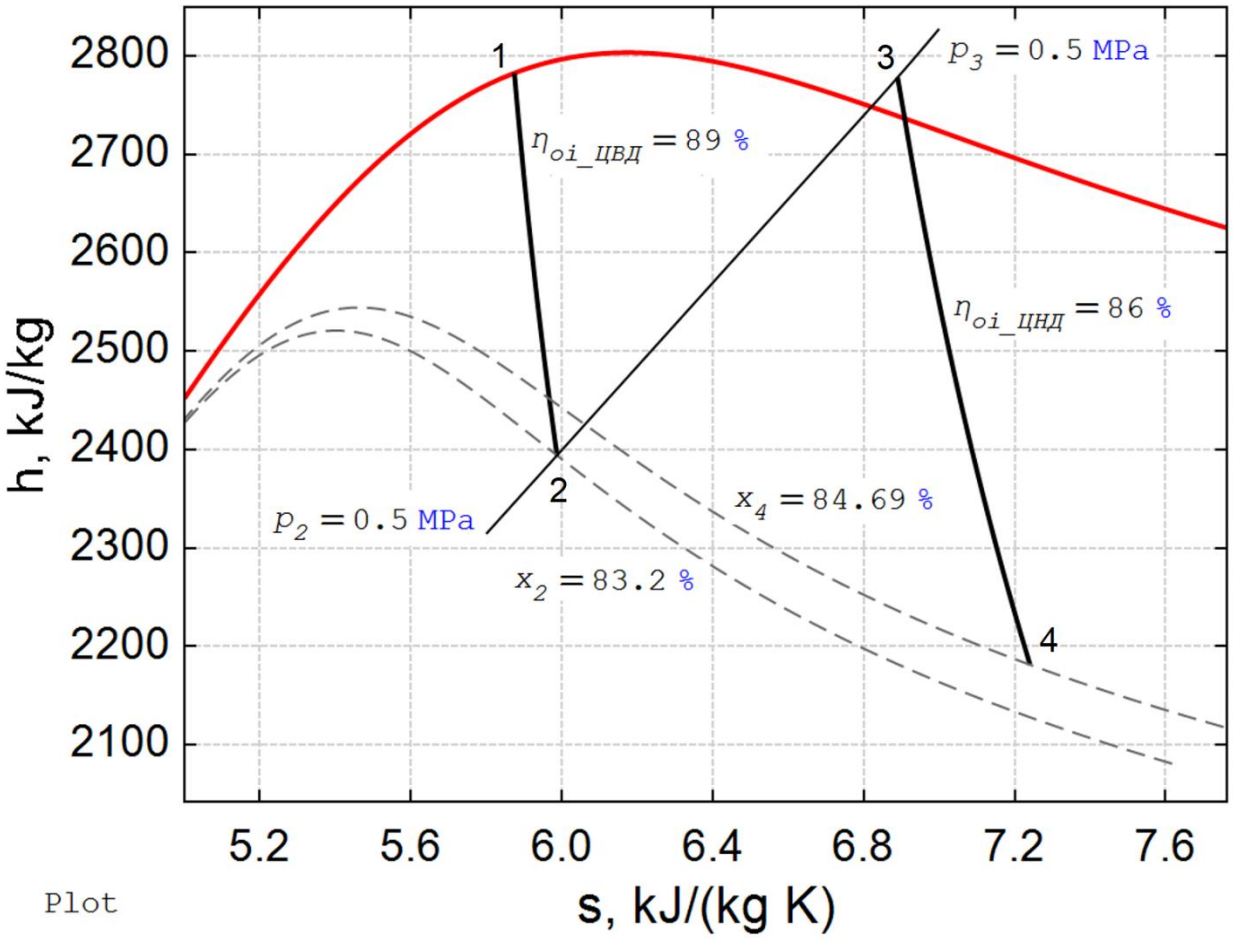


Рис. 9.23 Диаграмма 1 – реальные процессы расширения пара в цилиндрах турбины

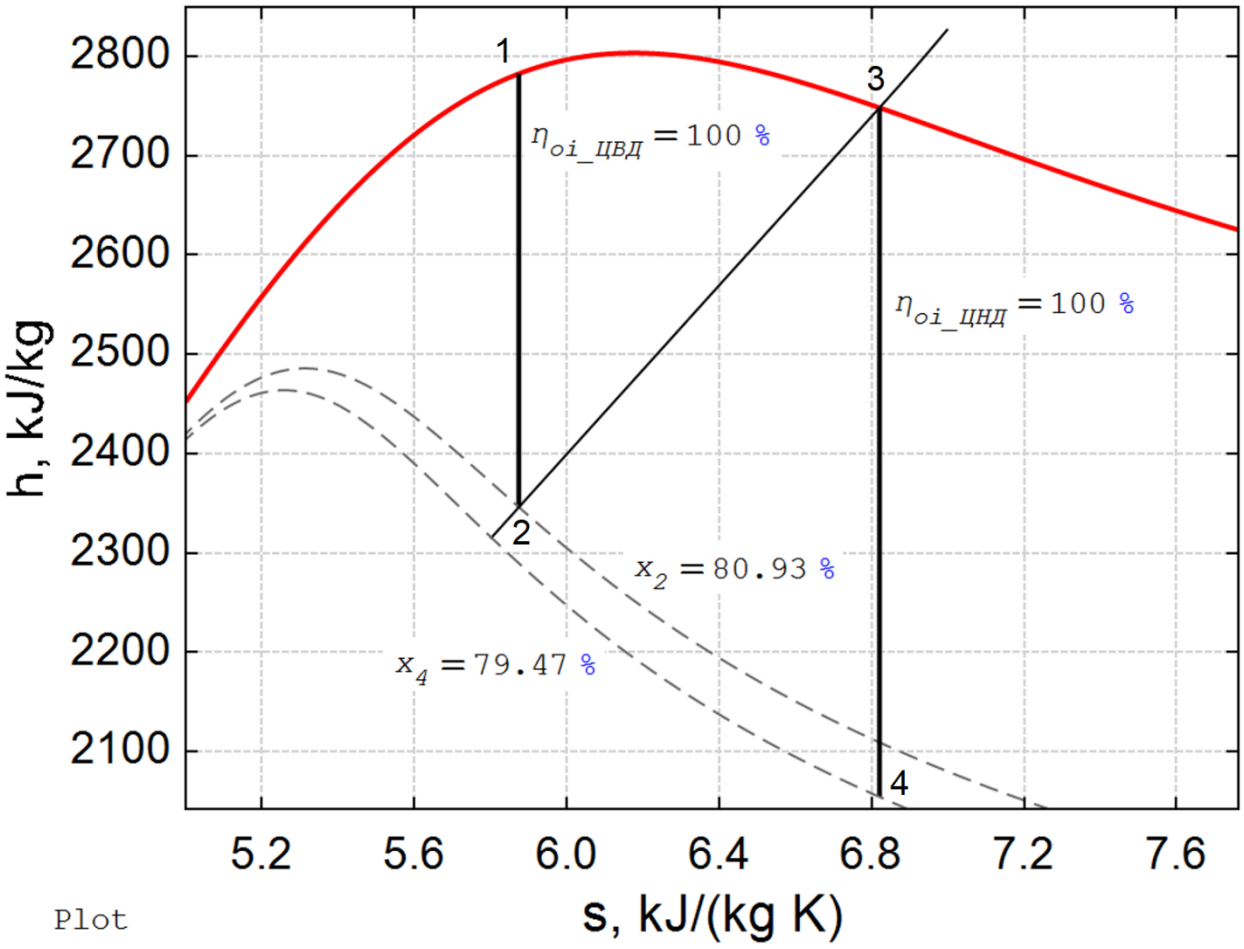


Рис. 9.24 Диаграмма 2 – идеальные процессы расширения пара в цилиндрах турбины

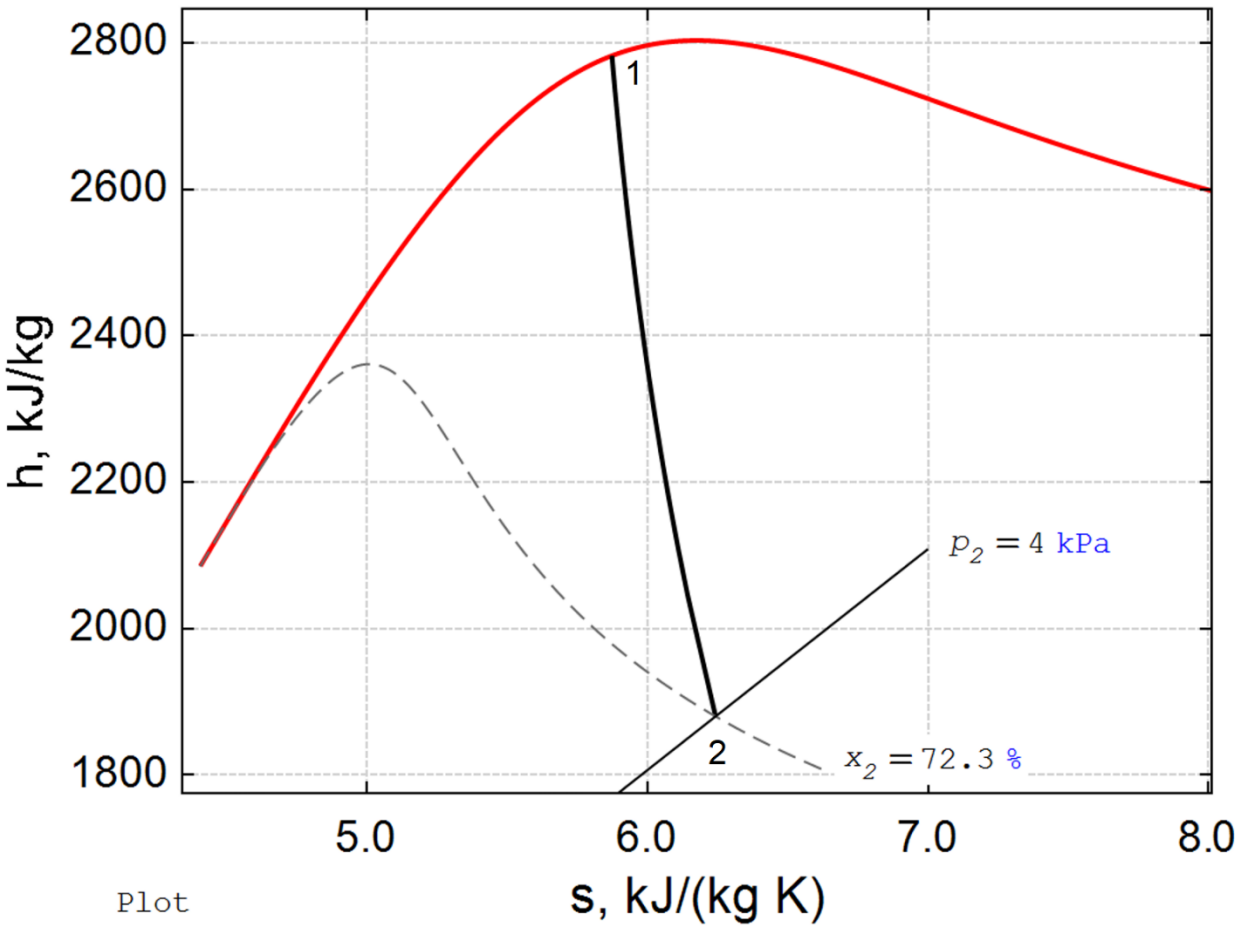


Рис. 9.25 Диаграмма 3 – процессы расширения пара в турбине без сепаратора и пароперегревателя.

Как видно из рисунка 9.25, 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 становиться 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.

Дивертисмент 1. Термодинамические мысли при взгляде на десятирублевую банкноту

Во время поездки в Красноярск для чтения лекций в местном учебном комбинате энергетиков второму автору этой книги посчастливилось посетить знаменитую Красноярскую ГЭС, которая попала на одну из банкнот Банка России (рис. 9.26).

Рис. 9.26 Реверс десятирублёвой банкноты

Сейчас этот «червонец», увы, постепенно выходит из оборота[50]. Его вытесняют монеты того же достоинства, так как изготовление таких банкнот становится дороже самой банкноты. Такая «экономика» постепенно подбирается и к пятидесятирублевой бумажке. Виной тому и инфляция, и некое суеверие. Считается, что банковская система успешной страны должна базироваться на семи банкнотах. В СССР были в ходу рубль, трешка, пятерка, уже упомянутый нами червонец, четвертной (25 рублей), «полтинник» (50 рублей) и сотня. В Европе ходят 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 500 евро, а в США – 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 100 долларов. Правда, два доллара можно встретить очень редко. Почему? Называют разные причины. Одна из них такая. Таксисты Нью-Йорка и других городов США очень суеверный народ. Они считают (считали раньше), что если в качестве первых чаевых (а они обязательны в Америке) дадут двухдолларовую бумажку, то рабочий день окажется неудачным. В современной России в ходу 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 и 5000 рублей. А 5 и 10 рублей «бумажкой» в этой «великолепной семерке» оказались лишними. Но со временем все банкноты и монеты окажутся лишними, что связано с развитием безналичных расчетов и появлением криптовалют…

Гидротехнические сооружения – мосты изображены и на евро. Мосты также можно увидеть и на российских двух- и пятитысячных купюрах. Плотины многих гидроэлектростанций заодно выполняют функцию мостов. Если, например, ехать из Волгограда в Волжский филиал МЭИ в городе Волжском, то нужно будет проехать по гребню плотины Волжской ГЭС. Волжский, Волжский, Волжский… Тут сразу возникают ассоциации с каскадом Волжских ГЭС. Да и вообще, о ГЭС стали вспоминать все чаще и чаще в связи с проблемой изменения климата. Но не в отрицательном, как раньше, а положительном аспекте. ГЭС в отличие от ТЭС на органическом топливе не выбрасывают в атмосферу углекислый газ. Наоборот – водохранилища ГЭС поглощают углекислоту атмосферы.

Но вернемся к тому, что нарисовано десятирублевой купюре – к рисунку 9.26.

Когда автор со своими коллегами из Красноярского учебного центра энергетиков подъезжал на машине к плотине ГЭС, то он вытащил из своего бумажника затесавшуюся там десятку и заслонил ею открывающийся вид электростанцию. Затем банкноту автор

[50] В Сальвадоре с 1977 по 2004 год была в ходу банкнота в 1 колон с изображением местной арочно-гравитационной плотины ГЭС.

постепенно опускал, открывая прекрасную панораму плотины… Автор повидал на Свете много врезавшихся в память архитектурных и инженерных чудес. Красноярская ГЭС – одно из таких чудес.

Мы заехали почти на гребень плотины – на смотровую площадку, минуя ещё одно уникальное гидротехническое сооружение – судоподъемник.

И вот тут-то на смотровой площадке возник вопрос, вернее, целая дискуссия о том, а для чего, собственно, на реках строят плотины? За счет чего ГЭС вырабатывает электроэнергию? Вопрос вполне законный, если учесть тот факт, что до 90% стоимости всей гидростанции – это стоимость сооружения самой плотины. Плюс побочные немалые расходы, связанные с расчисткой будущего ложа водохранилища, переносом поселков и целых городов на «сухое место», изъятием из оборота сельскохозяйственных земель, нарушением миграции рыбы, строительством судоподъемников, шлюзов и прочее, и прочее[51]. Автор в свои детские и юношеские годы смотрел в кинотеатрах перед показом фильмов кинохронику, где мощные самосвалы сбрасывали бетонные тетраэдры и камни в русло Енисея – рис. 9.27.

[51] Возник и другой вполне закономерный вопрос, связанный больше с политикой, а не с энергетикой и экономикой. А как такая крупная ГЭС, строившаяся на народные деньги как Всесоюзная комсомольская стройка, оказалась в частных руках!? Тут отвечают примерно так – в частных руках ГЭС эксплуатируется намного лучше. Но крупная авария на Саяно-Шушенской ГЭС, заставляет усомниться в этом утверждении. Если говорить не о ГЭС, а сырьевых богатствах страны, то вспоминается такая печальная шутка: «Комсомольцы «отжали» нефть у народа, затем силовики «отжали» нефть у комсомольцев, а теперь комсомольцы через суды пытаются «отжать» у того же народа компенсацию за «отжатую» силовиками нефть!».

Рис. 9.27 Покорение Енисея

Новости со строительства крупнейшей в мире по тем временам ГЭС были во всех газетах, лились из каждого радиоприемника и телевизора. Показывали, например, как люди с радостью переезжают из старых частных домов, расположенных в местах будущего затопления, в «прекрасные» пятиэтажки-хрущевки – в дома-человейники, как сейчас принято говорить в связи с реновацией.

Небольшое лирическое отступление.

Фото на рис. 9.27 заставляет вспомнить сцену из пьесы Виктора Розова «В поисках радости». Её экранизация с прекрасной игрой молодого Олега Табакова называется «Шумный день».

«*Леночка.* Мама, Федя действительно сейчас имеет много дополнительной работы, но нам надо купить и то, и другое, и третье... Мне самой его жаль, но это временно – когда мы заведем все…
Таня (Леночке). Ты никогда не заведешь все.
Леночка. Почему это?
Таня. Потому что ты – прорва!»

При перекрытии рек также нередко образуются прорвы, которые приходится заделывать в спешном порядке. «Старый муж, грозный муж» Катерины Измайловой из повести Лескова «Леди Макбет Мценского уезда» на грех оставил её одну в доме – уехал ликвидировать прорву на мельничной плотине. Мы знаем, чем это кончилось…

Но люди на рисунке 9.27 не «затыкают прорву» – они покоряют Енисей! Хотя мысль о «прорве» здесь тоже возникает. И вот почему.

Современное общество – общество потребления представляет из себя некую огромную прорву мирового масштаба. Многие думающие люди понимают, что мы идем к катастрофе и ничего не можем с собой поделать. Силы природы или божественные силы (кто как для себя считает) вмешались в этот процесс – подкинули нам пандемию, перегрев планеты вследствие парникового эффекта, безудержную гонку вооружений, балансирующую на гране тотальной войны на уничтожение, и прочие «казни египетские» в надежде на то, что человечество наконец-то одумается и перестанет, к примеру, оценивать успех той или иной страны по показателю роста ВВП. Разного рода «саммиты», призванные затормозить эти нежелательные процессы, можно уподобить ритуальным танцам, молебнам, какими древние и не очень древние люди пытались и пытаются вызвать дождь или наоборот прекратить проливные дожди.

Но вернемся к нашему частному вопросу о том, для чего же на реке строят плотину для ГЭС.

Подавляющее большинство людей, людей с высшим техническим и даже с высшим гидротехническим образованием на этот вопрос сразу и не особо думая дают примерно такой простой ответ. Плотина на реке строится для того, чтобы создать напор воды перед гидроагрегатами ГЭС. За счет этого напора ротор турбины вращается и передает механическую энергию электрогенератору, который и вырабатывает электрический ток. Так или иначе ключевыми словам в ответе будут слова «напор воды». Проверьте себя, читатель! Как вы лично ответите на этот вопрос? Запишите свой ответ на листочек и

только после этого читайте книгу дальше. Во Введении, кстати, был проведен опрос читателей о бестопочном паровозе.

Некоторые люди не сразу отвечают на этот вопрос, чувствуя в нём некий подвох. Но после повторных просьб отвечают примерно так, как описано выше, высказывая при этом некое удивление – кто, мол, не знает ответа на такой «детский» вопрос.

Но плотина – это сугубо пассивное сооружение и оно никак не может «создавать напор». Напор воды может создать только насос, который потребляет энергию. Плотина же никакой энергии не потребляет. Гидроагрегат, работающий в тандеме с плотиной, может создавать напор и качать воду снизу вверх. Так работают гидроаккумулирующие электростанции, попеременно то вырабатывая, то потребляя электроэнергию. Сейчас, кстати, в тренде энергосбережения некоторые дома то потребляют, то вырабатывают электроэнергию. В таких домах, например, сжигают газ для отопления дома и заодно вырабатывают электроэнергию (некое подобие мини-ТЭЦ с установкой ORC – с органическим циклом Ренкина), излишки которой подаются в сеть. Появилось даже такое понятие – просьюмер: физическое лицо, которое не только потребляет электричество или тепло (консьюмер), но и выдает энергию в сеть. Некоторые установки ORC в качестве органического рабочего тела и теплоносителя имеют этиловый спирт – см. главу 15.

Правильный с точки зрения термодинамики ответ на поставленный вопрос о плотине ГЭС таков. Плотина сооружается для того, чтобы… снизить среднюю скорость течения воды в реке. За счет этого уменьшаются потери на трение воды о дно реки и о её берега, на образование вихрей в самом потоке воды[52]. Эти-то уменьшенные плотиной потери энергии и преобразуются в гидроагрегате (гидротурбина плюс электрогенератор) в электроэнергию. Средняя скорость воды в реке резко падает из-за того, что сечение русла существенно увеличивается после строительства плотины и заполнения водой водохранилища. Кстати, уменьшить потери на трение и получить тем самым электроэнергию можно и без строительства плотины, и об этом будет рассказано ниже.

Многих таков ответ сильно удивляет. Некоторые считают, что над ними просто подшучивают. Другие полагают, что вы в школе или вузе плохо учили физику. Это отчасти случилось и на смотровой площадке Красноярской ГЭС. Автору пришлось нарисовать на листке бумаги примерно такую картинку (рис. 9.28) и дать следующие пояснения.

[52] Считается, что можно бесконечно смотреть на три вещи: горящий огонь, бегущую воду и на то, как работает другой человек. Да, приятно стоять на мосту, перекинутом через реку, и любоваться замысловатыми кругами, которые выделывает бегущая вода. На горных реках эти круги превращаются в шумные брызжущие вихри. В стоячих водах запруд и водохранилищ таких кругов не увидишь: вода бережет свою энергию, чтобы отдать её мельнице или турбине ГЭС. Тепломассообменщики сразу вспоминают о ламинарном и турбулентном течении жидкостей (см. рис. 9.30), газов и… о самой жизни.

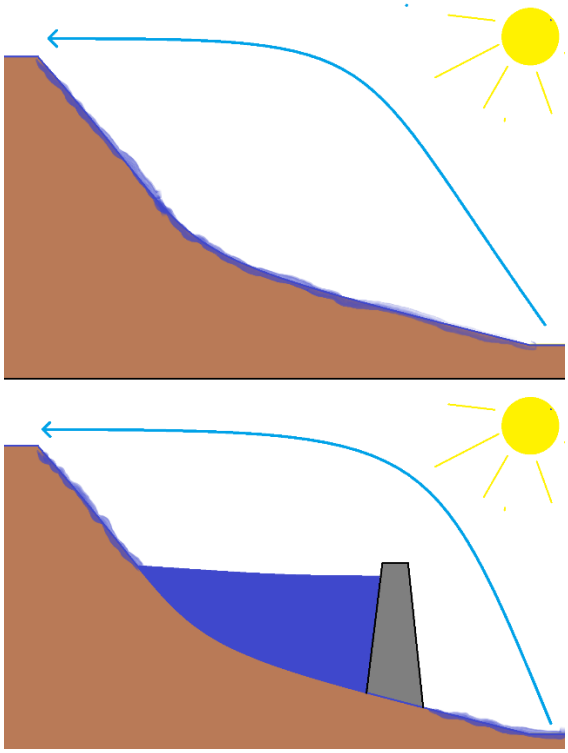


Рис. 9.28 Круговорот воды в природе и ГЭС

Вода за счет энергии Солнца испаряется с поверхности Земли и в виде дождя и снега выпадает в долинах, на возвышенностях и в горах, а затем по рекам стекает вниз[53]. Часть воды просачивается в землю и через ключи попадает в реки и озера. Потом вода снова испаряется и поднимается наверх. Подобные картинки (рис. 9.28) можно увидеть в школьных учебниках естествознания с пояснением, что это круговорот воды в природе. Потенциальная энергия поднятой наверх воды почти вся тратится на её трение о дно реки и об её берега. Если б не было трения, то вода разгонялась бы до неимоверно высоких скоростей, снося все на своем пути. А так из-за трения о русло скорость воды в устье реки оказывается вполне нормальной[54].

На реке построили плотину. Что в ней изменилось после выхода на стабильный режим – после заполнения водохранилища? Расход воды после заполнения водохранилища вышел на «доплотинный» уровень! Скорость воды в устье почти не изменилась. Но существенно уменьшилась средняя скорость воды в реке и, следовательно, потери на трение воды о русло. Вот эти-то не случившиеся потери и собирает турбина ГЭС, преобразуя их в электроэнергию! Она, повторяем, может это делать и без плотины, о чем будет сказано ниже.

Отчего зависит потеря напора воды от трения в открытой реке или закрытой трубе? В основном от скорости воды и от шероховатости поверхности соприкосновения воды с дном реки или с внутренней стенкой трубы. Куда переходят эти потери? Они идут на нагрев воды и трубы (диссипация ценной механической энергии первого рода – переход её в менее ценную энергию второго рода, в теплоту).

---

[53] Много воды «застревает» в горах в виде ледников. Изменение климата, связанное с парниковым эффектом, который упоминается в этой книге, может привести к активному таянию ледников.

[54] Есть бесплотинные мини-ГЭС в виде неподвижной баржи с водяным колесом и электрогенератором, вырабатывающим электроэнергию за счет кинетической энергии протекающей воды. Но вклад таких ГЭС в мировой баланс электроэнергетики ничтожно мал.

Формулы, по которым можно рассчитать потерю напора Δh и перепад давления Δp в прямой трубе круглого сечения[55], довольно просты – см. рис. 9.29. В формулах такие переменные: l (эль) – длина трубы, d – её диаметр, v – скорость жидкости или газа, g – ускорение свободного падения и ρ – плотность жидкости или газа. К потере напора за счет трения нужно ещё добавить значение перепада высот на концах трубы. Главная сложность здесь в расчете коэффициента трения $\lambda_{friction}$, который в основном зависит от двух безразмерных величин – от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости внутренней поверхности трубы Δ (отношение средней высоты шероховатостей к диаметру трубы).

$$\Delta h := \lambda_{friction}(\Delta, Re) \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$\Delta p := \Delta h \cdot g \cdot \rho$$

Рис. 9.29 Формулы для расчета потери давления в трубе

Если читатель откроет сайт по адресу http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Hydro/La-De-Re.xmcd, то он выйдет на авторский цифровой двойник так называемой ложки Никурадзе – на семейство кривых, напоминающих ложки (столовый набор ложек) и отображающих зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса и относительной шероховатости (рис. 9.30). Меняя исходные данные (значения Re и Δ) и нажимая на кнопку Recalculate, можно получить новый ответ – значение коэффициента трения, фигурирующий в первой формуле на рис. 9.29.

Характерный изящный изгиб кривых на рис. 9.30 связан с тем, что при росте числа Рейнольдса меняется режим течения жидкости от ламинарного (где шероховатость почти не влияет на трение) до турбулентного, минуя переходный, нестабильный режим. При ламинарном течении без вихрей слои жидкости или газа перемещаются параллельно друг другу, и у внутренней поверхности образуется некая смазывающая пленка, нивелирующая вредное действие шероховатостей. Поэтому-то шероховатость поверхности почти не влияет на коэффициент трения в этом режиме течения. Число (критерий) Рейнольдса, напомним, – это произведение диаметра трубы на среднюю по сечению скорость жидкости или газа, деленное на так называемую кинематическую вязкость жидкости или газа. Кинематическая вязкость – это обычная («динамическая») вязкость, деленная на плотность жидкости или газа.

[55] Когда-то давно в газете «Поиск», в её первоапрельском номере появилась статья о том, что трубы не круглого, а квадратного сечения имеют меньшее гидравлическое сопротивление. На перекачку по квадратным трубам такого же количества жидкости или газа требуется намного меньше энергии. Все бы ничего (первое апреля есть первое апреля), но через некоторое время в редакцию газеты пришло письмо от одного трубопрокатного завода с просьбой дать координаты ученых, какие провели подобные исследования. Завод, мол, готов начать производство таких «энергосберегающих» труб. Кстати, трубы с почти квадратным сечением широко используются в строительстве в качестве несущих конструкций. Из таких труб мы строим, например, заборы на дачах.

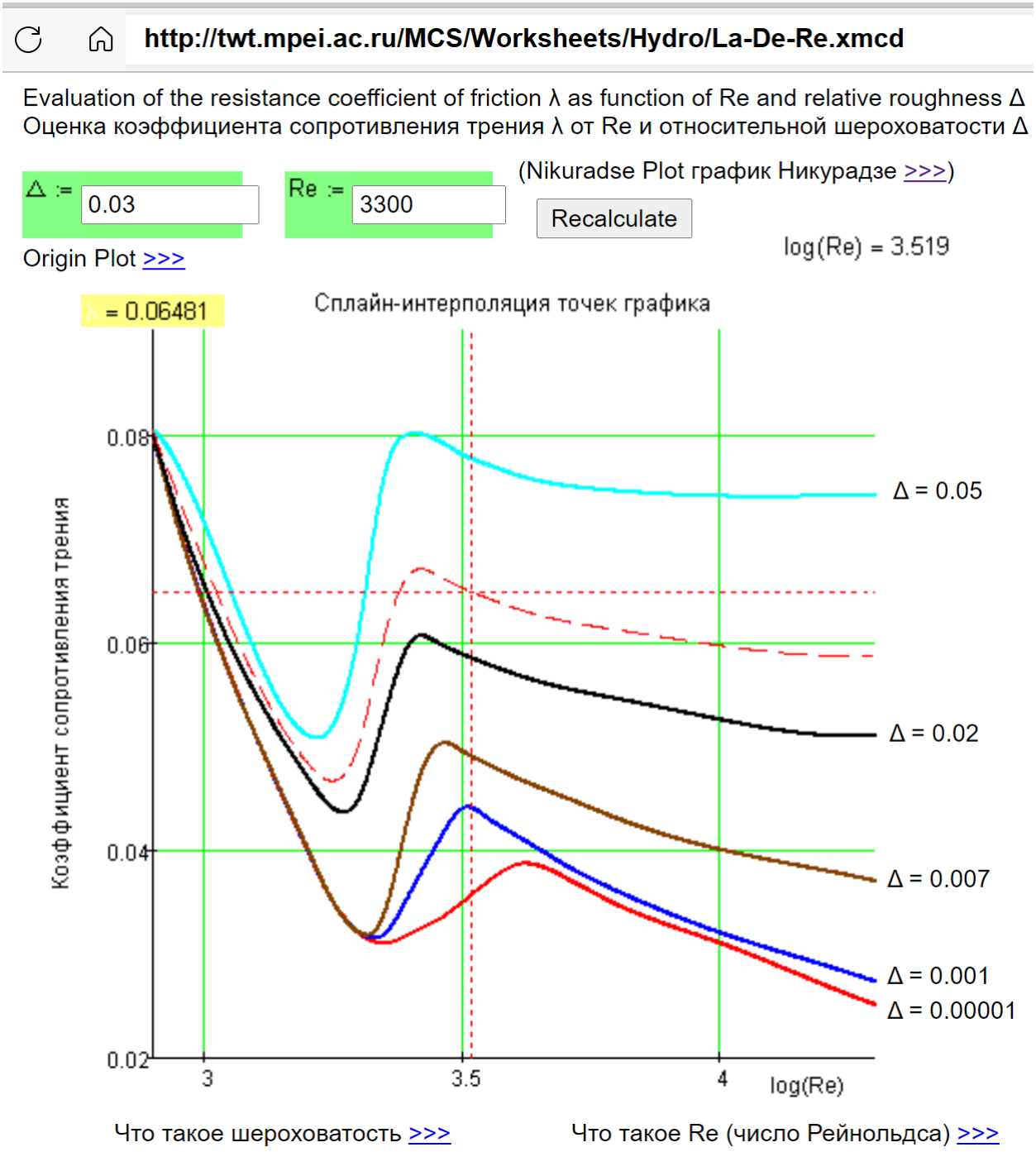


Рис. 9.30 Цифровой интернет-двойник «ложки Никурадзе»

Первая формула на рис. 9.29 показывает, что коэффициент трения воды о стенку трубы зависит от скорости в квадрате. Но это не совсем так, если учесть, что скорость фигурирует и в числе Рейнольдса, и в зависимостях, показанных на рис. 9.30. Бесспорно лишь то, что с ростом скорости растут потери на трение. Если построить на реке плотину, то, повторяем, сечение русла реки расширится, скорость упадет, а ликвидированная таким образом часть потерь на трение превратится в электроэнергию.

Но электроэнергию из реки можно получить, не уменьшая скорость воды, а снижая шероховатость поверхности, по которой течет вода. На этом принципе работают многие мини ГЭС. Что это такое?

Вдоль русла горной реки или ручья прокладывают стальную или пластиковую трубу (водовод) и пускают по ней часть воды, которая будет бежать не по неровному и каменистому дну реки или ручья, а по гладкой трубе. Потери на трение резко упадут, чем «не преминет воспользоваться» гидротурбина, установленная на нижнем конце трубы (водовода). На рис. 9.28 поток воды на реке без ГЭС изображен волнистой линией, которая в устье плавно заканчивается у моря. Если этот поток поместить в гладкую тубу, то он будет огромным фонтаном бить на нижнем конце трубы. Такие «фонтаны», кстати, можно видеть у нижнего бьефа плотины, когда воду из водохранилища сбрасываю минуя гидроагрегаты. Этот фонтан, можно сказать, затыкают гидротурбиной капсульного или иного типа.

На рисунке 9.30а показан расчет в среде SMath потери напора Δh и давления Δp в трубопроводе с внутренним диаметром d 300 mm и длиной L 30 m, по которому перегретый водяной пар под давлением p 13 MPa и с температурой 550°C поступает из парового котла в турбину – см. схему на рис. 9.17. Расход пара 900 тонн в час или, как будет подсчитано, 6.715 метров кубических в секунду.

Главное в таком расчете – это определить коэффициент трения о внутреннюю поверхность трубы. Эта зависимость графически отображена на рис. 9.30 и реализована в виде функции пользователя, показанной вверху рис. 9.31. Физика и математика, заложенные в эту функцию, описаны здесь [6].

$$\lambda_f(\Delta, Re) := \begin{cases} \text{if } Re < 2300 \\ \quad \frac{64}{Re} \\ \text{else if } Re < 4000 \\ \quad \text{"_"} \\ \text{else if } Re \le \frac{10}{\Delta} \\ \quad \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \\ \text{else if } Re \le \frac{560}{\Delta} \\ \quad 0.11 \cdot \left(\Delta + \frac{68}{Re}\right)^{0.25} \\ \text{else} \\ \quad 0.11 \cdot \Delta^{0.25} \end{cases}$$

Функция пользователя

$q := 900 \frac{t}{hr}$ $d := 350\ mm$ $L := 30\ m$

$\Delta := 2 \frac{mm}{m}$ $p_{BX} := 13\ MPa$ $T := 550\ °C$

Исходные данные

$\rho := wspDPT(p_{BX}, T) = 37.2 \frac{kg}{m^3}$ $Q := \frac{q}{\rho} = 6.715 \frac{m^3}{s}$

$F := \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 962.1\ cm^2$ $v := \frac{Q}{F} = 69.7939 \frac{m}{s}$

$\mu := wspDYNVISPT(p_{BX}, T) = 3.1291 \cdot 10^{-5}\ s\ Pa$

$\mu = 0.03129 \frac{N\ mm}{\frac{m}{s}\ m^2}$ Более правильная единица вязкости

$Re := \frac{d \cdot v}{\frac{\mu}{\rho}} = 2.9065 \cdot 10^7$ $\lambda_f(\Delta, Re) = 0.0233$

$\Delta h := \lambda_f(\Delta, Re) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2\ g_e} = 495.2\ m$

$\Delta p := \Delta h \cdot \rho\ g_e = 1.784\ atm$ Ответ

Рис. 9.31 Расчет потери напора и давления в паропроводе

Бесплотинные ГЭС (звучит как бестопочный паровоз из Введения) в настоящее время получают большое распространение в малой, распределенной энергетике. Плотина с водохранилищем – это не только довольно дорогой (см выше), но и довольно опасный объект на территориях, где случаются землетрясения или орудуют террористы.

Три ремарки.

1. Второй автор книги видел в Швейцарии интересное мини-гидросооружение. Электроэнергия, вырабатываемая ГЭС, может использоваться в насосе, подающем воду в дома, расположенные намного выше ГЭС и вдали от реки. Так вот на одной из ферм Швейцарии вода непосредственно, без электричества приводит в движение поршневой насос, качающий воду на высокогорное пастбище. В этом насосе спрятаны два поршня разного диаметра, соединенные рычагом с точкой опоры. Сразу вспоминается античный «гидротехник», который не только открыл закон Архимеда, но и высказался о точке опоры, которая…
2. Если мы хотим немного остудить чай в чашке, мы его помешиваем ложечкой. Но этим мы добавляем в чай механическую энергию, которая переходит в тепловую. Температура чая по идее должна повысится, но она понижается. Почему? А потому, что мы через вихри на поверхности чая и через увеличение скорости чая у внутренней поверхности чашки улучшаем теплообмен с окружающей средой, что приводит к более быстрому остыванию чая. Сразу вспоминается… гомеопатия – сомнительное направление в медицине с её девизом «Лечим подобное подобным!». Если же слишком горячий чай налить в блюдечко и подуть на него (вспомним картину Кустодиева «Чаепитие в Мытищах») то это будет уже не гомеопатия, а аллопатия – традиционные методы лечения больного.
3. Многие АЭС строятся на берегу морей и океанов. Вспомним печально знаменитую АЭС «Фукусима». Охлаждающей водой конденсаторов турбин этих тепловых электростанций служит морская вода, свойства которой определяются специальной формуляцией Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара – см. главу 3. На рисунке 9.32 отображен авторский сайт интернета с адресом http://twt.mpei.ru/MCS/Worksheets/rbtpp/Diag14.xmcd, по которому можно оценить некоторые термодинамические свойства морской воды по её температуре T, давлению p и солености S (заглавное). Рассчитываются плотность ρ, удельная энтальпия h и удельная энтропия s (прописное).

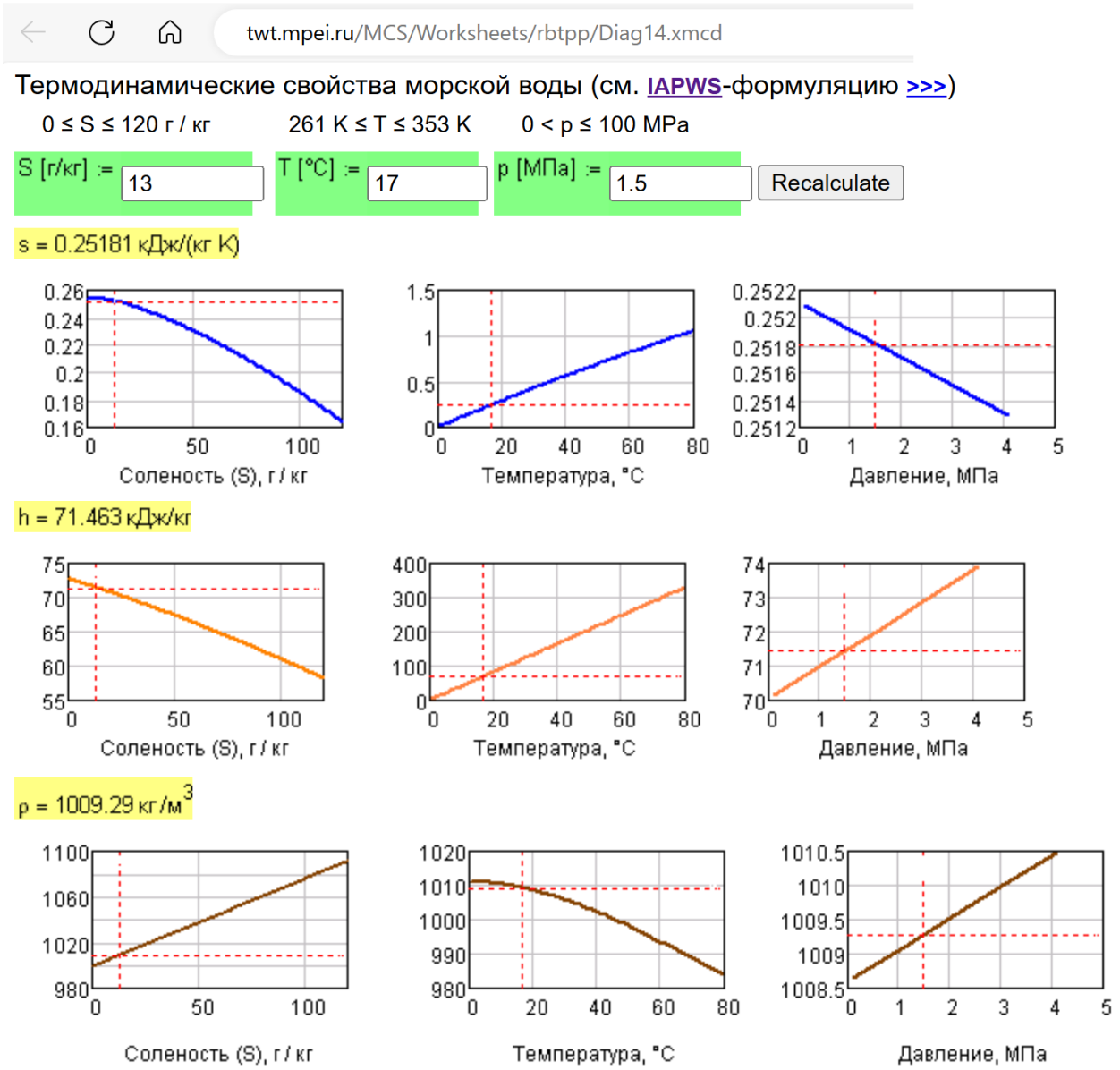


Рис. 9.32 Интернет-оценка свойств морской воды

Дивертисмент 2. Определение влажность пара

Определение влажности водяного пара, например, в точке 2 на схеме АЭС (рис. 9.3) – это довольно 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 в двухфазной области) *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 p_1, температура (T_2) и давление (p_2) сухого пара после дросселирования) можно оценить степень сухости исходного пара (x – см. рис 9.33), опираясь на то положение, что при дросселировании энтальпия не изменяется.

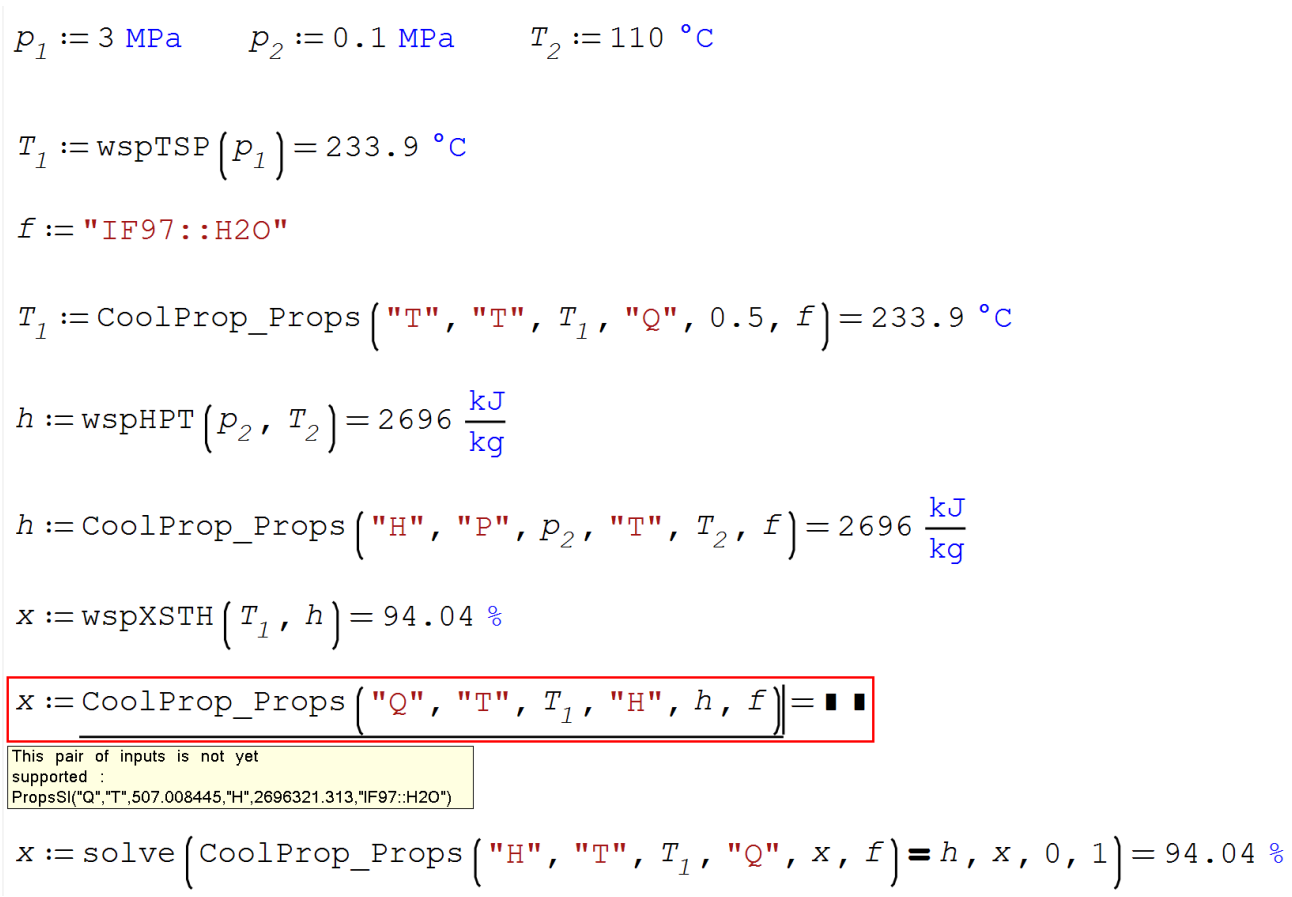


Рис. 9.33 Расчёт процесса дросселирования влажного водяного пара

В расчете на рис. 9.33 попеременно вызываются функции пакетов WaterSteamPro и CoolProp Wrapper. Функция `CoolProps_Props` не может вернуть степень сухости водяного пара в зависимости от температуры и удельной энтальпии, но может вернуть удельную энтальпию в зависимости от температуры и степени сухости (одна из двух обратных функций). Решение проблемы – вызов функции `solve`, которая решает эту проблему. Напомним, что to solve по-английски – это решить – решить уравнение по указанной неизвестной величине x методом половинного деления (бисекции) в интервале от нуля (вода на линии насыщения) до 1 (сухой насыщенный пар).

Расчёт, показанный на рис. 9.33, опирается на три функции пакета WaterSteamPro:

- `wspTSP` — температура насыщения в зависимости от давления (один аргумент);

- `wspHPT` — удельная энтальпия в зависимости от давления и температуры (два аргумента);

- `wspXSTH` — влажность пара в зависимости от температуры и удельной энтальпии (два аргумента).

Функция пакета CoolProp Wrapper одна, но имеет шесть аргументов.

На рисунке 9.34 показана диаграмма по расчету, приведенному выше.

$T_{tr} := 0.01\ °C \qquad T_{cr} := 373.95\ °C$

$$T_{Sat} := \left[T_{tr}, T_{tr} + \frac{T_{cr} - T_{tr}}{1000} .. \left(T_{cr} - 0.00001\ K \right) \right]$$

$$s_{SatS} := \overrightarrow{\text{wspSSST}\left(T_{Sat} \right)} \qquad h_{SatS} := \overrightarrow{\text{wspHSST}\left(T_{Sat} \right)}$$

$$h_x := \overrightarrow{\text{wspHSTX}\left(T_{Sat}, x \right)} \qquad s_x := \overrightarrow{\text{wspSSTX}\left(T_{Sat}, x \right)}$$

$$s_1 := \text{wspSSTX}\left(T_1, x \right) = 5.975\ \frac{kJ}{kg\ K} \qquad s_2 := \text{wspSPT}\left(p_2, T_2 \right) = 7.415\ \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$Plot := \begin{cases} \left[\text{augment}\left(\frac{s_{SatS}}{1000}, \frac{h_{SatS}}{1000} \right) \text{"Линия насыщения по водяному пару"} \right]_1 \\ \left[\text{augment}\left(\frac{s_x}{1000}, \frac{h_x}{1000} \right) \text{"Линия постоянной влажности"} \right]_1 \\ \left[\begin{bmatrix} \frac{s_1}{1000} & \frac{h}{1000} \\ \frac{s_2}{1000} & \frac{h}{1000} \end{bmatrix} \text{"Линия дросселирования пара"} \right]_1 \end{cases}$$

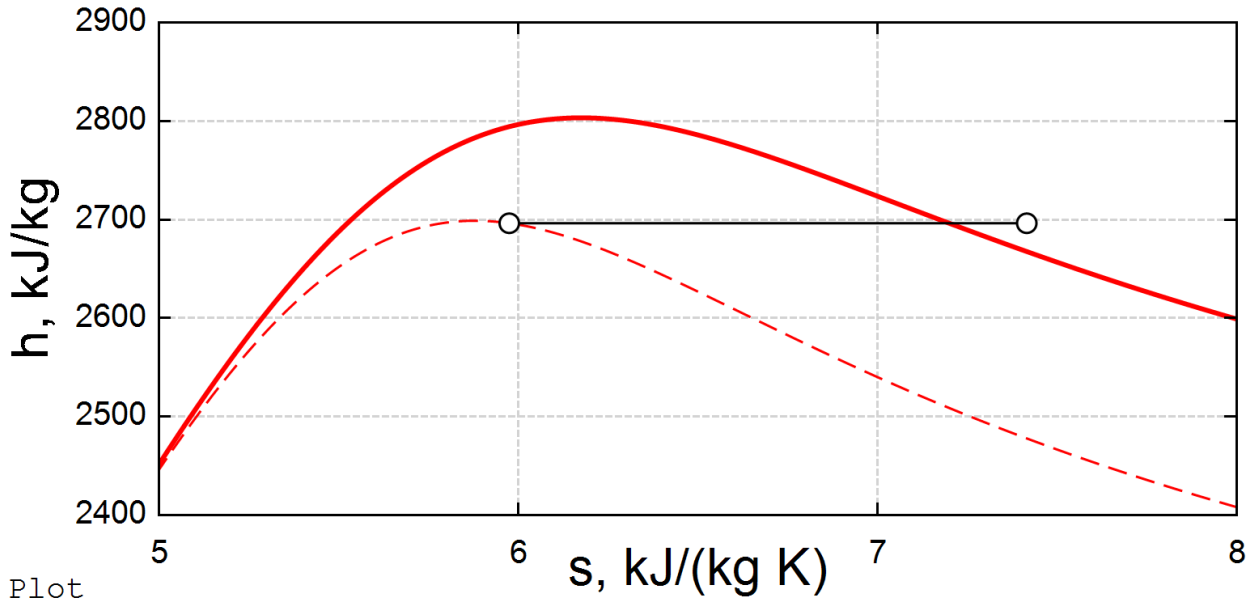


Рис. 9.34 h, s диаграмма дросселирования влажного пара

На авторском расчетном сервере по адресу http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/H-s-Throttling-X.xmcd расчет, показанный на рис. 9.33, можно провести автоматически – см. рис. 9.35.

twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/H-s-Throttling-X.xmcd

Дросселирование водяного пара из двухфазной области: h = const

Исходные данные

Задайте область диаграммы

Начальное давление пара	3	MPa	h	2500	3000	kJ/kg
Конечная температура пара	110	°C	s	5	8	kJ/(kg K)
Конечное давление пара	0.1	MPa				

Recalculate

Рассчитанные данные

Энтальпия пара при начальном и конечном давлениях	h = 2696.32 kJ/kg
Энтропия влажного пара при начальном давлении	s_0 = 5.9749 kJ/(kg K)
Температура влажного пара при начальном давлении	t_0 = 233.86 °C
Энтропия пара при конечном давлении	s_k = 7.4154 kJ/(kg K)
Удельный объем пара при начальном давлении	v_0 = 0.06276 m^3/kg
Удельный объем пара при конечном давлении	v_k = 1.74482 m^3/kg
Степень сухости пара при начальном давлении	x_0 = 94.04 %

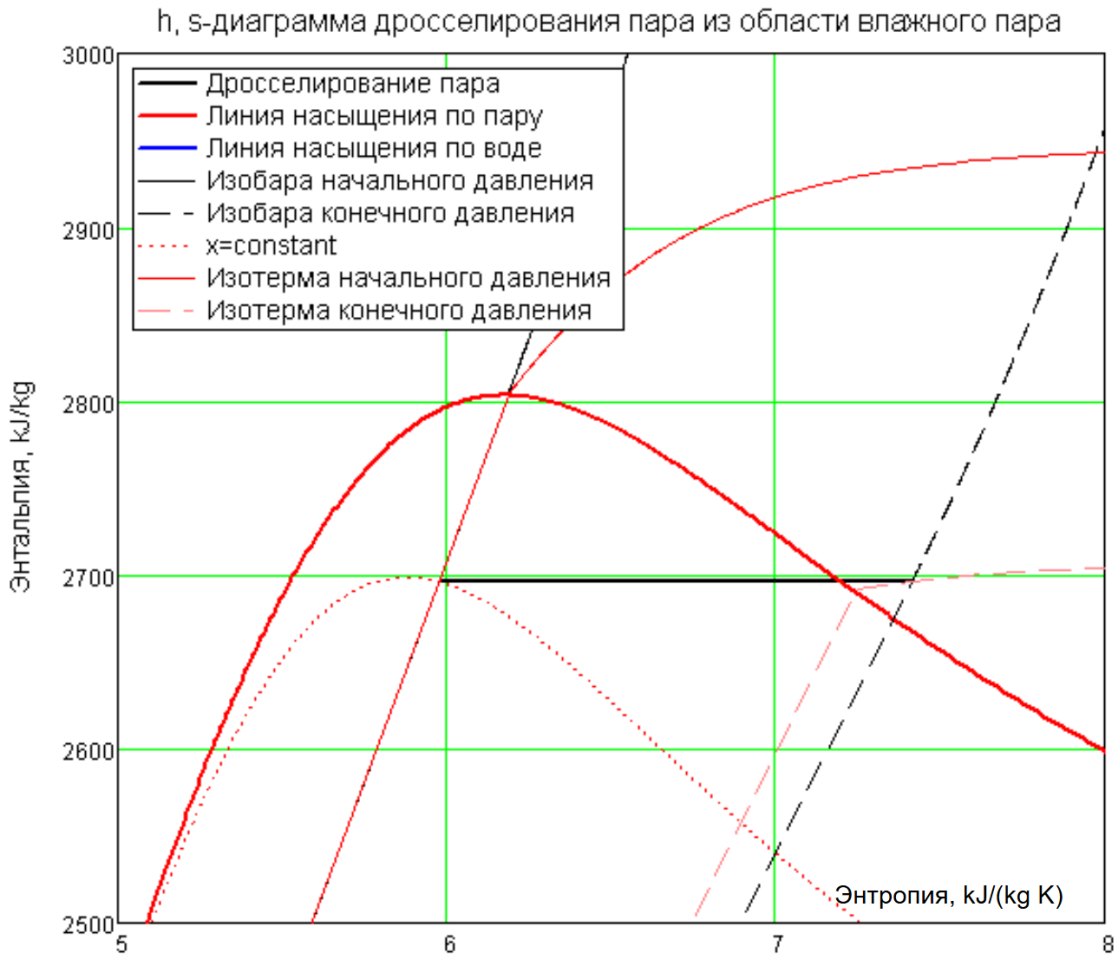


Рис. 9.35 Web h, s диаграмма дросселирования влажного пара

Задания читателям.

1. Провести на диаграмме (рис. 9.34) изобары, изотермы и изохоры через точки, отмеченные кружочками (начало и конец процесса дросселирования)
2. Проставить на диаграмме (рис. 9.34) цифры 1 и 2 у кружочков
3. Перестроить график (рис. 9.35) в координатах T-s, T-h и p-d (d -плотность)

Задание читателям:

1. Объедините четыре функции пользователя, показанные на рис. 9.5, в одну, используя операторы if и try из панели программирования SMath. Оператор if поможет определить, что это – паровая турбина или водяной насос, а оператор try (обработка ошибки) – начальную точку – находится ли она в однофазной области или на линии насыщения.
2. Проедите расчёт КПД цикла АЭС по технологии снизу вверх, используя оператор глобального присваивания – см. рис. 9.10.
3. Дополните переменную Plot (рис. 9.22) строками, автоматически выписывающими на графиках 9.23-9.25 то, что было приписано вручную – значения давления и степени сухости пара.
4. Расчёт паропровода (рис. 9.31) был сделан без учёта двух изгибов на 90 градусов, показанных на схеме ПТУ (рис. 9.17). Вставьте в расчёт операторы, учитывающие эту реальность. Формулы найдите в справочниках.
5. Провести на диаграмме (рис. 9.34) изобары, изотермы и изохоры через точки, отмеченные кружочками (начало и конец процесса дросселирования)
6. Проставить на диаграмме (рис. 9.34) цифры 1 и 2 у кружочков
7. Перестроить график (рис. 9.35) в координатах T-s, T-h и p-d (d -плотность).

Литература:

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомовоз
2. **Зорин В.М.** Атомные электростанции. Основной технологический процесс. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 304 с. (https://studfile.net/preview/16459745)
3. **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/rbtpp)

4. Очков А. В. Компьютерная программа по изучению и автоматизированной проверке знания технологических схем // Тезисы докладов Международной научно-метадической конференции "Информатизация инженерного образования Инфорино-2014". 15–16 апреля 2014. URL: http://inforino2014.mpei.ru.
5. Ebeling C. Gemini II: A Second Generation Layout Validation Program // Proceedings of ICCAD 1988.
6. Очков В.Ф., Орлов К.А., Лымарев Д.А. Некоторые проблемы гидравлических расчетов на компьютере // Гидравлика. № 10, 2020 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Flow-Ochkov-Orlov.pdf)

Глава 10. Внутренняя теплофикация паротурбинной установки

Один из способов повышения КПД паротурбинной установки – это так называемая внутренняя теплофикация – повышение температуры питательной воды за счет её подогрева паром, отбираемым из проточной части турбины [1].

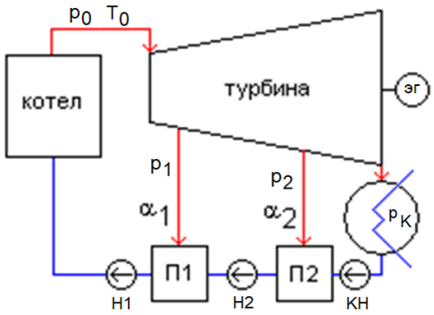
На рисунке 10.1 приведен протокол расчёта термического КПД паротурбинного цикла с двумя отборами пара на подогрев питательной воды в двух смешивающих регенеративных подогревателях П1 и П2. Вода на выходе из них (на входе в последующий насос Н1 или Н2) находится в состоянии насыщения[56]. Описание расчёта исчерпывающе дано в комментариях протокола на рис. 10.1. Параметры на входе в подогреватели или в насосы отмечены одним штрихом, а параметры на выходе – двумя штрихами, о которых мы еще упомянем (см. рис. 10.4 ниже).

Сразу отметим, что реальный паротурбинный блок имеет до восьми отборов пара из турбины в регенеративные подогреватели, включая и деаэратор. И не только смешивающего, но и поверхностного типа. Это не умоляет образовательную ценность расчёта, приведенного ниже.

В электронном решебнике (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath) представлен пример расчета схемы ПТУ, работающей по простому циклу ПТУ на перегретом паре, решение приведено с использованием пакетов WaterSteamPro и CoolProp Wrapper; разбор решения в классическом варианте рассмотрен в учебнике по технической термодинамике (см. Пример 11.1 [1]). Также продемонстрированы решения задач 11.2 – расчет энергетических и эксергетических показателей ПТУ, и 11.3- расчет схемы ПТУ с промежуточным пароперегервателем, из [1] используя пакет SMath.

В расчёте на рис. 10.1 используются функции пакета WaterSteamPro (см. главу 1), опирающиеся на формуляцию Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара 1997 года [2, 3].

[56] В принципе это недопустимо из-за того, что в воде на линии насыщения при входе в насос будут образовываться пузырьки водяного паре, которые затем будут схлопываться и вызывать эрозионный износ проточной части насоса. Для исключения этого нежелательного явления перед основным насосом устанавливают так называемый бустерный насос, несколько повышающий давление воды и отводящий её от линии насыщения.



Параметры ПТУ

$T_0 := 540\ °C$

$p_0 := 130\ атм$

$p_1 := 70\ атм$

$p_2 := 30\ атм$

$p_K := 30\ мм\ рт.ст.$

Вода, поступающая в конденсатный насос, имеет параметры насыщения при давлении в конденсаторе

$T_K := wspTSP(p_K) = 28,96\ °C$ $\quad h'_{КН} := wspHSWT(T_K) = 121,4\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad s_{КН} := wspSSWT(T_K) = 0,4224\ \frac{кДж}{кг\ К}$

Вода, поступающая в насос 2, имеет параметры насыщения при давлении второго отбора

$T'_{Н2} := wspTSP(p_2) = 234,6\ °C$ $\quad h'_{Н2} := wspHSWT(T'_{Н2}) = 1012\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad s_{Н2} := wspSSWT(T'_{Н2}) = 2,652\ \frac{кДж}{кг\ К}$

Вода, поступающая в питательный насос, имеет параметры насыщения при давлении первого отбора

$T'_{Н1} := wspTSP(p_1) = 286,7\ °C$ $\quad h'_{Н1} := wspHSWT(T'_{Н1}) = 1272\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad s_{Н1} := wspSSWT(T'_{Н1}) = 3,130\ \frac{кДж}{кг\ К}$

Параметры питательной воды $\quad T_{ПВ} := wspTPS(p_0; s_{Н1}) = 289,0\ °C$ $\quad h_{ПВ} := wspHPT(p_0; T_{ПВ}) = 1280\ \frac{кДж}{кг}$

Удельная энтальпия пара, поступающего в турбину $\quad h_0 := wspHPT(p_0; T_0) = 3443\ \frac{кДж}{кг}$

Удельная энтропия острого пара в турбине (обратимый процесс расширения пара s = const) $\quad s := wspSPT(p_0; T_0) = 6,569\ \frac{кДж}{кг\ К}$

Параметры пара, выходящего из турбины $\quad h_K := wspHPS(p_K; s) = 1978\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad x := wspXPS(p_K; s) = 76,34\ \%$

Удельная энтальпия пара, поступающего в смешивающие подогреватели П-1 и П-2

$h_1 := wspHPS(p_1; s) = 3245\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad h_2 := wspHPS(p_2; s) = 3013\ \frac{кДж}{кг}$

Параметры воды, выходящей из второго насоса (обратимый процесс сжатия воды s = const)

$h''_{Н2} := wspHPS(p_2; s_{Н2}) = 1012\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad T''_{Н2} := wspTPS(p_2; s_{Н2}) = 234,6\ °C$

Параметры воды, выходящей из конденсатного насоса (обратимый процесс сжатия воды s = const)

$h''_{КН} := wspHPS(p_2; s_{КН}) = 124,4\ \frac{кДж}{кг}$ $\quad T''_{КН} := wspTPS(p_2; s_{КН}) = 29,03\ °C$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} := roots\left(\begin{bmatrix} \alpha_1 \cdot h_1 + (1-\alpha_1)\cdot h''_{Н2} = 1\cdot h'_{Н1} \\ \alpha_2 \cdot h_2 + (1-\alpha_1-\alpha_2)\cdot h''_{КН} = (1-\alpha_1)\cdot h'_{Н2} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 0,1166 \\ 0,2713 \end{bmatrix}$$

Термический КПД $\quad \eta_T :=$

$l_{01} := 1\cdot(h_0 - h_1)$

$l_{12} := (1-\alpha_1)\cdot(h_1 - h_2)$

$l_{2К} := (1-\alpha_1-\alpha_2)\cdot(h_2 - h_K)$

$l_{КН} := (1-\alpha_1-\alpha_2)\cdot(h''_{КН} - h'_{КН})$

$l_{Н2} := (1-\alpha_1)\cdot(h''_{Н2} - h'_{Н2})$

$l_{ПН} := 1\cdot(h_{ПВ} - h'_{Н1})$

$q := 1\cdot(h_0 - h_{ПВ})$

$$\frac{l_{01} + l_{12} + l_{2К} - l_{КН} - l_{Н2} - l_{ПН}}{q} = 47,45\ \%$$

Рис. 10.1. Расчет термического КПД паротурбинной установки с двумя регенеративными смешивающими подогревателями

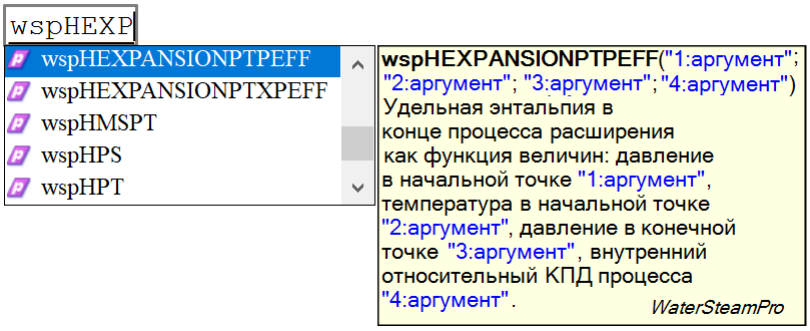
Давления задаются в атмосферах физических и в миллиметрах ртутного столба, которые более понятны для восприятия, чем мега- или килопаскали. Как уже не раз отмечалось в этой книге, пакет SMath позволяет работать с любыми единицами измерения, а не только с теми, какие рекомендованы ГОСТами, но не вполне удобны в научно-техническом обиходе. Вернее так – вводить и выводить значения именованных величин (физических, экономических, информационных и др.) можно с любыми единицами, но в памяти компьютера они будут храниться в базовых единицах СИ. В давлении, выраженном в атмосферах (физических или технических), ясно просматривается физический смысл – давление во столько-то раз выше атмосферного. Чего не скажешь о паскалях. Поучительный исторический пример. В прогнозах погоды у нас одно время пытались прописывать атмосферное давление в гектопаскалях, но вернулись к более понятным и привычным миллиметрам ртутного столба. Кстати, скорость ветра в метеосводках тоже желательно выражать в километрах в час (kph), а не в метрах в секунду. Что и делается в ряде европейских стран, но не в России. Пять kph – это скорость пешехода, 20 kph – велосипедиста, а 60 kph – автомобиля в городе. Есть с чем сравнивать скорость ветра, выраженную в kph, чего не скажешь о метрах в секунду. Можно, представить, что случиться, если спидометры автомобилей будут показывать не километры в час, а метры в секунду!

Расчет значений долей отбора пара α_1 и α_2 в подогреватели можно вести по формулам, полученным в результате аналитического решения уравнений баланса тепловой энергии в процессе смешивания воды с водяным паром в подогревателях, что мы и сделаем позже. Но в расчёте на рис. 10.1 оставлены сами эти два уравнения, у которых численно ищется корень через встроенную в SMath функцию `roots`. Это также повышает «читабельность» расчёта – в системе уравнений четко виден их физический смысл (баланс энергий), чего не скажешь о выражениях, полученных в результате решения уравнений. Возвращаясь к предыдущему комментарию, отметим, что и доли отбора пара, и КПД в памяти компьютера хранятся в абсолютных значениях. Но выводить их на печать можно в процентах или даже в промилле.

Окончательный расчёт термического КПД ведется через программный блок, начало и конец которого отмечен вертикальной чертой. В этом блоке отдельно расписаны удельные работы (переменные, начинающиеся с латинской буквы эль) трех частей паровой турбины

(высокого, среднего и низкого давлений) и трех насосов – конденсатного (КН), промежуточного (Н2) и питательного (ПН – Н1).

Расчеты, показанные на рис. 10.1, охватывают *обратимые* (*идеальные*) процессы расширения пара в турбине и сжатия воды в насосах – удельная энтропия рабочего тела в этих устройствах не меняется. Вследствие этого рассчитанная влажность пара, выходящего из турбины, оказалась недопустимо высокой – 23,7%. Это показано на рис. 10.2: 100%-76,34% равно 23,66%. В пакете WaterSteamPro есть функции, возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара в зависимости не только от параметров рабочей среды, но и от неких технологических условий. На рисунке 10.2 показана работа двух таких функций, возвращающих удельную энтальпию и степень сухости водяного пара, расширяющегося в турбине с определенным внутреннем относительным КПД. Расчеты, показанные на рис. 10.1 несложно подправить так, чтобы были учтены реальные, а не идеальные условия.



$$\mathrm{wspHEXPANSIONPTPEFF}\left(p_0;\ T_0;\ p_K;\ 100\ \%\right) = 1978\ \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\mathrm{wspXEXPANSIONPTPEFF}\left(p_0;\ T_0;\ p_K;\ 100\ \%\right) = 76{,}34\ \%$$

$$\mathrm{wspHEXPANSIONPTPEFF}\left(p_0;\ T_0;\ p_K;\ 87\ \%\right) = 2169\ \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\mathrm{wspXEXPANSIONPTPEFF}\left(p_0;\ T_0;\ p_K;\ 87\ \%\right) = 84{,}17\ \%$$

Рис. 10.2. Расчет процесса расширения пара в турбине

При расчёте КПД паротурбинного блока на рис. 10.1 в программном блоке использовалась дробь, числитель которой это сумма удельных работ трех частей паровой турбины за вычетом удельных работ насосов, а знаменатель – удельная теплота, подведенная к паровому котлу. Но КПД можно «повысить», если удельные работы перенести со сменой знака из числителя в знаменатель – см. рис. 10.3.

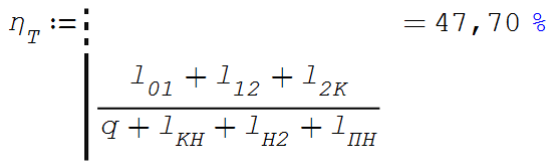


Рис. 10.3. Альтернативный подсчёт КПД

В первом варианте подсчета КПД (рис. 10.1) принимается по внимание то, что у насосов паротурбинный привод, а во втором варианте (рис. 10.3) – электрический, а ток подаётся на ТЭС, например, с внешней гидроэлектростанции.

Отдельные расчётные операторы, показанные на рис. 10.1, допустимо объединить в программный блок, помеченный вертикальной чертой для того, чтобы получилась функция пользователя с именем η_T с пятью аргументами (p_0, T_0, p_1, p_2 и p_K) – см. рис. 10.5. Эта функция будет использоваться для построения графиков и поиска максимума, что требует значительных вычислительных ресурсов – машинного времени, например. Поэтому стоит отказаться от затратного численного решения системы из двух уравнений материального баланса в двух подогревателях и перейти к аналитическому её решению (рис. 10.4) с последующим использованием формул в функции пользователя с именем η_T.

Первый оператор на рис. 10.4 решает квадратное уравнение для пробы и не только. Далее сделана попытка аналитического решения системы двух уравнений, которые в расчёте на рис. 10.1 решались численно. Функция `solve` из дополнения Maple вернула… предыдущий результат – два корня квадратного уравнения. Это недоработка данного плагина – должно быть выдано сообщение об ошибке, связанное с тем, что в именах переменных уравнений используются штрихи. Если их заменить на цифры 1 и 2, то решение будет правильное, но не совсем. В векторе-ответе первая формула относится к α_2, а вторая к α_1, хотя согласно второму аргументу функции `solve` должно быть наоборот. Внизу рисунка 10.4 показаны два оператора присваивания, куда скопированы две формулы, автоматически сгенерированы ранее. И не просто скопированы, а дополнительно отредактированные: вместо цифр 1 и 2 проставлены один штрих или два штриха, а также убраны лишние минусы и переставлены местами некоторые переменные. Но такие «косметические процедуры» нужно делать с осторожностью, чтобы не ошибиться.

Кроме того, в уравнениях не используются русские буквы в нижних индексах, а только латинские прописные буквы K и H. Буквы кириллицы, как и штрихи здесь не желательны.

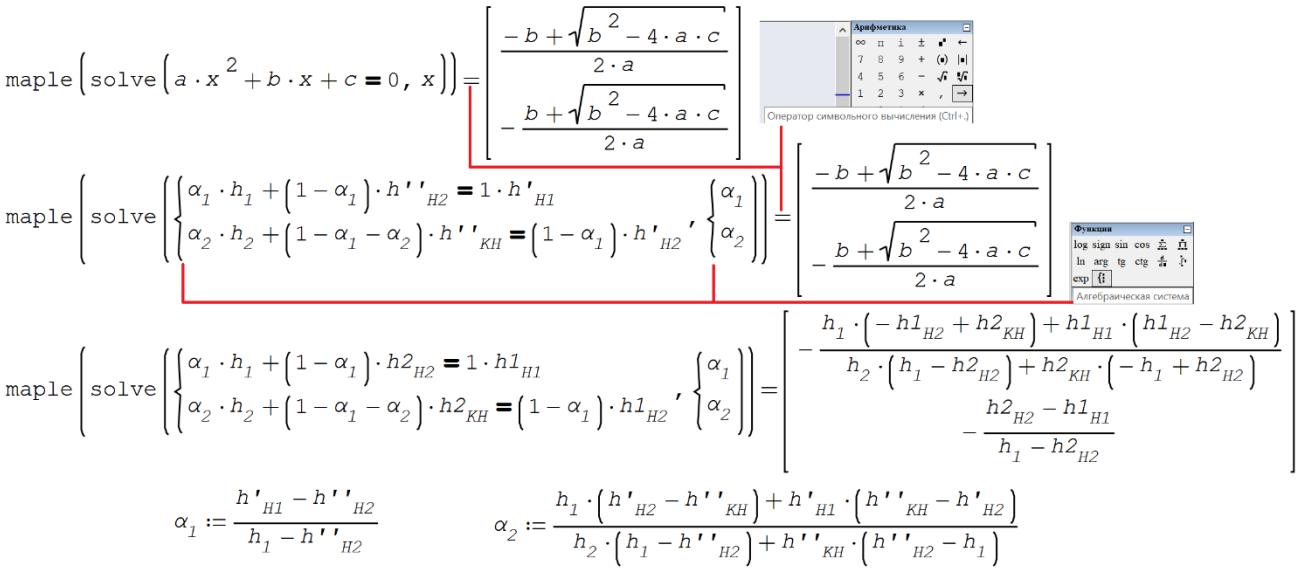


Рис. 10.4. Аналитическое решение систем уравнений

Полученные в решении на рис. 10.4 формулы для долей отбора пара из турбины вставлены в функцию пользователя на рис. 10.5. Для компактности два-три оператора объединены в горизонтальную матрицу для того, чтобы вся программа-функция помещалась на экране компьютера для удобства редактирования. Объединение операторов в программный блок полезно и тем, что установка курсора на имени любой переменной (например, на p_0), подсвечивает это имя во всем программном блоке. Заодно сам этот блок заключается в рамку.

В целях той же компактности сделан сдвиг программного блока влево. Для этого нужно выделить имя функции-программы курсором и нажать клавиши Shift и Enter. После такого действия программный блок подвинется влево, а оператор ввода ":=" продублируется.

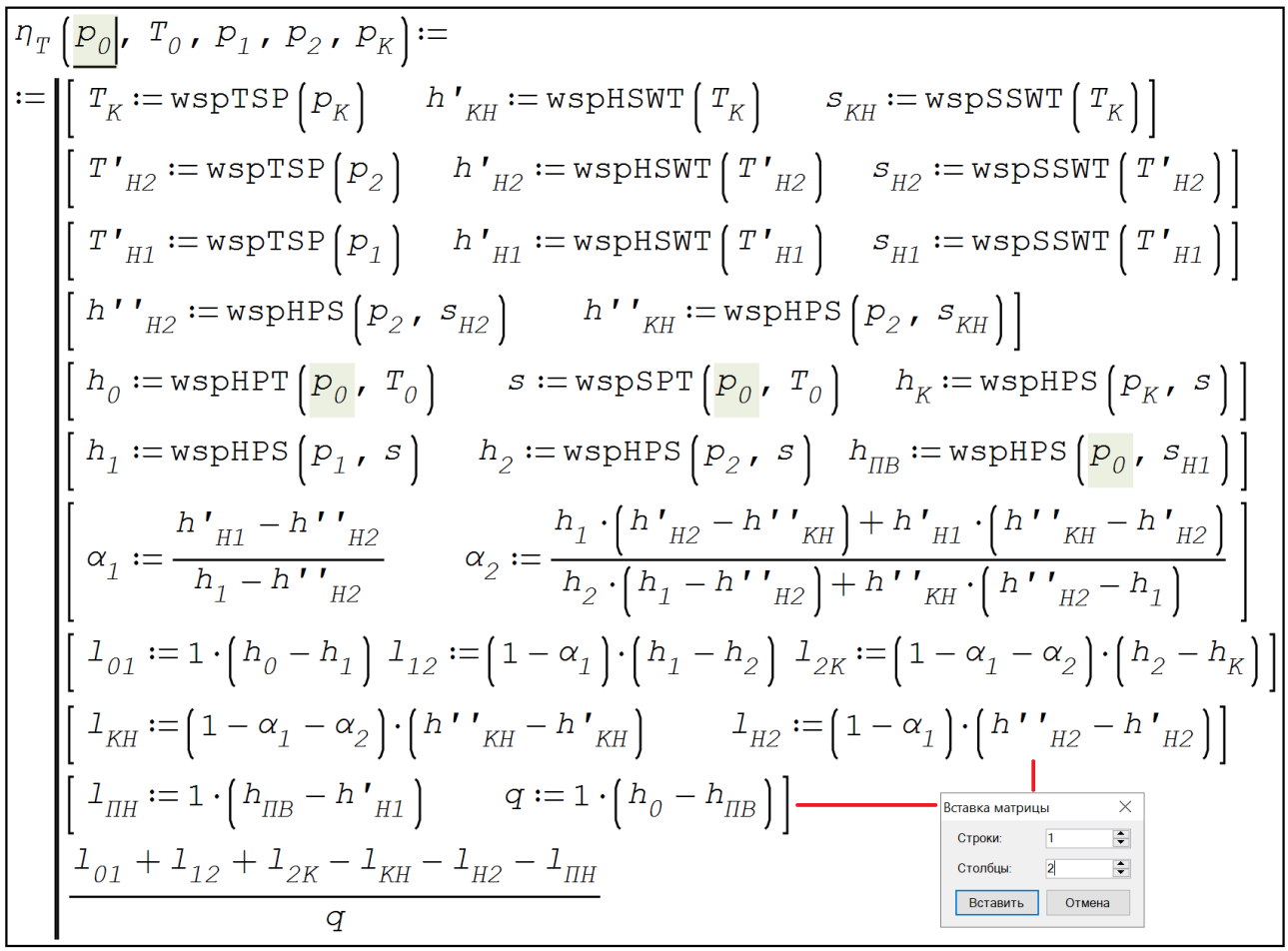


Рис. 10.5. Создание функции пользователя для подсчёта КПД

Внизу рисунка 10.5 показаны примеры вызовы функции η_T с разными значениями аргументов. Первые два вызова, когда значения третьего и четвертого аргументов равны либо давлению свежего пара p_0, либо давлению в конденсаторе p_K, выдают значения термического КПД цикла без регенеративных отборов пара, которые должны повышать этот показатель. Что и отображено на двух следующих примерах вызова функции η_T (последняя строка на рис. 10.5), подсказывающих, что есть оптимальные значения давлений отбора. Эта догадка подтверждена рисунком 10.6 с линиями одного уровня, обрамляющими точку максимума. А то, что это максимум, а не минимум, подтверждают четыре последних уже рассмотренных оператора на рис. 10.5 – отход от давлений p_0 и p_K приводит к росту КПД энергоустановки. См. также рис. 10.11 ниже.

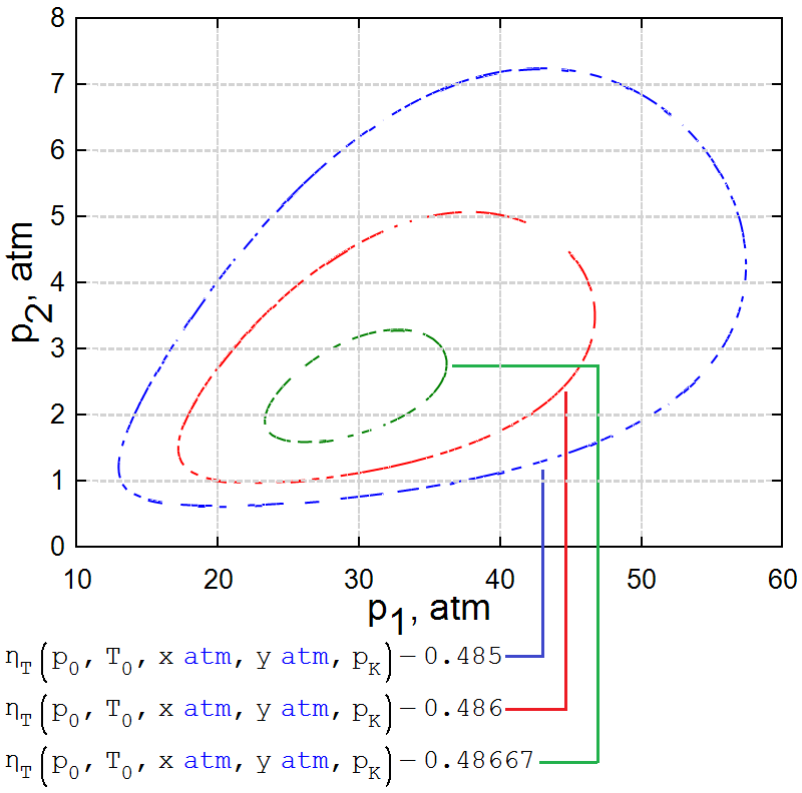


Рис. 10.6. Линии одного значения КПД ПТУ

Линии одного уровня на графике рис. 10.6 для значений КПД 0.485, 0.486 и 0.48667 получились не сплошными, а в трассирующем формате. Это связано со спецификой графики пакета SMath при отображении неявной функции. Тем не менее, из графика видно, что при p_1, равном примерно 30 atm, и при p_2, равном примерно 2-3 atm, КПД цикла ПТУ с двумя отборами пара достигает максимального значения. А как эти значения найти более-менее точно?!

Стандартные средства поиска точки максимума гладкой функции двух аргументов в среде SMath без дополнительных приложений (плагинов) такие: составляется система из двух уравнений (равенство нулю частных производных функции по двум аргументам) у которой ищутся корни с помощью встроенной функции `roots`. Но у нашей довольно сложной функции частные производные взять численно, тем более, аналитически практически невозможно. Поэтому мы пойдем другим путем – создадим программу, которая найдет точку максимума простым и наглядным способом [4]: авторским методом «Два шага» [5, глава 10] – см. рис. 10.7. В настоящее время наблюдается возрождение некоторых старых, добрых и понятных алгоритмов решения задач.

От заданной точки (вектор-аргумент *x*) делаются шаги заданного размера *D* в двух направлениях по всем её аргументам. В этих точках вычисляются значения анализируемой функции *F(x)*. Если в одной из точек значение функции окажется больше аналогичного значения при предыдущей итерации, то ведется переход в эту точку для дальнейших итерации. Если же это не так – во всех ближайших точках функция уменьшается, то значение шага поиска *D* сокращается вдвое, а поиск продолжается. Переменные оптимизации собраны в вектор, который может иметь длину, равной единице (функция одного аргумента), двум (как в нашем случае), трем, четырем и более. Итерации (приближения к минимуму) продолжаются до тех пор, пока (цикл `while`) шаг поиска не станет равен числу, меньшему, чем заданное. У нас это 0.0001 atm. Промежуточные значения аргументов целевой функции при поиске максимума заносятся в вектор *M*, элементы которого (шаги итераций) – это горизонтальные матрицы с одной строкой и с одним или двумя (как в нашем случае – см. левый верхний угол на рис. 10.7), тремя, четырьмя и более столбцами. Дополнительный цикл `for` в конце программы превращает этот составной массив (вектор, элементы которого горизонтальные векторы) в матрицу с двумя столбцами (наш случай) и *n* строками (количество итераций). В строках матрицы хранятся координаты промежуточных точек пути к максимуму. Все это отображено на рис. 10.7 и 10.8.

```
F(x) := η_T(p_0, T_0, x_1, x_2, p_K)

MaxTwoStep(x, D) :=
    L := length(x)   f_max := F(x)   j := 1   n := 1   M_1 := x^T
    while D > 0.0001 atm
        p := 1
        while p ≠ 0
            p := 0
            for i ∈ [1..L]
                for Δx ∈ [−D  D]
                    x_i := x_i + Δx   f := F(x)
                    if f > f_max
                        p := Δx   j := i   f_max := f
                    x_i := x_i − Δx
            x_j := x_j + p   n := n + 1   M_n := x^T
        D := D/2
    for i ∈ [1..length(M)]
        for j ∈ [1..L]
            M1_{i,j} := M_{i,j}
    M1
```

Рис. 10.7. Программа поиска максимума «Два шага»

На рисунке 10.8 показан вызов функции *MaxTwoStep*, ищущей точку максимума из начальной точки p_1=22 atm и p_2=1.2 atm с начальным шагом в 0.1 atm. Функция вернула матрицу (рис. 10.8), последний (102-й) элемент которой – это решение нашей задачи: давления в двух отборах (p_1=29.23 atm и p_2=2.306 atm), при которых термический КПД ПТУ будет максимальным – 48.683%. На рисунке 10.9 эта точка на графике окружена овалом – линией одного уровня с чуть меньшим значением 48.68%.

$$\begin{bmatrix} [22 \;\; 1.2] \\ [22 \;\; 1.3] \\ [22 \;\; 1.4] \\ [22 \;\; 1.5] \\ [22 \;\; 1.6] \\ [22 \;\; 1.7] \\ [22 \;\; 1.8] \\ [22.1 \;\; 1.8] \\ [22.2 \;\; 1.8] \end{bmatrix}$$

Вложенный массив (вектор, элементы которого - матрицы с одной строкой)

Матрица с двумя столбцами

$$\begin{bmatrix} 22 & 1.2 \\ 22 & 1.3 \\ 22 & 1.4 \\ 22 & 1.5 \\ 22 & 1.6 \\ 22 & 1.7 \\ 22 & 1.8 \\ 22.1 & 1.8 \\ 22.2 & 1.8 \\ 22.3 & 1.8 \\ 22.4 & 1.8 \\ 22.5 & 1.8 \\ 22.6 & 1.8 \\ 22.7 & 1.8 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \text{atm} \\ \\ 14 \end{matrix}$$

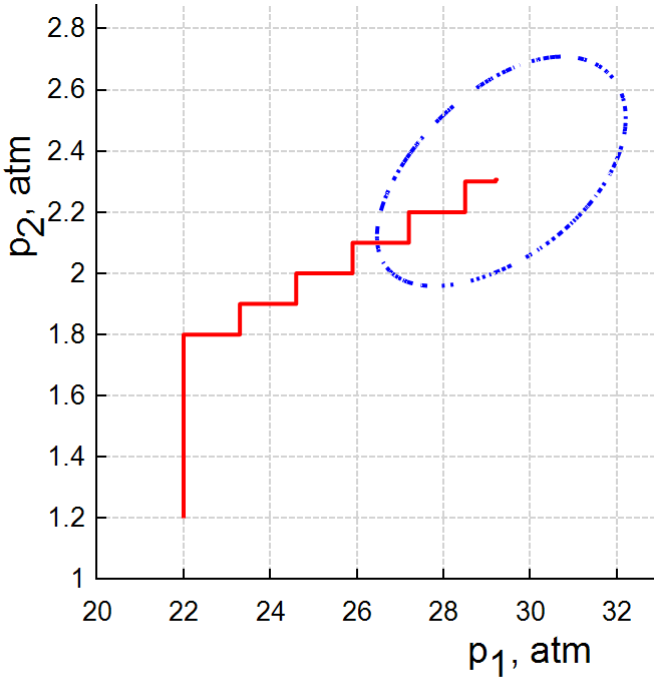
$$M := \left(MaxTwoStep\left(\begin{bmatrix} 22\ \text{atm} \\ 1.2\ \text{atm} \end{bmatrix}, 0.1\ \text{atm} \right) \right) = \begin{bmatrix} 29.22773 & 2.30625 \\ 29.22773 & 2.30625 \\ 29.22793 & 2.30625 \\ 29.22793 & 2.30625 \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ 102 \end{matrix}$$

$$n := \text{rows}(M) = 102$$

$$p_{1Opt} := M_{n\,1} = 29.23\ \text{atm} \qquad p_{2Opt} := M_{n\,2} = 2.306\ \text{atm}$$

$$\eta_{TOpt} := \eta_T\left(p_0, T_0, p_{1Opt}, p_{2Opt}, p_K\right) = 48.683\ \%$$

Рис. 10.8. Результат работы программы «Два шага» – числа

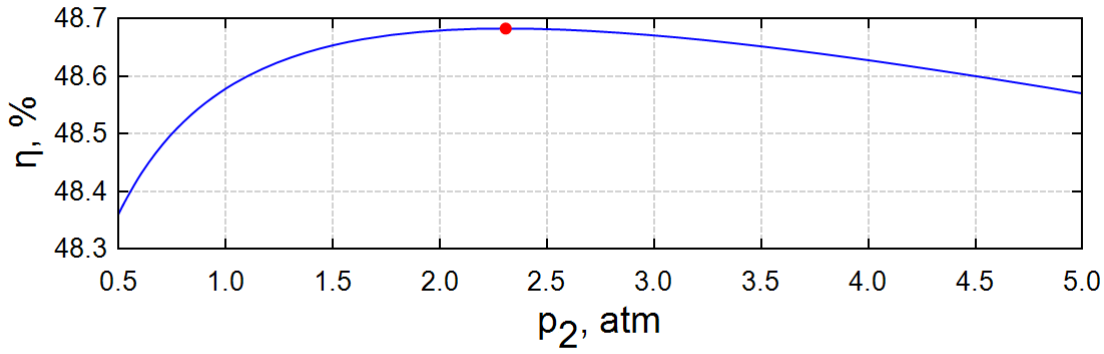


$$\begin{cases} \eta_T\left(p_0, T_0, x\ \text{atm}, y\ \text{atm}, p_K\right) - 48.68\ \% \\ \dfrac{M}{\text{atm}} \end{cases}$$

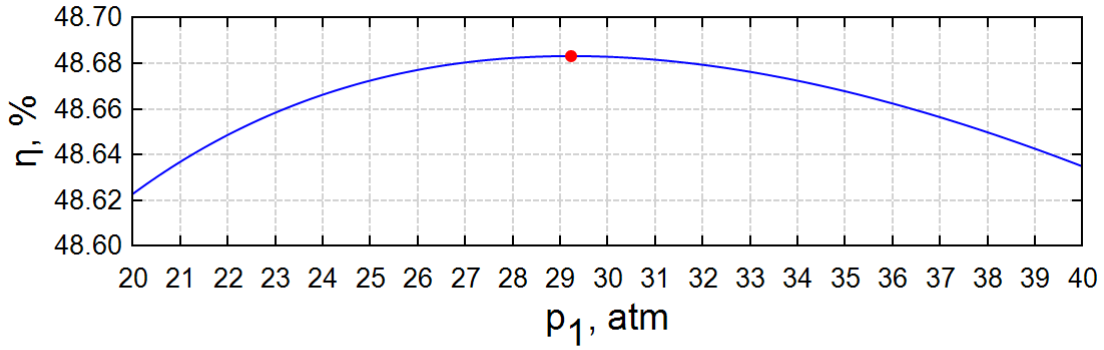
Рис. 10.9. Результат работы программы «Два шага» – график

Найденные в расчёте на рис. 10.8 значения давлений отбора пара регенеративных подогревателей для дополнительной проверки были подставлены в SMath-расчёт для построений двух графиков сечений поверхности функции η_T в её точке максимума – рис. 10.10.

$$p := \left[40\ \text{atm} \ , 40\ \text{atm} - \frac{40\ \text{atm} - p_K}{300} \ldots p_K \right]$$



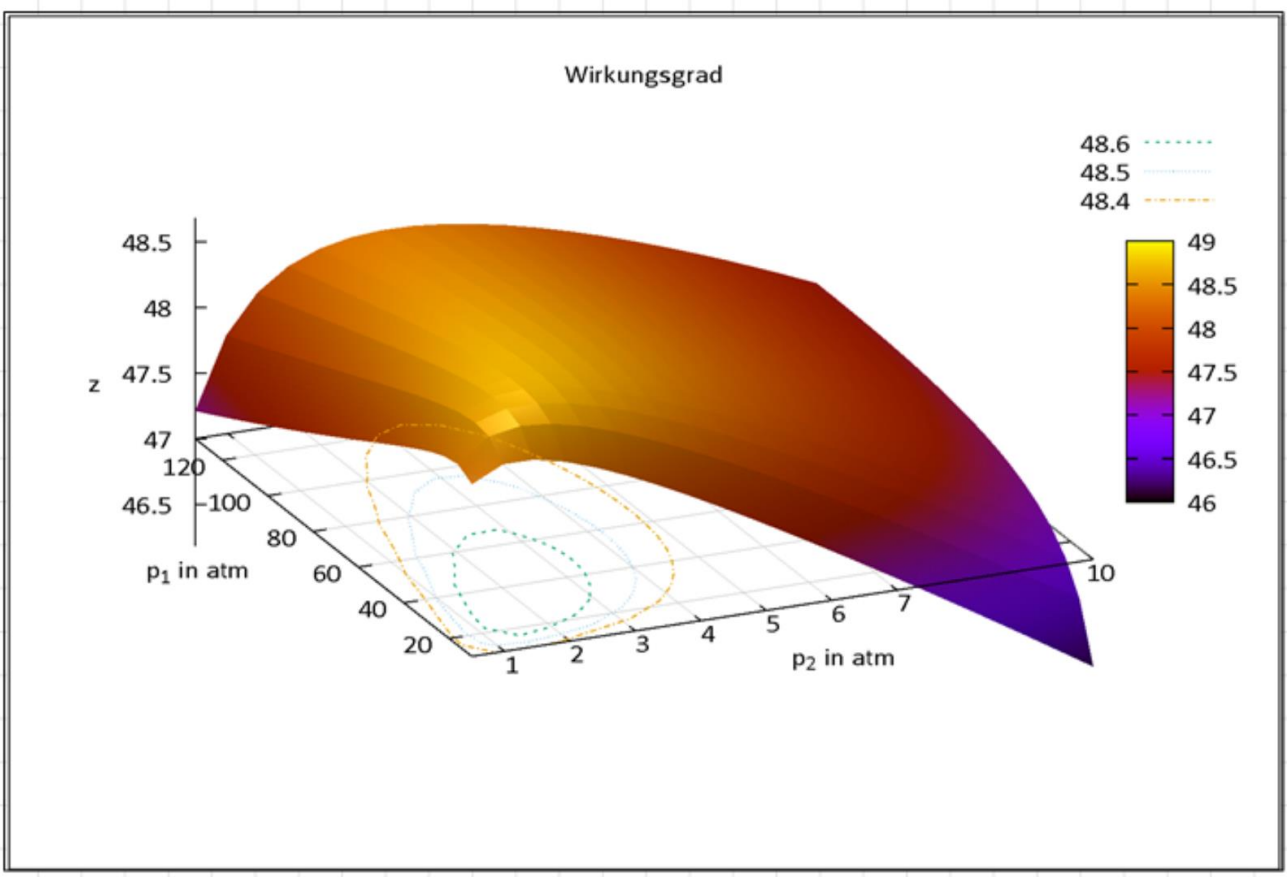
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{augment}\left(\dfrac{p}{\text{atm}}, \dfrac{\overrightarrow{\eta_T\left(p_0, T_0, p_{1Opt}, p, p_K\right)}}{\%} \right) \\ \left[\dfrac{p_{2Opt}}{\text{atm}} \ \dfrac{\eta_{TOpt}}{\%} \ \text{"."} \ 5 \ \text{"red"} \right] \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{augment}\left(\dfrac{p}{\text{atm}}, \dfrac{\overrightarrow{\eta_T\left(p_0, T_0, p, p_{2Opt}, p_K\right)}}{\%} \right) \\ \left[\dfrac{p_{1Opt}}{\text{atm}} \ \dfrac{\eta_{TOpt}}{\%} \ \text{"."} \ 5 \ \text{"red"} \right] \end{array} \right.$$

Рис. 10.10. Результат работы программы «Два шага» – два графика сечений поверхности

Построение не отдельных кривых, а поверхности с точкой максимума значения термического КПД, отображающей влияние на КПД давлений двух отборов, приведено также на форуме пользователей пакета SMath по адресу https://en.smath.com/forum/yaf_postsm82946_f-x--y----3D-plot-and-optimal-point.aspx. Для этого был задействован еще один плагин пакета SMath – программа Maxima (https://maxima.so5rceforge.io/ru/) – свободно распространяемая система компьютерной алгебры, существенно расширяющая возможности пакета SMath. Этот плагин позволил, в частности, построить на одном графике и поверхность, и линии одного уровня двухаргументной функции η_T (рис. 10.11).




```
key = " "
elevation_grid(M/%; p1,min/atm; p2,max/atm; (p1,max − p1,min)/atm; (p2,min − p2,max)/atm)
xyplane = 47
interpolate_color = true
contour_levels = set(48,4; 48,6; 48,5)
```

Рис. 10.11. Поверхность и линии одного уровня, отображающие влияние на КПД ПТУ давлений в двух отборах

На рисунке 10.12 показано графическое решений задачи определения оптимальной температуры питательной воды при одном отборе пара на внутреннюю теплофикацию. Задействована уже нам известная функция η_T, у которой третий и четвертый аргументы имеют одинаковые значения p, что эквивалентно одному, а не двум отборам пара из проточной части турбины. Кроме того, был применен так называемый параметрический график – в решении на рис. 10.11 параметр p – это свободная переменная, которая является аргументом двух функций: `wspTPS` и η_T, по которым и строится данный параметрический график.

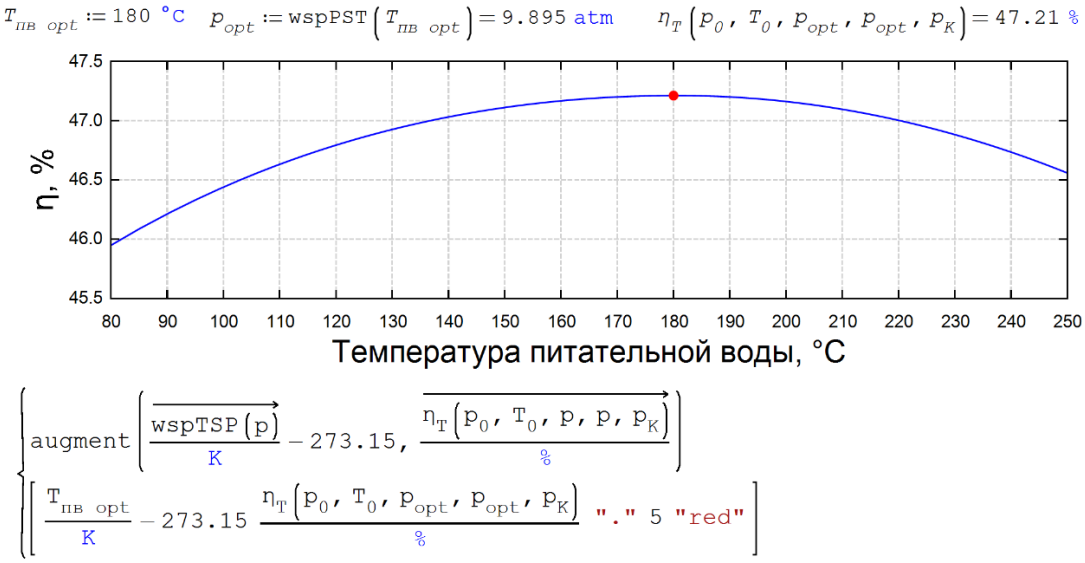


Рис. 10.12. Графическая зависимость термического КПД паротурбинной установки от температуры питательной воды

Оптимальное значение температуры питательной воды (примерно 180°C) в задаче на рис. 10.12 было определено визуально, но его можно найти более точно с помощью ещё одной авторской SMath-программы под названием «Золотое сечение» – см. рис. 10.13, работающей по такому алгоритму.

Интервал, где находится максимум (у нас в задаче от p_0 до p_K), делят с двух сторон в золотой пропорции. Эту работу выполняет вспомогательная пользовательская функция с именем *GR* (Golden Ratio – золотое соотношение) с двумя аргументами. Затем проверяется, при каком золотом сечении – левом или правом анализируемая функция имеет большее

значение. Если при левом сечении, то интервал поиска минимума уменьшается со смещением влево, если при правом, то со смещением вправо. В новом уменьшенном интервале рассчитывается слева новое золотое сечение и, что очень важно, используется второе старое, уже рассчитанное сечение. Такие действия повторяют до тех пор, пока значения концов интервала станут примерно равны. Золотая пропорция позволяет в цикле вычислять значение анализируемой функции только один, а не два раза. Эта особенность программы была очень важна, а в ряде случаев была критической во времена тихоходных электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ) – так раньше у нас назывались компьютеры. В настоящее время, когда скорость работы компьютеров возросла неимоверно, можно позволить себе использование «тихоходных» алгоритмов, в которых присутствуют лишние вычисления. Так в программе «Два шага» можно заметить двойное вычисление значения целевой функции η_T в одной и той же точке. Это лишнее действие можно, конечно, исключить за счет усложнения программы. Другой алгоритм – покоординатный подъём к точке максимума с использованием метода золотого сечения (задание читателю). Но все это будет затруднять понимание сути расчёта. Наша функция η_T выдает ответ за доли секунды, а что будет, если счет по функции будет длиться часами?!

$p_0 := 130\ \text{atm} \quad T_0 := 540\ °\text{C} \quad p_K := 30\ \text{mmHg}$

⊞—В этой свернутой области находится функция, показанная на рис. 10.5 ——————

$F(x) := \eta_T(p_0, T_0, x, x, p_K)$

$\text{maple}\left(\text{solve}\left(\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a}, a\right)\right) = \begin{bmatrix} \frac{b\cdot(1+\sqrt{5})}{2} \\ \frac{b\cdot(1-\sqrt{5})}{2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{(1+\sqrt{5})}{2} \\ \frac{(1-\sqrt{5})}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.618 \\ -0.618 \end{bmatrix}$

$MinGR(F, a, b) :=$ "Поиск максимума методом золотого сечения"

$GR(a, b) := \frac{3}{2}\cdot b - \frac{1}{2}\cdot a + \frac{1}{2}\cdot\sqrt{5}\cdot(a-b)$

$\left[x_1 := GR(a, b)\ y_1 := F(x_1)\ x_2 := GR(b, a)\ y_2 := F(x_2)\right]$

while $a \neq b$

  if $y_1 > y_2$

    $\left[b := x_2\ x_2 := x_1\ y_2 := y_1\ x_1 := GR(a, b)\ y_1 := F(x_1)\right]$

  else

    $\left[a := x_1\ x_1 := x_2\ y_1 := y_2\ x_2 := GR(b, a)\ y_2 := F(x_2)\right]$

$\frac{a+b}{2}$

$p_{opt} := MinGR(F, p_0, p_K) = 10.00278\ \text{atm} \qquad T_{opt} := \text{wspTSP}(p_{opt}) = 180.5\ °\text{C}$

Рис. 10.13. Программа «Золотое сечение»

Найденный ответ (оптимальная температура питательной воды равна 180.5°C) почти совпала с нашей визуальной оценкой 180°C, показанной на рис. 10.12.

Авторы, честно говоря, собирались в этой главе использовать пакет CoolProp Wrapper (см. главу 2), а не пакет WaterSteamPro (см. главу 1), который требует бесплатного или платного лицензирования. Но…

На рисунке 10.14 показано, как будет выглядеть функция пользователя η_T, если её переписать с опорой не на пакет WaterSteamPro (рис. 10.5), а на пакет CoolProp Wrapper. Первый оператор на рис. 10.14 делает настройку на работу с формуляцией Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара 1997 года ("IF97::H2O").

$$wf := \text{"IF97::H2O"}$$

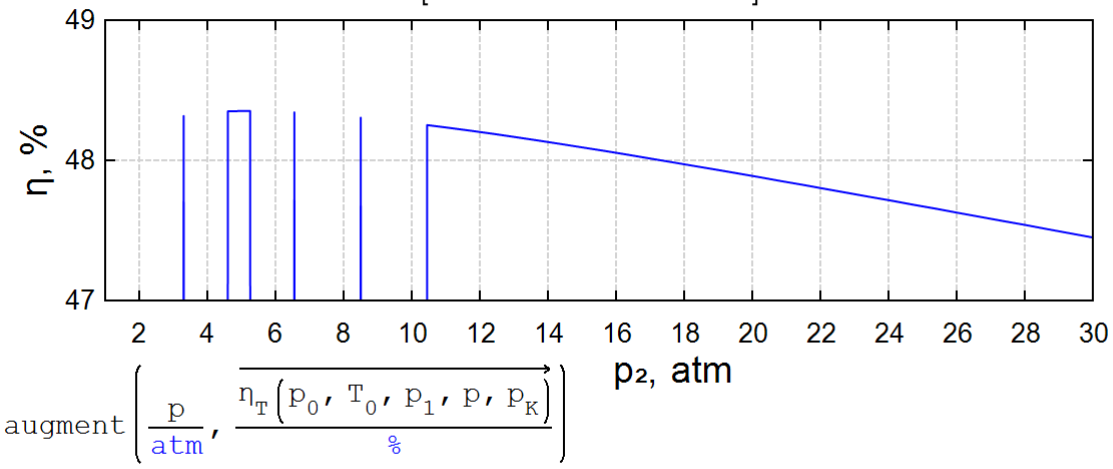
$$\eta_T(p_0, T_0, p_1, p_2, p_K) :=$$

$$:= \left| \begin{array}{l}
\left[T_K := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_K, "Q", 0.5, wf) \quad h'_{KH} := \text{CoolProp_Props}("H", "T", T_K, "Q", 0, wf) \right] \\
\left[s_{KH} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T_K, "Q", 0, wf) \quad T'_{H2} := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_2, "Q", 0.5, wf) \right] \\
\left[h'_{H2} := \text{CoolProp_Props}("H", "T", T'_{H2}, "Q", 0, wf) \quad s_{H2} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T'_{H2}, "Q", 0, wf) \right] \\
\left[T'_{H1} := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_1, "Q", 0.5, wf) \quad h'_{H1} := \text{CoolProp_Props}("H", "T", T'_{H1}, "Q", 0, wf) \right] \\
\left[s_{H1} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T'_{H1}, "Q", 0, wf) \quad T'_{H1} := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_1, "Q", 0.5, wf) \right] \\
\left[h'_{H1} := \text{CoolProp_Props}("H", "T", T'_{H1}, "Q", 0, wf) \quad s_{H1} := \text{CoolProp_Props}("S", "T", T'_{H1}, "Q", 0, wf) \right] \\
\left[T_{ПВ} := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_0, "S", s_{H1}, wf) \quad h''_{H2} := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_2, "S", s_{H2}, wf) \right] \\
\left[h_0 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_0, "T", T_0, wf) \quad s := \text{CoolProp_Props}("S", "P", p_0, "T", T_0, wf) \right] \\
\left[h_K := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_K, "S", s, wf) \quad h_1 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_1, "S", s, wf) \right] \\
\left[h_2 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_2, "S", s, wf) \quad h_{ПВ} := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_0, "S", s_{H1}, wf) \right] \\
\left[T''_{H2} := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_2, "S", s_{H2}, wf) \quad h''_{KH} := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_2, "S", s_{KH}, wf) \right] \\
\left[\alpha_1 := -\dfrac{h''_{H2} - h'_{H1}}{h_1 - h''_{H2}} \quad \alpha_2 := -\dfrac{h_1 \cdot (-h'_{H2} + h''_{KH}) + h'_{H1} \cdot (h'_{H2} - h''_{KH})}{h_2 \cdot (h_1 - h''_{H2}) + h''_{KH} \cdot (h''_{H2} - h_1)} \right] \\
\left[l_{01} := 1 \cdot (h_0 - h_1) \quad l_{12} := (1 - \alpha_1) \cdot (h_1 - h_2) \quad l_{2K} := (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_2 - h_K) \right] \\
\left[l_{KH} := (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h''_{KH} - h'_{KH}) \quad l_{H2} := (1 - \alpha_1) \cdot (h''_{H2} - h'_{H2}) \right] \\
\left[l_{ПН} := 1 \cdot (h_{ПВ} - h'_{H1}) \quad q := 1 \cdot (h_0 - h_{ПВ}) \right] \\
\dfrac{l_{01} + l_{12} + l_{2K} - l_{KH} - l_{H2} - l_{ПН}}{q}
\end{array} \right.$$

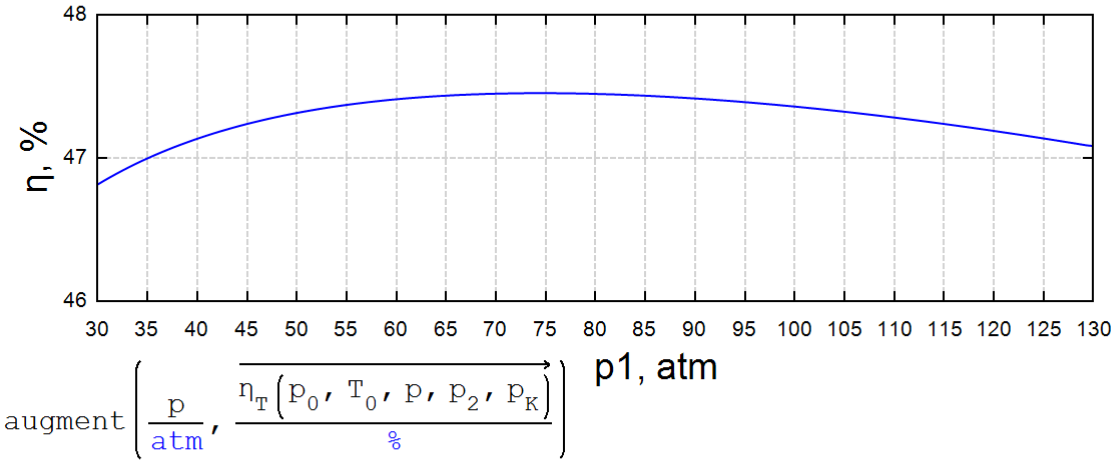
Рис. 10.14. Создание функции, возвращающей термический КПД паротурбинной установки с двумя смешивающими регенеративными подогревателями (CoolProp Wrapper)

На рисунке 10.15 показаны неудачные попытки построения графиков по функции η_T, созданной с опорой на пакет CoolProp Wrapper.

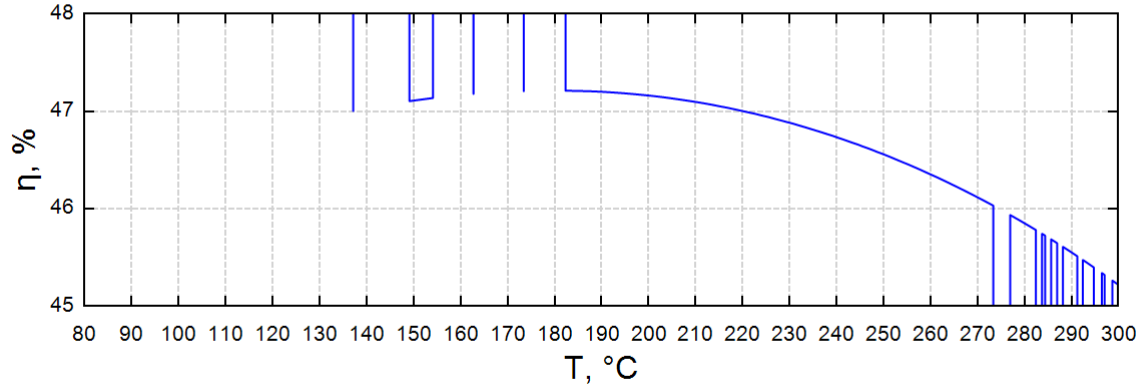
$$p := \left[p_0 , p_0 - \frac{p_0 - p_K}{200} .. p_K \right]$$



$$\text{augment}\left(\frac{p}{\text{atm}} , \frac{\overrightarrow{\eta_T\left(p_0, T_0, p_1, p, p_K\right)}}{\%} \right)$$



$$\text{augment}\left(\frac{p}{\text{atm}} , \frac{\overrightarrow{\eta_T\left(p_0, T_0, p, p_2, p_K\right)}}{\%} \right)$$



$$\text{augment}\left(\frac{\overrightarrow{\text{CoolProp_Props}\left("T", "P", p, "Q", 0, wf\right)}}{K} - 273.15 , \frac{\overrightarrow{\eta_T\left(p_0, T_0, p, p, p_K\right)}}{\%} \right)$$

Рис. 10.15. Недостроенные графики (CoolProp Wrapper и формуляция IAPWS 1997 года)

Вывод. Пакет CoolProp Wrapper не годится для решения задачи, описанной в этой главе книги. На сайте https://community.ptc.com/t5/Mathcad/CoolProp-6-3-0-Released-Wrappers-for-Mathcad-15-and-Prime/m-p/966085 поднимается эта тема относительно пакета Mathcad – американской версии SMath.

Послесловие к главе

Данная глава называется «Внутренняя теплофикация паротурбинной установки».

Но если есть внутренняя, то должна быть и *внешняя* теплофикация – если есть двигатель внутреннего сгорания (см. главу 4), то должен быть двигатель и внешнего сгорания (см. главу 3). Да, внешняя теплофикация, конечно, есть и реализуется она на особом типе тепловых электростанциях – на *теплоэлектроцентралях* (ТЭЦ). Из паровой турбины ТЭЦ пар отбирается не только в регенеративные, но и *в сетевые подогреватели*, где подогревается вода *тепловых сетей*. ТЭЦ генерирует два вида энергии – электричество и тепло –бигенерация. А ещё есть тригенерация, квадрогенерация и т.д. (n-генерация [6, 7]).

Вспоминается такая теплоэнергетическая притча.

Если студент энергетического университета (московского, казанского или ивановского) на семинарских занятиях по технической термодинамике скажет, что теплота измеряется калориями, то преподаватель его поправит и скажет, что любой вид энергии измеряют джоулями. Калории давно уже устарели, пока допустимы, но не желательны. Тем более в святая святых – в термодинамике, в технической термодинамике[57].

Если молодой работник ТЭЦ (московской, казанской, ивановской или любой другой) – недавний выпускник энергетического университета скажет, что его электростанция имеет такую-то тепловую мощность, выраженную в МВт (см. рис. 10.16), то старшие товарищи его поправят и скажут, что тепловая мощность станции измеряется в Гкал/ч. И добавят при этом вслух или по себя: "Ох, плохо же вас учили в МЭИ (КГЭУ, ИГЭУ)!".

И дело здесь не только в привычке, в традициях – всё намного глубже [8].

Электрическая энергия – это энергия первого рода (первосортная энергия). Она намного ценнее тепловой энергии (энергии второго рода – второсортная энергия). Потребитель,

[57] Есть ещё одна притча – не притча: прикладная математика отличается от математики, как милостивый государь отличается от государя. Что-то подобное можно сказать и про техническую термодинамику вкупе с просто термодинамикой?

получая электроэнергию, может использовать её, переводя в тепло[58], не только с помощью простого электронагревателя, но и с помощью более сложного теплового насоса (см. главу 5), получая при этом в 2-3 раза больше энергии. С другой стороны, потребитель, получая тепло с ТЭЦ в виде горячей воды или пара, может преобразовать его в электричество посредством тепловой машины (см. главу 4 и 8), получая при этом в 2-3 раза меньше электроэнергии. Это один из основополагающих принципов термодинамики. Но тепловой насос намного сложнее и дороже электронагревателя такой же мощности, поэтому в их сравнении должны быть учтены и технико-экономические оценки.

В расчёт на рисунке 10.16 перенесена с сайта Мосэнерго пара основных характеристик ТЭЦ-11: установленная электрическая мощность и установленная тепловая мощность. Перечеркивание пяти операторов в нашем расчёте акцентирует внимание на том факте, что две единицы мощности – мегаватт и гигакалория в час – это единицы по сути разных физических величин, которые нельзя, например, складывать. По-хорошему, оператор сложения двух мощностей на рис. 10.16 должен давать не численный ответ с той или иной единицей мощности, а сообщение об ошибке – см. рис. 10.17.

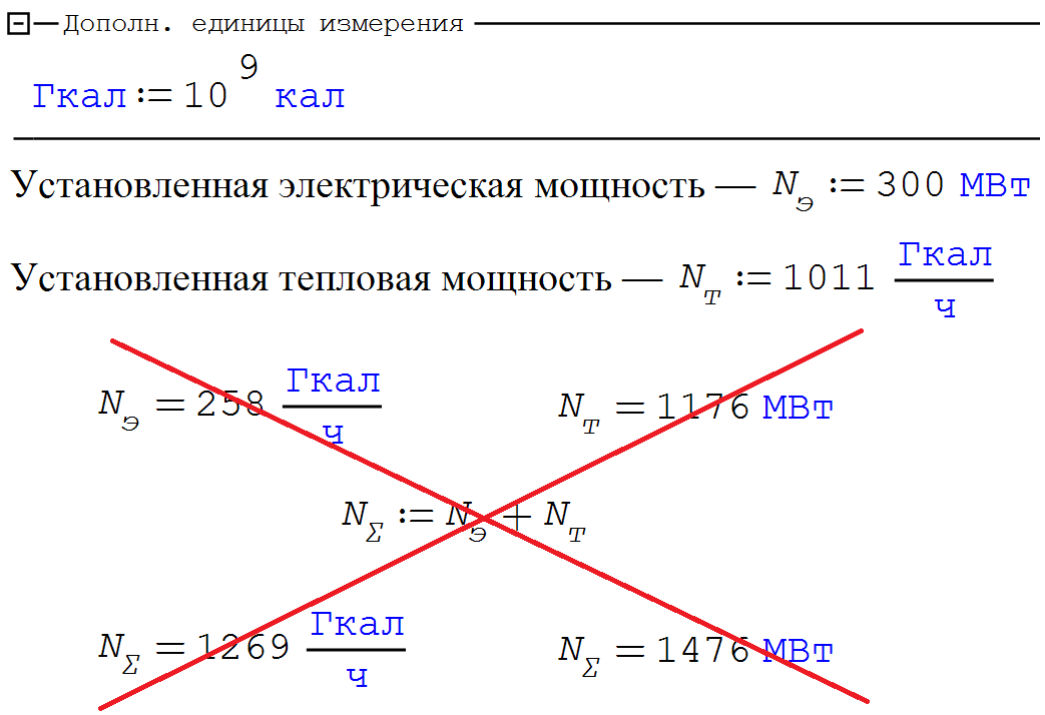


Рис. 10.16. Попытка обработки параметров ТЭЦ-11 Мосэнерго

[58] Практически вся электроэнергия в конце концов переводится (рассеивается) в тепло. За редким исключением: электрический подъёмный кран, например, поднимает материалы на строящееся здание – увеличивая тем самым их потенциальную энергию.

Не всё так просто и с электрической мощностью на электростанциях и в электрических сетях. Если говорить о переменном токе, то есть активная мощность P, которая измеряется ваттами, есть реактивная мощность Q, измеряемая в вольт-амперах реактивных (в варах – VAR или var) и есть полная мощность S в вольт-амперах. И эти мощности тоже в принципе нельзя напрямую складывать – см. рис. 10.17.

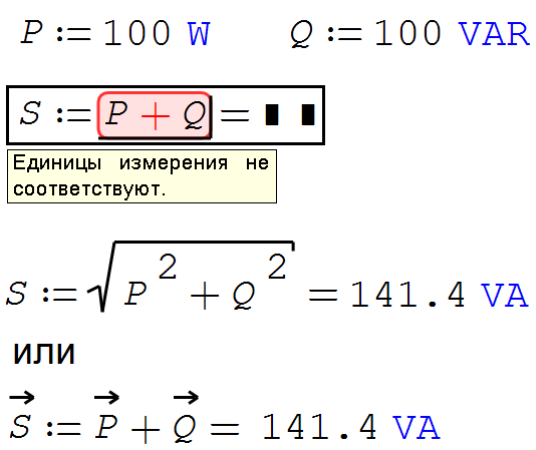


Рис. 10.17. Мощности переменного тока – правильная работа с единицами измерения

На рисунке 10.16 «неправильные» операторы перечеркнуты, а на рис. 10.17 они сымитированы. На самом деле в текущей версии SMath будет вот что – см. рис. 10.18. За такие вычисления студент-электрик получит двойку[59], и его возражения в том плане, что «так SMath посчитал» не будут приняты преподавателем. Более того, такие расчеты лишний раз убедят некоторых преподавателей во вреде расчетов на компьютере. Переиначивая старую поговорку, можно сказать так: «Заставь дурака считать на компьютере (или без компьютера), так он и лоб расшибёт!».

[59] Про профессора К.А. Круга (https://ru.wikipedia.org/wiki/Круг,_Карл_Адольфович) рассказывают такую байку. Сдает ему студент экзамен по теоретическим основам электротехники. Карл Адольфович прерывает студента и ласково говорит ему: “Вы, батенька, закона Ома не знаете! Ну-ка, посмотрим, что у вас стоит по физике?”. Профессор перелистывает зачётку студента видит там тройку по физике, зачеркивает её и говорит обалдевшему студенту: “Вы, мой любезный, сначала физику изучите и сдайте раздел про электричество, а потом уж приступайте к освоению моей дисциплины!”. Деканат в шоке и пытается как-то исправить эту экстраординарную ситуацию. Этому профессору такие поступки сходили с рук – уж очень он был авторитетен: был сподвижником Кржижановского – вместе разрабатывали план ГОЭРЛО.

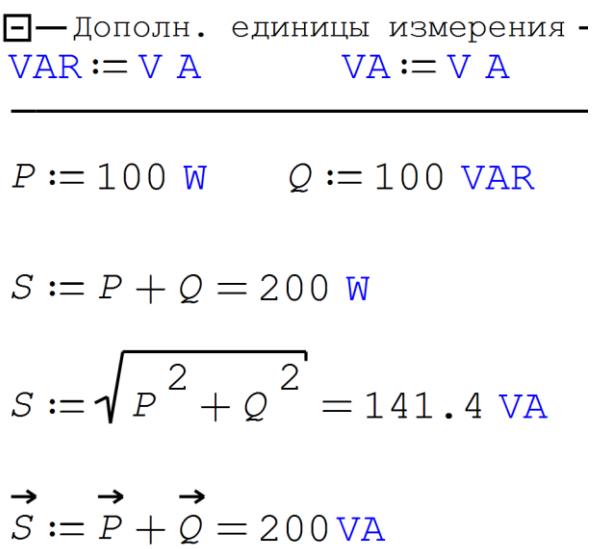


Рис. 10.17. Мощности переменного тока – «неправильная» работа с единицами измерения

Вообще-то инструментарий единиц измерения физико-математических пакетов типа SMath, Mathcad, Maple и др. нуждается в существенной доработке – во включении в него элементов искусственного интеллекта (ИИ). Для того, чтобы, например, разобраться в вычислительных ситуациях, отображенных на рис. 10.16 и 10.17. В главе 11, кстати, в добавок к разным ваттам появятся и разные килограммы (см. рис. 11.1-11.3), которыми нужно оперировать при расчете тех же тепловых электрических станций. И не только. Задействование элементов ИИ в расчетные программы может, например, приводить к появлению подсказок типа «Да, вы можете вводить в расчет давление в атмосферах физических, но лучше использовать здесь мегапаскали!». Даже без ИИ уже сейчас можно сделать так, что при «выводе на печать» значения давления или другой какой-либо физической величины, будут выбираться соответствующие единицы давления с кратными множителями кило, мега, гига и др., а не только «голые» паскали, которые пользователь должен подправлять.

Появилась «первая ласточка» в плане использования ИИ в расчётных программах. Первым пунктом анонса программы Maple 2024 стоит упоминание о том, что в этой программе задействованы элементы ИИ для, например, правильного выбора расчётных формул.

Кстати, о программе Maple. На сайте разработчика этой программы (www.maplesoft.com) в разделе Maple Application Center размещены авторские расчеты в область технической термодинамики – см. рис. 10.19.

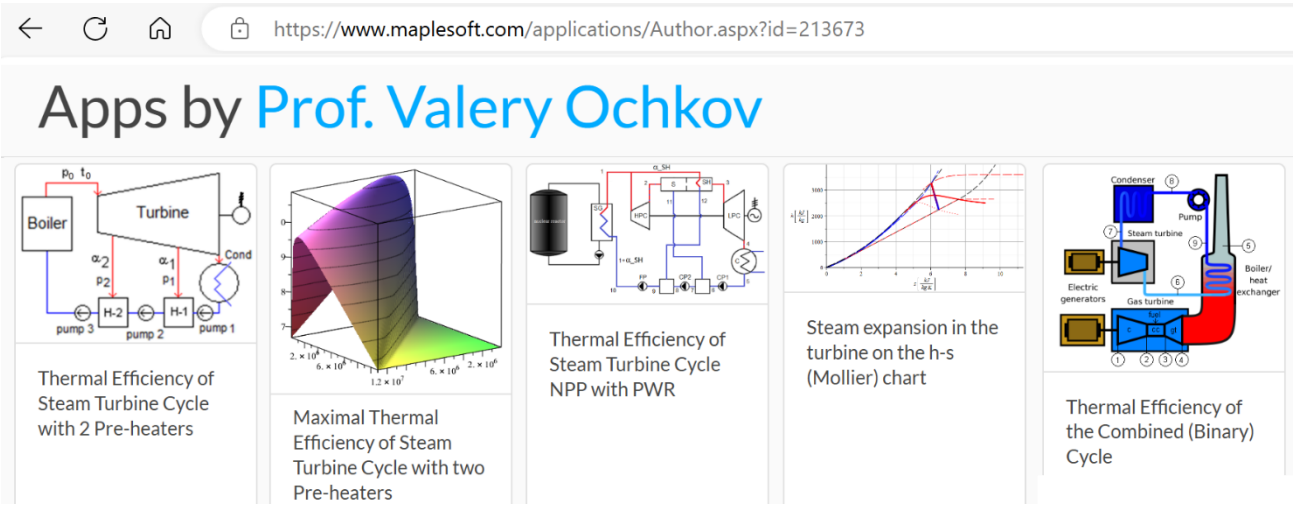
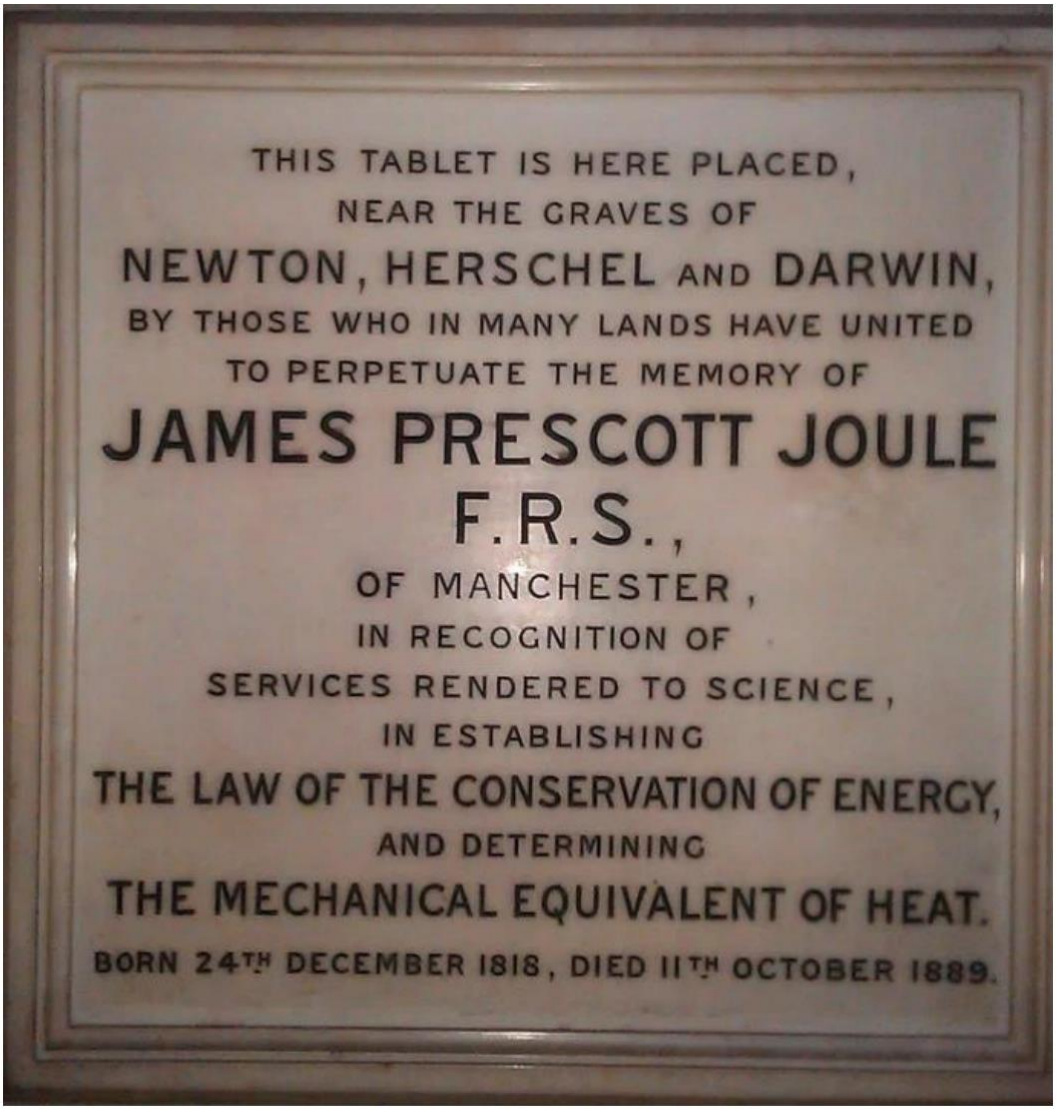


Рис. 10.19. Сайт с термодинамическими расчетами в среде Maple

С данного сайта можно скачать соответствующие Maple-файлы и работать ними, если, конечно, на вашем компьютере установлена данная программа. Если программы нет, то можно просматривать pdf-документы. Так, кстати, устроен и сайт данной книги http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath, где размещены и заархивированные SMath-файлы, и соответствующие pdf-документы.

И последнее.

На рисунке 10.20 помещено авторское фото памятной таблички, висящей в Вестминстерском аббатстве Лондона, с надписью «*Эта табличка установлена здесь <…>, чтобы увековечить память Джеймса Прескотта Джоуля, члена Королевского общества Манчестера, в знак признания заслуг, оказанных им науке в установлении закона сохранения энергии и определении механического эквивалента теплоты*».




```
1 cal ≈ 4.19 joule ≈ 4.19 newton m ≈ 4.19 volt coul
```

Рис. 10.20. Мемориальная табличка в Вестминстерском аббатстве

Знак «примерно равно», использованный при записи выражения внизу рисунка 10.20, говорит не только о том, что калория (тепловая энергия) – это примерно (округлённо) 4.19 джоуля (просто энергия) или 4.19 ньютона на метр (механическая энергия), или 4.19 вольта на кулон (электрическая энергия), но и косвенно о том, что отображено на рис. 10.16.

И самое последнее.

Девятнадцатое апреля (4.19 – см. рис. 10.20) можно сделать Днем теплотехники. По примеру того, как во многих странах мира 14 марта (3.14) отмечают День математики.

Задание читателям:

1. Создайте функцию, возвращающую КПД паротурбинного цикла при одном отборе пара на подогрев питательной воды
2. Создайте функцию, возвращающую КПД паротурбинного цикла при трех и более отборах пара на подогрев питательной воды
3. Решите описанные в главе задачи не для смешивающих, а для поверхностных подогревателей
4. Напишите программу поиска оптимума функции многих аргументов методом покоординатного спуска с золотым сечением; постройте на графике траекторию такого поиска максимума (см. рис. 10.9).

Литература:

1. Н. Д. Рогалев, А. А. Дудолин, Е. Н. Олейникова Тепловые электрические станции. Изд-во МЭИ, 2022. – 768 с. – URL: http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=12032 (дата обращения: 10.09.2022)
2. Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, J. Eng. Gas Turbines & Power 122, 150-182 (2000) (http://iapws.org/relguide/IF97-Rev.html)
3. Очков В.Ф., Орлов К.А., Александров А.А., Очков А.В. Свойства воды и водяного пара: сетевые, открытые, интерактивные IT-ресурсы // Теплоэнергетика. № 5. 2015 г. С. 71-80 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/IAPWS-TE.pdf)
4. Очков В.Ф., Чудова Ю.В. Вычислительный ренессанс: метод Ньютона // Энергия: экономика, техника, экология. № 9. 2023 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-9-2023-Newton.pdf).
5. Информационные технологии в инженерных расчетах: SMath и Python / В. Ф. Очков, К. А. Орлов, Ю. В. Чудова [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 212 с. — ISBN 978-5-507-45821-9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/319406 (дата обращения: 07.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Очков В.Ф. Сохранение и развитие тепловых электростанций, n-генерация // Энергосбережение и водоподготовка. №1 (105). 2017. С.50-61 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/n-gen.pdf)
7. Установки для трансформации тепла и охлаждения: расчеты на SMath : учебное пособие для вузов / Н. Л. Бударин, А. В. Мартынов, В. Ф. Очков [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 184 с. (https://e.lanbook.com/book/414824)
8. Елисейкин М.М., Очков В.Ф., Метрологический дефицит в промышленных «больших данных» // Законодательная и прикладная метрология. 2024. № 4. С. 19–24 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/ZPM-4-2024-21-26.pdf).

Глава 11. Расчет парогазового (бинарного) цикла

Один из способов повышения эффективности работы тепловых электростанций – это переход на парогазовые установки (ПГУ), использующих два рабочих тела – воду и водяной пар в паротурбинной части (ПТУ), а также воздух и дымовые газы в газотурбинной части (ГТУ). Второе название ПГУ – бинарная установка [1-3].

На рис. 11.1, 11.2 и 11.3 показан расчет в среде SMath с опорой на функции пакета WaterSteamPro (см. главу 1) термического КПД простейшей обратимой (идеальной) ПГУ, горелка котла (котла-утилизатора – ку) которой заменена на газотурбинную установку (цикл Брайтона) с воздушным компрессором (к), камерой сгорания (кс), газовой турбиной (гт) и электрическим генератором (г).

На рис. 11.1 в начале расчета приведена схема парогазовой установки и условные T, s – диаграммы отдельных термодинамических циклов (газотурбинного и пароводяного), в нем задействованных. Эти диаграммы «мертвые» в том смысле, что изменение исходных параметров установки (см. операторы присваивания справа и слева от схемы цикла) не приводит к соответствующим изменениям на диаграммах. Но на авторских сайтах http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd (паротурбинный цикл – см. главу 8) и http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/GTU.xmcd (газотурбинный цикл) приведены «живые» диаграммы, меняющие свой вид при изменении исходных параметров циклов. Более того, на сайте паротурбинного цикла можно выбирать оси диаграмм и строить не только двухмерные, но и трехмерные диаграммы (см. пример на рис. 3.11 в главе 3), прибавляя к температуре и удельной энтропии (T, s – диаграмма) давление, например (T, s , p – диаграмма). Но отобразить на одной «живой» диаграмме два цикла – пароводяной и газовый не так просто из-за того, что у рабочих тел этих циклов (водяной пар и смеси газов) базовые точки по давлению и температуре при подсчёте энтальпии и энтропии разные. И мы постараемся решить эту проблему ниже.

Дополнительные единицы измерения

кДж/кг пара := $\frac{kJ}{kg}$ кДж/(кг пара•K) := $\frac{kJ}{kg\,K}$ кДж/кг воды := $\frac{kJ}{kg}$ кДж/(кг воды•K) := $\frac{kJ}{kg\,K}$

Вставка

Области

Параметры ГТУ:

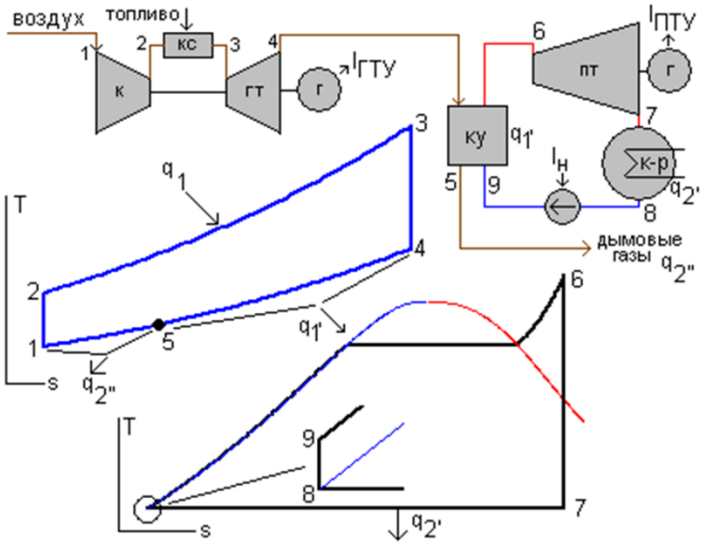
$p_1 := 0.1MPa$

$T_1 := 15\,°C$

$p_2 := 1MPa$

$T_3 := 1100\,°C$

$T_5 := 130\,°C$



Параметры ПТУ:

$T_6 := 480\,°C$

$p_6 := 9MPa$

$p_7 := 4.76кПа$

Обозначения:
ГТУ - газотурбинная установка
к - компрессор
кс - камера сгорания
гт - газовая турбина
ПТУ - паротурбинная установка
ку - котел-утилизатор
пт - паровая турбина
к-р - конденсатор
н - питательный насос
ПГУ - парогазовая установка

Удельная энтальпия водяного пара на входе в турбину: $h_6 := wspHPT(p_6, T_6) = 3336.3\,кДж/кг\ пара$

Удельная энтропия водяного пара на входе в турбину: $s_6 := wspSPT(p_6, T_6) = 6.593\,кДж/(кг\ пара•K)$

Удельная энтропия водяного пара на входе в турбину: $s_6 := wspSPT(p_6, T_6) = 6.593\,кДж/(кг\ пара•K)$

Температура влажного водяного пара на выходе из турбины: $T_7 := wspTSP(p_7) = 32.00\,°C$

Удельная энтропия влажного водяного пара на выходе из турбины: $s_7 := s_6 = 6.593\,кДж/(кг\ пара•K)$

Удельная энтропия насыщенного водяного пара при T_7: $s_{7sw} := wspSSWT(T_7) = 0.4643\,кДж/(кг\ пара•K)$

Удельная энтропия воды на линии насыщенияпри T_7: $s_{7ss} := wspSSST(T_7) = 8.411\,кДж/(кг\ пара•K)$

Степень сухости пара на выходе из турбины: $x_7 := \frac{s_7 - s_{7sw}}{s_{7ss} - s_{7sw}} = 77.12\,\%$

Удельная энтальпия насыщенного водяного пара при T_2: $h_{7ss} := wspHSST(T_7) = 2559.19\,кДж/кг\ пара$

Удельная энтальпия воды на линии насыщения при T_2: $h_{7sw} := wspHSWT(T_7) = 134.12\,кДж/кг\ воды$

Удельная энтальпия влажного водяного пара на выходе из турбины: $h_7 := x_7 \cdot (h_{7ss} - h_{7sw}) + h_{7sw} = 2004.39\,кДж/кг\ пара$

Удельная энтальпия воды на входе в питательный насос: $h_8 := h_{7sw} = 134.12\,кДж/кг\ воды$

Удельная энтропия воды на входе в питательный насос: $s_8 := s_{7sw} = 0.4643\,кДж/(кг\ воды•K)$

Удельная энтальпия воды на входе в котел: $h_9 := wspH1PT(p_6, T_9) = 143.13\,кДж/кг\ воды$

Удельная теплота, подводимая к котлу: $q_1 := h_6 - h_9 = 3193.2\,кДж/кг\ пара$

Удельная работа паровой турбины: $l_{пт} := h_6 - h_7 = 1331.95\,кДж/кг\ пара$

Удельная работа питательного насоса: $l_{пн} := h_9 - h_8 = 9.011\,кДж/кг\ воды$

Термический КПД цикла: $\eta_{ПТУ} := \frac{l_{пт} - l_{пн}}{q_1} = 41.43\,\%$

Рис. 11.1. Расчет паротурбинной части парогазового цикла

⊡—Дополнительные единицы измерения

кДж/кг газа := $\frac{kJ}{kg}$ кДж/(кг газа•K) := $\frac{kJ}{kg\,K}$

Расчет ГТУ Рабочее тело af := "Air"

Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор: $h_1 := wspgHGST(af, T_1) = 288.56$ кДж/кг газа

Удельная энтропия воздуха на входе в компрессор: $s_1 := wspgSGSPT(af, p_1, T_1) = 6.83$ кДж/(кг газа•K)

Удельная энтропия воздуха на выходе из компрессора: $s_2 := s_1 = 6.83$ кДж/(кг газа•K)

Температура воздуха на выходе из компрессора: $T_2 := wspgTGSPS(af, p_2, s_2) = 279.02$ °C

Удельная энтальпия воздуха на выходе из компрессора: $h_2 := wspgHGST(af, T_2) = 557.39$ кДж/кг газа

Давление газа на входе в ГТУ: $p_3 := p_2 = 1$ MPa

Удельная энтропия газа на входе в ГТУ: $s_3 := wspgSGSPT(af, p_3, T_3) = 7.847$ кДж/(кг газа•K)

Удельная энтальпия газа на входе в ГТУ: $h_3 := wspgHGST(af, T_3) = 1483.61$ кДж/кг газа

Давление газа на выходе из ГТУ: $p_4 := p_1 = 0.1$ MPa

Удельная энтропия газа на выходе из ГТУ: $s_4 := s_3 = 7.85$ кДж/(кг газа•K)

Температура газа на выходе из ГТУ: $T_4 := wspgTGSPS(af, p_4, s_4) = 498.08$ °C

Удельная энтальпия газа на выходе из ГТУ: $h_4 := \text{if } T_4 > T_6\ wspgHGST(af, T_4)\ \text{else}\ \text{"Error"} = 790.87$ кДж/кг газа

Теплота, подводимая в камере сгорания: $q_1 := h_3 - h_2 = 926.22$ кДж/кг газа

Удельная работа газовой турбины: $l_{гт} := h_3 - h_4 = 692.74$ кДж/кг газа

Удельная работа компрессора: $l_к := h_2 - h_1 = 268.83$ кДж/кг газа

Термический КПД цикла ГТУ: $\eta_{ГТУ} := \frac{l_{гт} - l_к}{q_1} = 45.77\,\%$

Рис. 11.2. Расчет газотурбинной части парогазового цикла

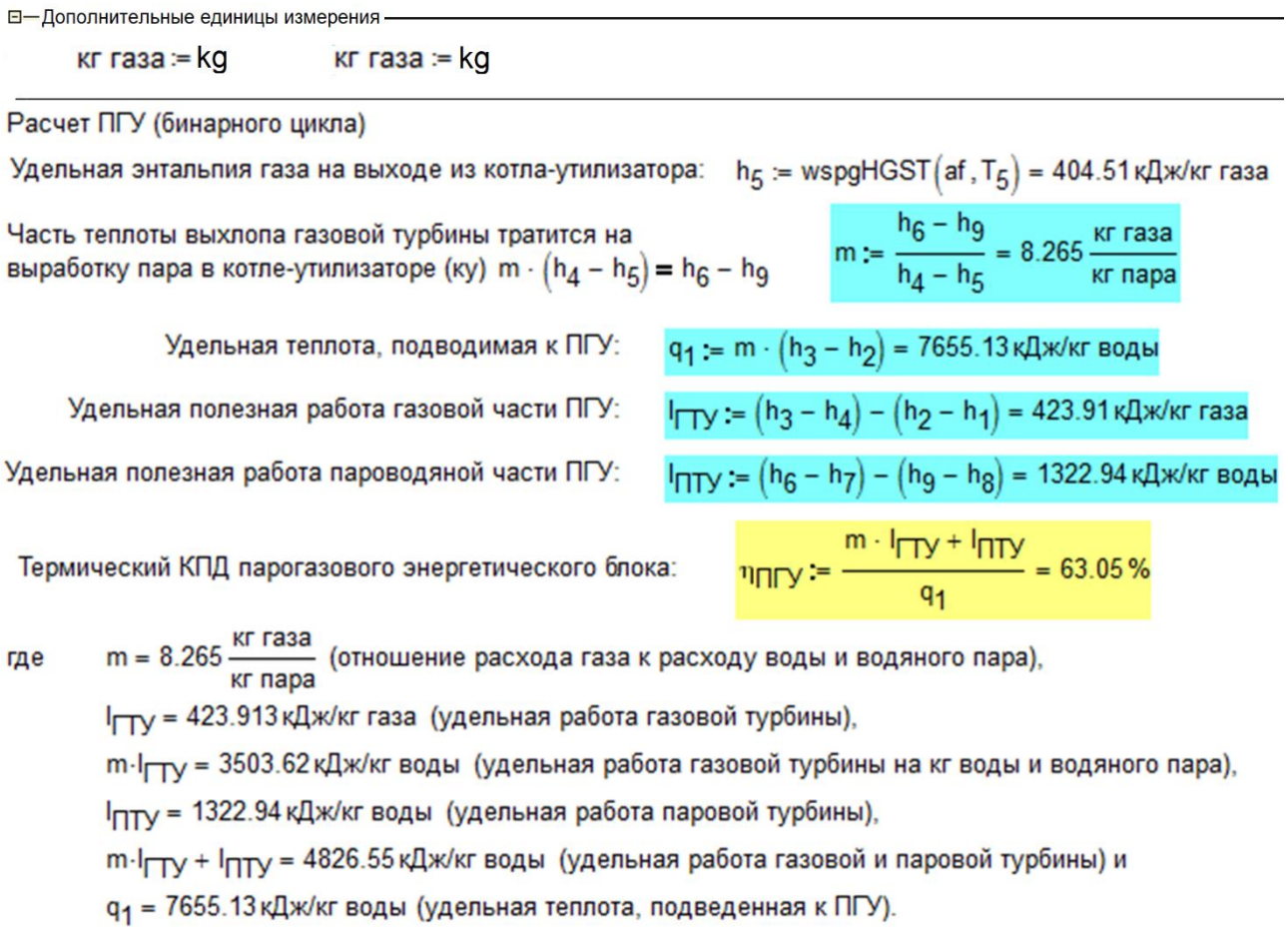


Рис. 11.3. Расчет термического КПД парогазового цикла

В самом начале расчетов, показанных на рис. 11.2-11.3, введены довольно необычные пользовательские единицы измерения – в них разные единицы массы: килограмм пара, килограмм воды, килограмм газа. Казалось бы, килограмм и есть килограмм – он никак не связан с тем, какую массу им измеряют. Это, в принципе, и отображено в начале рис. 11.2-11.3 – все эти пользовательские единицы массы привязаны к килограмму (kg). Такое необычное метрологическое уточнение сделано для того, чтобы при «выводе на печать» параметров рабочих тел в разных точках цикла, было сразу видно, о каком рабочем теле идет речь – о воде/водяном паре или о втором рабочем теле – о воздухе/дымовых газах. Но и не только. В принципе, такое уточнение должно быть не просто инструментом комментирования расчётов, а инструментом проверки правильности расчётов: переменная m (кратность циркуляции – отношение расхода воздуха/дымовых газов к расходу воды/водяного пара) не должна быть безразмерной величиной (см. рис. 11.3). Если величину m по ошибке не вставить в формулу определения КПД бинарного цикла, то должно быть получено сообщение об ошибке. Эта полезная опция пока не задействована ни в каких физико-математические пакетах, но в будущем это должно быть сделано – см. послесловие к главе 10, где подобные рассуждения велись относительно единиц мощности:

электрическая мощность, тепловая мощность, активная мощность, реактивная мощность и полная мощность. Кстати, если говорить о электрической мощности и тепловой мощности, то можно упомянуть о том, что современные ТЭЦ, оснащенные ПГУ, могут вырабатывать одновременно и электрическую и тепловую энергию. Онлайн расчет одной из таких ТЭЦ приведен на сайте http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-21.xmcd.

На рис. 11.1 и 11.2 показаны расчеты термических КПД паротурбинного цикла и газотурбинного цикла (цикла Брайтона) в случае, если бы они работали сепаратно с исходными параметрами, показанными в начале рис. 11.1.

На рис. 11.3 показан расчет термического КПД бинарного цикла (см. его схему на рис. 11.1), где часть тепла выхлопа газовой турбины (q_1') тратится в котле утилизаторе на генерацию из питательной воды (точка 9) острого перегретого пара (точка 6). Контроль за теоретической возможностью этого процесса ведет оператор if (если), вставленный в расчет газовой турбины – см. пятую строку снизу на рис. 11.2: температура уходящих газов из газовой турбины (T_4) должна быть выше температуры острого водяного пара, поступающего в паровую турбину (T_6). В противном случае переменной h_4 (удельная энтальпия газа, выходящего из газовой турбины) присваивается не численное, а строковое ("Error") значение, что прерывает дальнейший расчет сообщением об ошибке.

Пакет SMath, как известно, может оперировать не просто числами в переменных, а числами с единицами измерения длины, времени, энергии, мощности и т.д. Именно, единицами измерения, а не самими физическими величинами. Но и пакет SMath не всегда способен правильно решать размерные задачи встроенными средствами. Тут приходится прибегать к пользовательским инструментам, позволяющим вводить в расчет разные физические величины с одинаковыми единицами измерения. Поясним это на примере расчета нашего цикла ПГУ (рис. 11.1). На рисунке 11.4 показан его заключительный фрагмент – итоговый расчет по формуле термического КПД. При первой попытке расчета произошла ошибка, т.к. в формуле складываются физические величины с одинаковыми единицами измерения (кДж/кг), но разные по своей сути (удельная энтальпия первого рабочего тела и удельная энтальпия второго рабочего тела). Без дополнительного пользовательского механизма учета физических величин была бы большая вероятность, что ошибка осталась бы в расчете [4].

Рис. 11.4. Завершение расчета цикла ПГУ

В бинарном цикле, показанном на рис. 11.1, циркулируют два “килограмма” – “килограммы” газа (воздуха – первое рабочее тело) и “килограммы” воды/водяного пара (второе рабочее тело). Их соотношение хранится в переменной m, которая традиционно считается безразмерной. Но расход газа и расход воды/водяного пара в термодинамическом цикле – это, повторяем, *разные* физические величины, имеющие *одинаковые* единицы измерения. Этот нюанс учтен в наших расчетах бинарного цикла вводом не разных физических величин, а разных единиц их измерения – см. рис. 11.4, где под килограммы первого рабочего тела (газа) зарезервирована единица измерения, не используемая в данном расчете – кандела (cd). Это позволяет избежать ошибок в расчете, когда складывается, например, удельная работа газовой турбины с удельной работой паровой турбины без учета величины m, которая в данном случае будет уже размерной с единицей кг газа/кг пара. Пример расчета, приведенный на рис. 11.4, очень простой, где ошибку несложно заметить и исправить. Но при расчетах двух и трехконтурных ПГУ, где балансные формулы намного сложнее, вероятность появления такого рода ошибок довольно велика. Избежать их позволяет вышеописанный прием назначения термодинамическим величинам с одинаковыми единицами измерения статуса разных физических величин и отказа считать отношения расходов рабочих тел безразмерными величинами.

Тут следует отметить, что большинство компьютерных программ расчета теплотехнических установок, упомянутых выше, не работают ни с физическими величинами, ни с единицами их измерения. Но в настоящее время это становится неприемлемым, не только из-за возможных ошибок в расчетах, но и по причине возросших требований по документированию расчетов, которые, в частности, требуют, чтобы после каждой использованной формулы были расписаны не только переменные с их текущими числовыми значениями, но и сочетания переменных (отдельные части формул), раскрывающие ее физическую суть. Это отмечено на рис. 11.4, где после формулы подсчета значения термического КПД цикла ПГУ дана роспись отдельных физических величин, из которой, в частности, видно, что вклад газовой турбины в производство электроэнергии в ПГУ намного больше вклада паровой турбины.

Ещё один аспект компьютерных расчетов бинарных циклов заключается в нестыковках графического отображении термодинамических циклов с двумя рабочими телами на различных диаграммах, которыми часто иллюстрируют циклы. А такая иллюстрация важна не только для образования и самообразования, но и для контроля корректности расчетов.

Обычно для графического отображения процессов преобразования энергии используют две диаграммы: Q, T-диаграмму, отражающая процесс генерации пара в котле-утилизаторе, и h, s-диаграмму процесса расширения пара в турбине. При этом часто не публикуют диаграммы цикла ГТУ, что снижает наглядность процессов, происходящих в бинарных циклах, иллюстративность их взаимосвязи.

Современные математические программы типа SMath позволяют такие иллюстрации делать довольно быстро и точно. При этом диаграммы будут «живыми»: если изменить исходные данные, то линии на диаграммах переместятся на новое место, фиксируя изменения в расчете. Этот аспект очень важен в настоящее время, т.к. сейчас в электронный вид переводятся не только учебники для студентов, но и техническая документация и разного рода производственные инструкции с иллюстрациями. Но тут возникают проблемы, связанные, в частности, с горизонтальным и вертикальным позиционированием таких графиков, а также с их масштабированием.

Что это такое?

Для теплотехнических расчетов важны не сами абсолютные значения удельной внутренней энергии, эксергии, энтальпии и энтропии рабочих тел, а только их изменения, фиксирующие направление и/или степень совершенства тех или иных теплофизических процессов, связанных с рабочими телами. По этой и другим причинам разработчики баз данных по термодинамическим свойствам веществ берут разные точки отсчета для расчета абсолютных значений калорических свойств рабочих тел, не руководствуясь какими-то едиными стандартами. Так, для расчета значений калорических свойств воды/водяного пара, как правило, принимают равными нулю абсолютные значения удельной внутренней энергии и энтропии жидкости в тройной точке воды, а для многих газов – точкой отсчета принимаю точку при нормальном (атмосферном) давлении с температурой 0 К.

Если энтальпия увеличивается, то к рабочему телу подводится энергия, и наоборот. Если водяной пар или газ в турбине расширяется с увеличением энтропии, то процесс считается необратимым, и т.д. По степени же увеличения значения энтропии судят о степени необратимости этого процесса, что фиксируется внутренним относительным КПД энергоустановок.

На рисунках 11.5–11.9 показаны «живые» диаграммы поведения рабочих тел в простейшей ПГУ, показанной на рис 11.1, где была изображена «мертвая» диаграмма. «Мертвая», повторяем, в том смысле, что изменение начальных параметров цикла никак не сказывается на ее виде. Чего не скажешь о «живой» диаграмме.

На рисунках 11.5 и 11.6 показаны две традиционные «живые» диаграммы: диаграмма цикла ПТУ на перегретом водяном паре (слева: линии с точками 6, 7, 8 и 9) и диаграмма цикла ГТУ (справа: линии с точками 1, 2, 3, 4 и 5). На свободных местах диаграмм помещено увеличение участка цикла ПТУ вблизи питательного насоса и схема одноконтурного котла-утилизатора с экономайзером, испарительной частью и пароперегревателем. У котла П-образная компоновка, что нетипично для котлов-утилизаторов парогазовых установок. На рисунках такая схема прорисована для компактности. Читатель может мысленно перенести пароперегреватель в верхнюю часть котла, чтобы получилась некая башенная схема, принятая для ПГУ в видах уменьшения газодинамических потерь (см. фото на рис. 11.24).

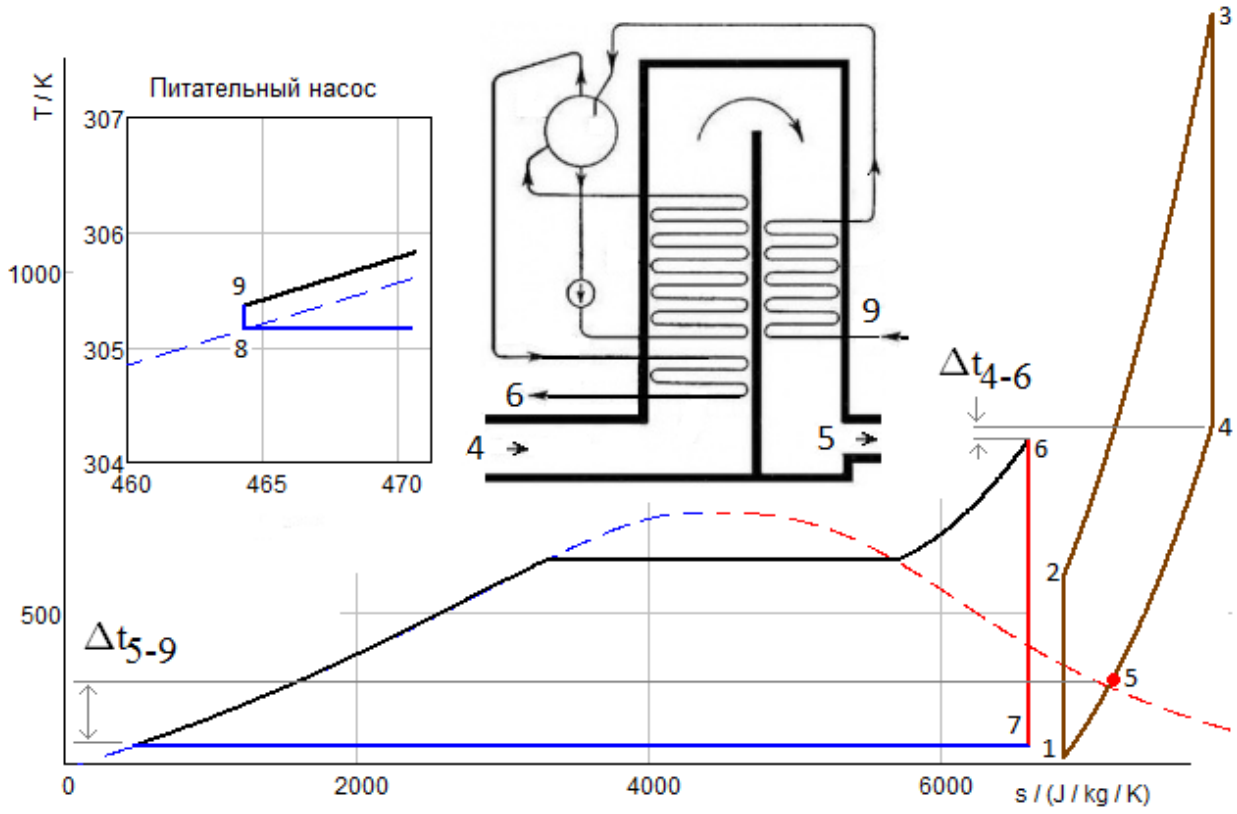


Рис. 11.5. Исходная T, s-«живая» диаграмма бинарного цикла ПГУ

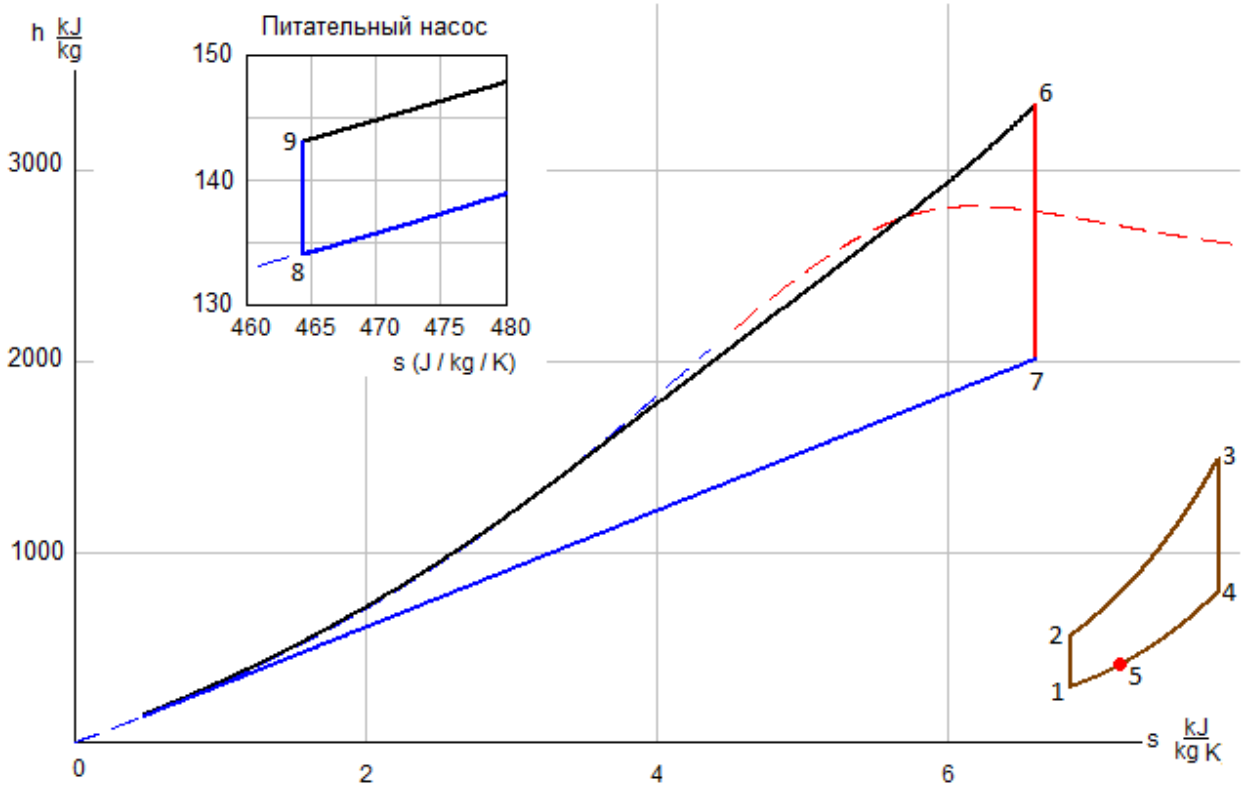


Рис. 11.6. Исходная h, s-диаграмма бинарного цикла ПГУ

Какую-либо полезную количественную информацию из диаграмм, показанных на рис. 11.5 и 11.6, получить довольно трудно. Более того, они дают искаженную информацию о вкладе двух рабочих тел в процесс производства электроэнергии на ПГУ: «петля» цикла ГТУ намного меньше «петли» цикла ПТУ, хотя на самом деле газовая турбина производит электроэнергии в несколько раз больше своей пароводяной напарницы – см. рис. 11.3, и мы это уже отметили. Из диаграммы на рис. 11.5 можно только проследить за температурными напорами ($\Delta t_{5\text{-}9}$ и $\Delta t_{4\text{-}6}$) на краях котла-утилизатора, представляющего из себя противоточный теплообменник. Но проанализировать этот температурный напор внутри котла-утилизатора по такой диаграмме невозможно. Это мы сделаем позже.

Другая картина наблюдается, если на диаграммах, во-первых, учесть значение параметра m (отношение расхода газа к расходу воды/водяного пара) и, во-вторых, сделать сдвиг диаграмм, нивелирующий разные базовые точки отсчета **калорических** свойств используемых двух рабочих тел бинарного цикла – см. рис. 11.7 и 11.8.

На рисунке 11.7 традиционная h, s-диаграмма показана с увеличением на величину m масштаба цикла ГТУ, что позволило зафиксировать горизонтальными линиями 5–8 и 4–6 процесс утилизации сбросного тепла газовой турбины в цикле ПТУ: разность h_4-h_5 равна разности h_6-h_9.

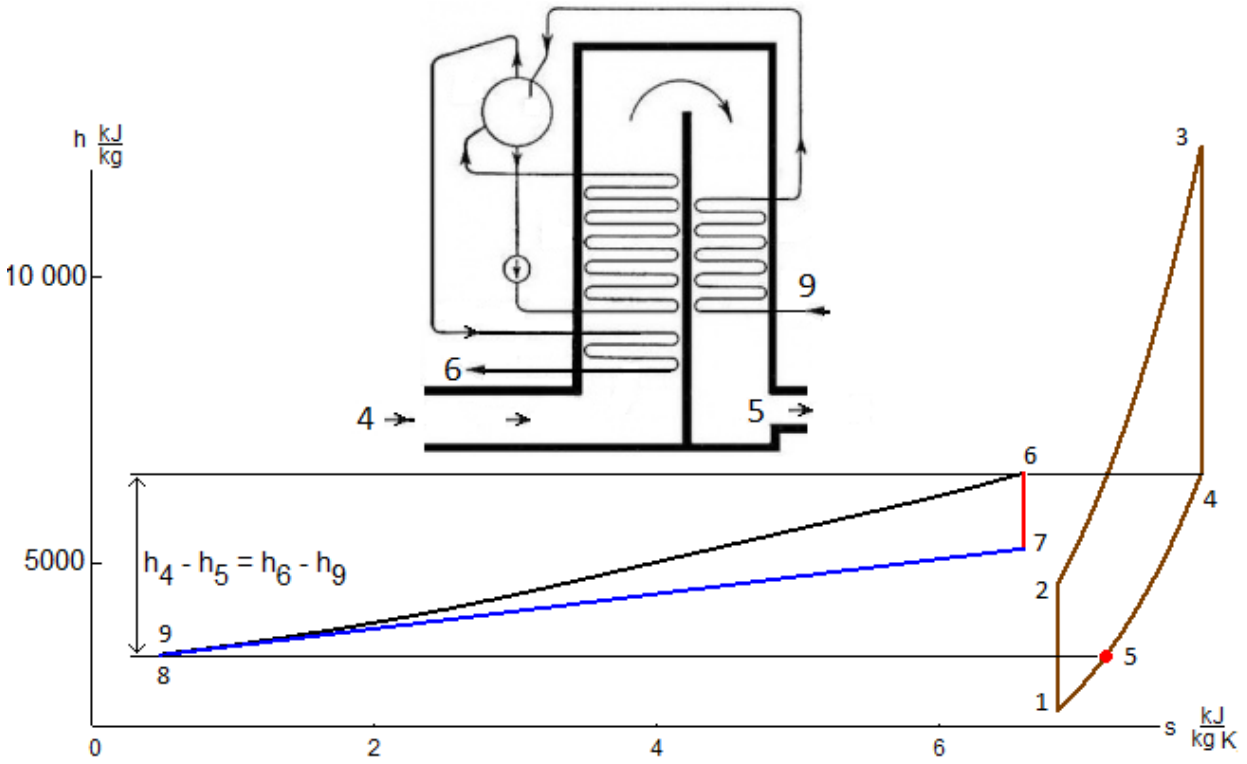


Рис. 11.7. h, s-«живая» диаграмма бинарного цикла ПГУ с увеличенным масштабом цикла ГТУ

Еще более информативной будет диаграмма цикла ПТУ, если ее с масштабированием и сдвигом построить в координатах температура–энтальпия – см. рис. 11.8, где помимо потока утилизируемой энергии (вертикальные линии 5–8 и 4–6) показан температурный график котла-утилизатора (противоточного теплообменника) с фиксацией ошибки в нашем расчете парогазового цикла. На диаграмме рисунка 11.8 видна так называемый pinch point – точка, вернее, участок с «опрокинутым» теплообменом. Это явление и другие факторы заставляют проектировщиков парогазовых установок использовать двух и трехконтурные схемы с двумя-тремя барабанами, термодинамический сетевой, открытый и интерактивный расчет которых размещен на авторском сайте http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/tdc.html и описан ниже.

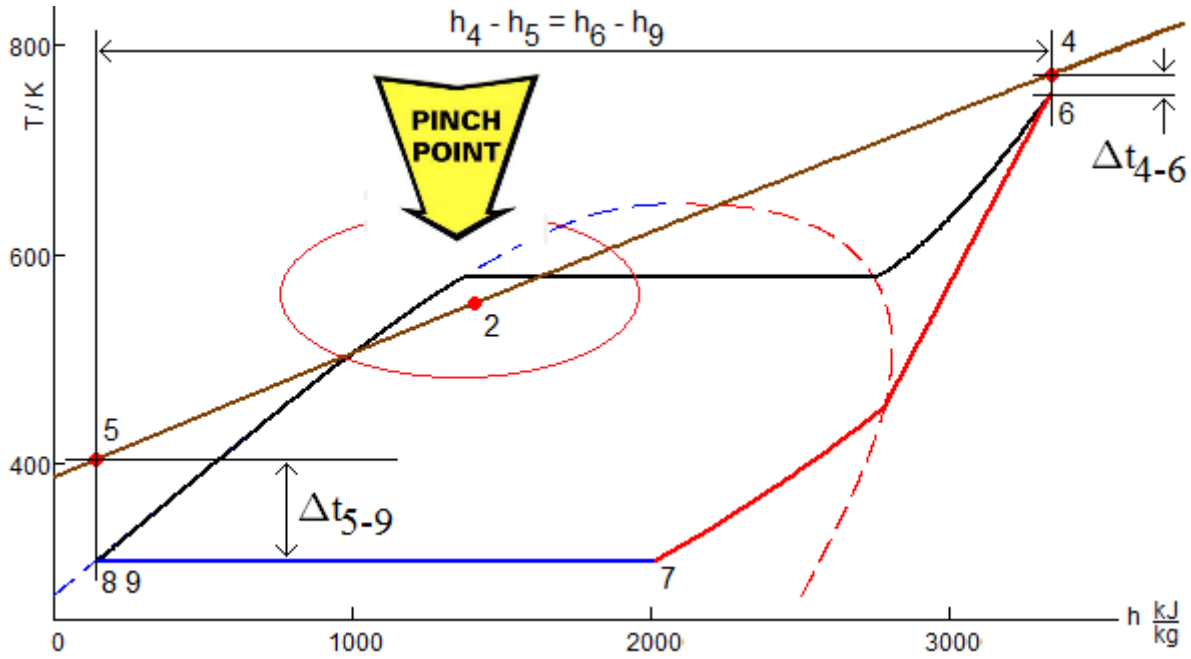


Рис. 11.8. T, h-«живая» диаграмма бинарного цикла ПГУ с увеличенным масштабом сдвинутой диаграммы цикла ГТУ

На рисунках 11.5 и 11.6 область диаграммы, отображающая процесс повышения давления в питательном насосе, сжалась в одну точку. В связи с этим эту область пришлось продублировать с изменением масштаба на осях графиков. Альтернативный способ, исключающий дублирование графика, – это использование трехмерных диаграмм термодинамических циклов, две из которых показаны на рис. 11.9. Ввод дополнительной оси «давление рабочего тела», позволило «растянуть» точку 8-9 (повышение давления питательной воды) в линию. Дополнительно на диаграммах на рис. 7 показаны линии постоянной степени сухости водяного пара, простирающейся от критической точки до точки 7 (конец процесса расширения пара в турбине).

И еще один важный момент. На рисунке 6 цикл ГТУ выродился в линию, часть которой (с точками 5, 2 и 4) отображена поверх цикла ПТУ. Это связано с тем, что в нашем расчете учитывались свойства не реального рабочего вещества, а идеального газа, у которого энтальпия зависит только от температуры и не зависит от давления. Это «вырождение» цикла ГТУ в линию можно избежать, если перейти к трехмерным диаграммам термодинамических циклов – см. рис. 7.

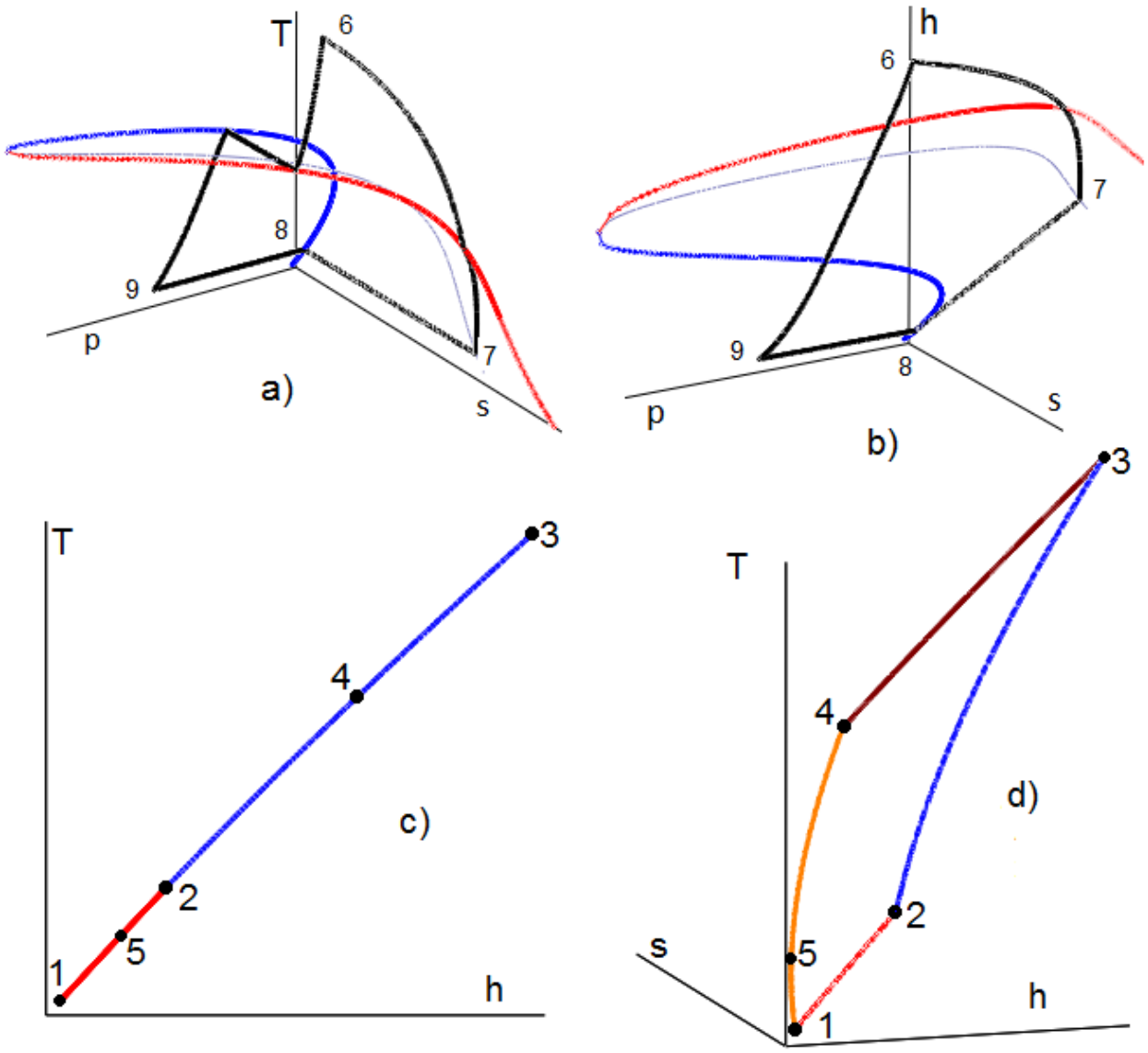


Рис. 11.9. Трехмерные диаграммы паротурбинного (вверху) и газотурбинного (внизу) циклов: a) T, s, p-диаграмма цикла ПТУ на перегретом паре, b) h, s, p-диаграмма цикла ПТУ, c) T, h-диаграмма цикла ГТУ (третья ось направлена в сторону зрителя) и d) T, h-диаграмма цикла ГТУ

На рисунке 11.10 показано начало SMath-документа с расчетом простейшей двухконтурной ПГУ с промежуточным перегревом пара. Две половины котла-утилизатора выполнены в виде отдельных барабанных котлов с экономайзерным, испарительным и пароперегревательным участками (см. рис. 11.10), либо в виде отдельных прямоточных котлов с докритическими или сверхкритическими параметрами. Но это не суть важно. Необходимо рассчитать термический КПД такой установки, построить T, h- (T, Q) диаграмму котла-утилизатора и убедиться, что там нет «опрокидывания» теплообмена, зафиксированного на рис. 11.8.

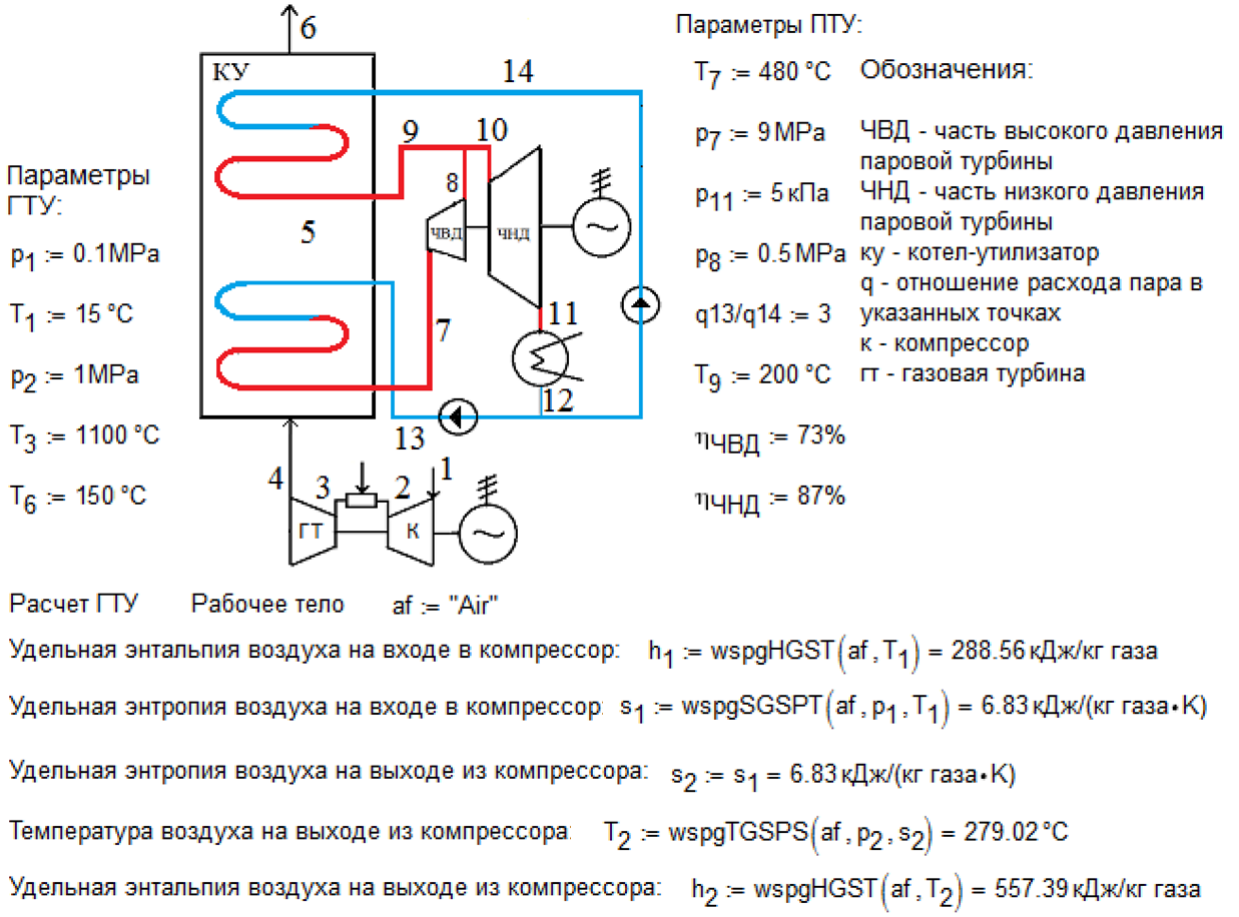


Рис. 11.10. Начало расчета двухконтурной ПГУ: схема установки, ввод исходных данных и вызов функций по свойствам воздуха

Примечание. В функциях пакета WaterSteamPro в расчете на рис. 11.10 аббревиатура SG означает спецификацию (S) газа (G). Меняя значение этого аргумента, можно моделировать состав газа – исходный влажный воздух, природный газ, продукты сгорания и проч. (см. главу 4). В наших расчетах одно- и двухконтурных ПГУ было сделано допущение, что рабочим телом газовой турбины был сухой воздух (см. оператор af:="Air", на рис. 11.10), который нагревается в камере сгорания без изменения его состава.

На рисунке 11.11 показан один из фрагментов расчета цикла ПТУ двухконтурной ПГУ с такими вычислительными приемами.

Во-первых, не вводится готовая формула для вычисления конкретного параметра, а составляется уравнение материального баланса с параметрами, численное значение которых в расчете не определено: $q_г$ – массовый расход рабочего тела в цикле ГТУ, q_{13} – массовый расход рабочего тела в контуре высокого давления цикла ПТУ и q_{14} – массовый расход рабочего тела в контуре низкого давления цикла ПТУ. К этим переменным нельзя применить *численную* математику пакета Mathcad, но выражения с

ними можно преобразовывать *символьно* – решать аналитически, например, уравнения и системы уравнений. А к этому по сути и сводится наша задача, состоящая из уравнений материального и энергетического баланса энергоустановки в целом и по ее отдельным частям. В расчете, повторяем, нет численных значений переменных $q_г$, q_{13} и q_{14}, но есть численные значения переменной со сложным именем q13/q14 и переменной с именем m – отношений расходов рабочих тел на разных участках ПГУ. Такой гибридный подход (сочетание символьной и численной математики) позволяет быстро и безошибочно решать поставленную задачу. В частности, на рис. 9 показано аналитическое решение уравнения энергетического баланса с использованием оператора solve. Он выдает численный ответ в случае, если переменные уравнения имеют численные значения. Чтобы получит символьный ответ (не число, а формулу), нужно «заглушить число» операторами var := var, спрятанными в скрытых областях на рис. 9. Пример на рис. 9 простой: решение такого уравнения можно осуществить и в уме, стараясь при этом не делать досадных ошибок, вернее, опечаток. Но при расчете трехконтурных ПГУ и других более сложных установок без автоматизации символьных преобразований обойтись будет весьма сложно.

Второй нюанс документа, показанного на рис. 9, состоит в том, что для расчета температуры газов в средней части котла-утилизатора (T_5), не делается ссылка на дополнительную облачную функцию, возвращающую температуру газа в зависимости не от удельной энтропии и давления, а от удельной энтальпии. В расчете используется уже вызванная функция wspgHGST, по которой решается обратная задача нахождения нуля выражения, что делается с помощью встроенной в Mathcad функции root методом половинного деления.

Комментарий. Задача создания обратных функций по теплофизическим свойствам веществ, волнует многих программистов, заставляет их идти на очень сложные и хитрые приемы. При этом забывается, что современные математические программы имеют мощные средства решения уравнений и их систем, что существенно упрощает задачу и что мы проиллюстрировали на рис. 9: есть «прямая» функция, по которой несложно провести численное нахождение корня уравнения.

При расчетах цикла ПТУ рассматриваемой ПГУ можно также не делать ссылку на «общий» облачный файл с именем H2O.xmcd (см. рис. 1), а делать ссылки на отдельные файлы с отдельными свойствами воды и водяного пара.

Расчет ПГУ (бинарного цикла)

Удельная энтальпия газа на выходе из котла-утилизатора: $h_6 := wspgHGST(af, T_6) = 419.73\ кДж/кг\ газа$

Часть теплоты выхлопа газовой турбины тратится на выработку пара в котле-утилизаторе

Исходное уравнение $q_Г \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13}) \cdot q_{13} + (h_9 - h_{14}) \cdot q_{14}$

Делим на величину q_{14} $\frac{q_Г}{q_{14}} \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13})\frac{q_{13}}{q_{14}} + (h_9 - h_{14})\frac{q_{14}}{q_{14}}$

Делаем замену $q13/q14 = \frac{q_{13}}{q_{14}}$ $m = \frac{q_Г}{q_{14}}$ $m \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13}) \cdot q13/q14 + (h_9 - h_{14}) \cdot 1$

$$m := \frac{h_9 - h_{14} + q13/q14 \cdot (h_7 - h_{13})}{h_4 - h_6} = 33.08\ \frac{кг\ газа}{кг\ пара}$$

Температура газов в середине котла-утилизатора (в точке 5)

$(h_4 - h_5) \cdot q_г = (h_7 - h_{13}) q_{13}$ $(h_4 - h_5)\frac{q_г}{q_{14}} = (h_7 - h_{13})\frac{q_{13}}{q_{14}}$ $(h_4 - h_5) \cdot m = (h_7 - h_{13}) \cdot q13/q14$

$$h_5 := \frac{h_4 m - h_7 q13/q14 + h_{13} q13/q14}{m} = 501.88\ кДж/кг\ газа$$

$T_5 := solve(wspgHGST(af, T_5) = h_5, T_5, T_4, T_6) = 225.37\ °C$

Рис. 11.11. Фрагмент расчета двухконтурной ПГУ: ручное решение уравнений и создание обратной функции

Символьные преобразования, правда, ручные, а не автоматические ведутся и в заключительной части расчета ПГУ (рис. 11.12), где определяется термический КПД двухконтурной ПГУ. Для этого составляется соответствующее выражение: числитель – это полезная работа энергоустановки за вычетом работ, затраченных на приводы питательных насосов и компрессора, а знаменатель – подведенная к энергоустановке энергия газа, сжигаемого в камере сгорания. Числитель и знаменатель делятся на «нечисловую» переменную q_{14}, что позволяет в формуле для КПД оставить только «числовые» переменные и рассчитать конкретное значение термического КПД.

$$\eta_{ППГУ} = \frac{(h_3 - h_4)q_Г + (h_7 - h_8)q_{13} + (h_{10} - h_{11})(q_{13} + q_{14}) - (h_{13} - h_{12})q_{13} - (h_{14} - h_{12})q_{14} - (h_2 - h_1)q_Г}{q_1 q_Г}$$

$$\eta_{ППГУ} = \frac{(h_3 - h_4)\frac{q_Г}{q_{14}} + (h_7 - h_8)\frac{q_{13}}{q_{14}} + (h_{10} - h_{11})\left(\frac{q_{13}}{q_{14}} + \frac{q_{14}}{q_{14}}\right) - (h_{13} - h_{12})\frac{q_{13}}{q_{14}} - (h_{14} - h_{12})\frac{q_{14}}{q_{14}} - (h_2 - h_1)\frac{q_Г}{q_{14}}}{q_1 \frac{q_Г}{q_{14}}}$$

$$\eta_{ППГУ} := \frac{(h_3 - h_4)m + (h_7 - h_8)q13/q14 + (h_{10} - h_{11})(1 + q13/q14) - (h_{13} - h_{12})q13/q14 - (h_{14} - h_{12}) - (h_2 - h_1)m}{q_1 m} = 58.47\,\%$$

Подготовка данных для графика

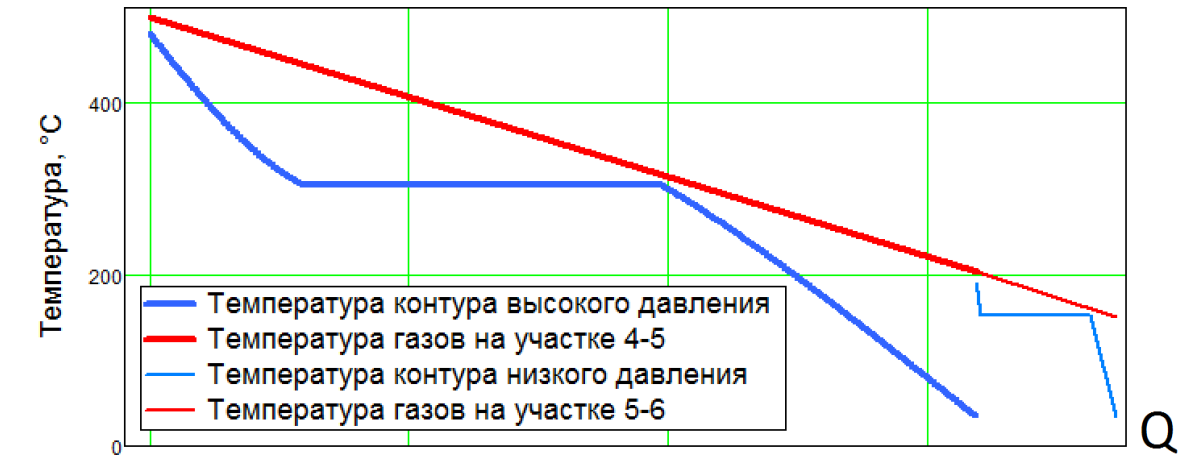


Рис. 10.12. Завершение расчета двухконтурной ПГУ: расчет термического КПД и построение тепловой диаграммы котла-утилизатора (T, Q-диаграммы)

Графические средства пакета SMath, как уже отмечено выше, позволяют легко и быстро строить различные графики. На рис. 11.12 построен такой график с экономайзерными испарительными и пароперегревательными участками двух пароводяных контуров (нижние кривые). Из графиков видно, что температурные кривые двух рабочих тел не пересекаются и «pinch-point» (см. рис. 11.8) отсутствует.

На авторском сайте http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/tdc.html приведены расчеты более сложных бинарных циклов, схемы и интернет-адреса которых приведены ниже.

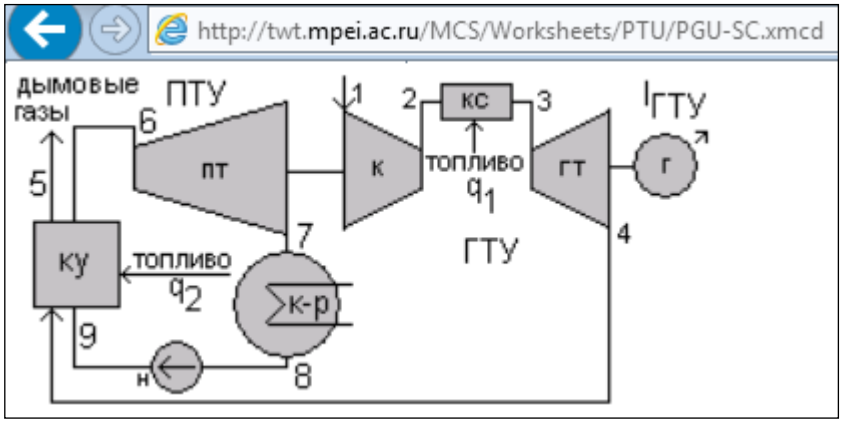


Рис. 11.13. ПГУ с приводом компрессора от паровой турбины

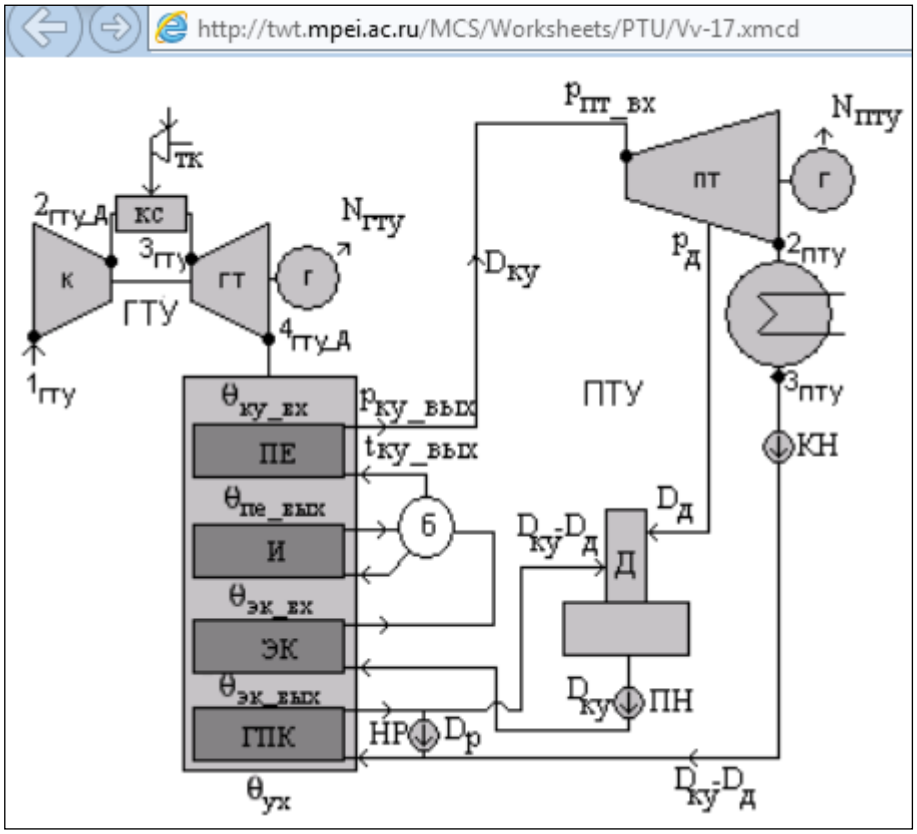


Рис. 11.14. ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором

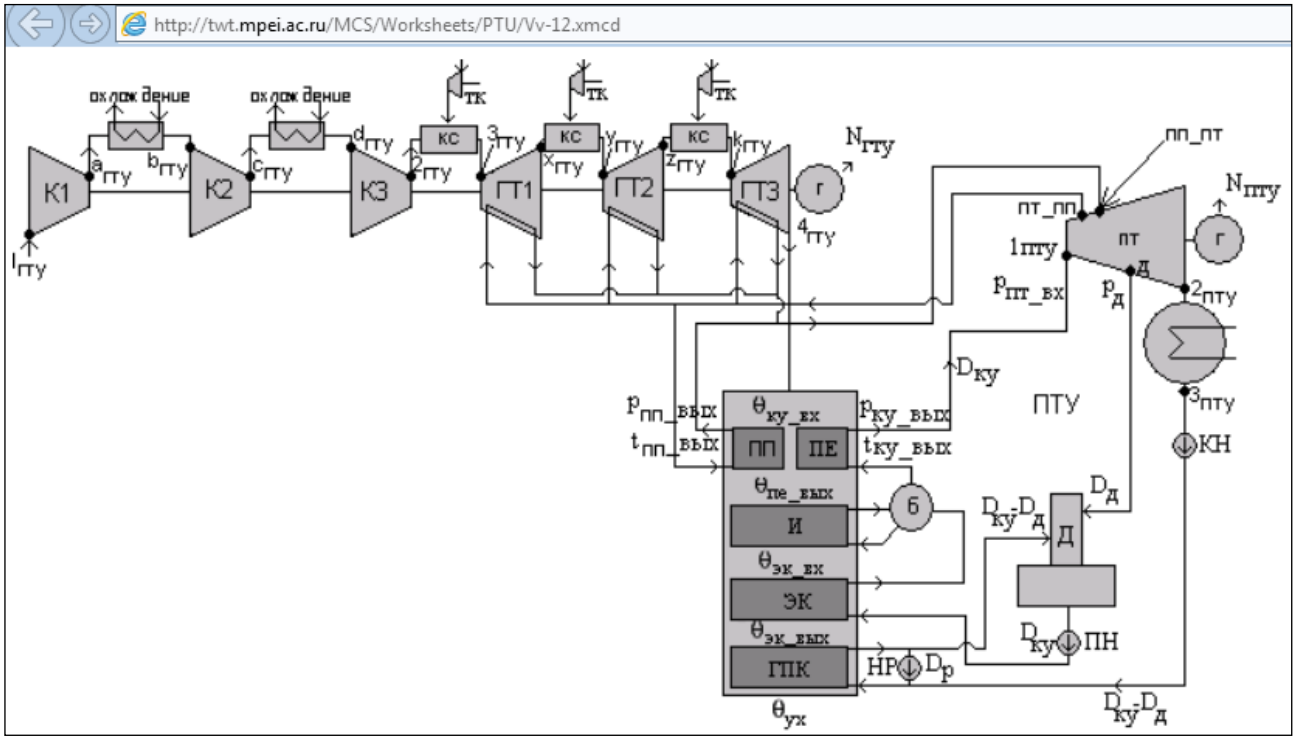


Рис. 11.15. ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором, многоступенчатым сжатием воздуха и многоступенчатым подводом тепла

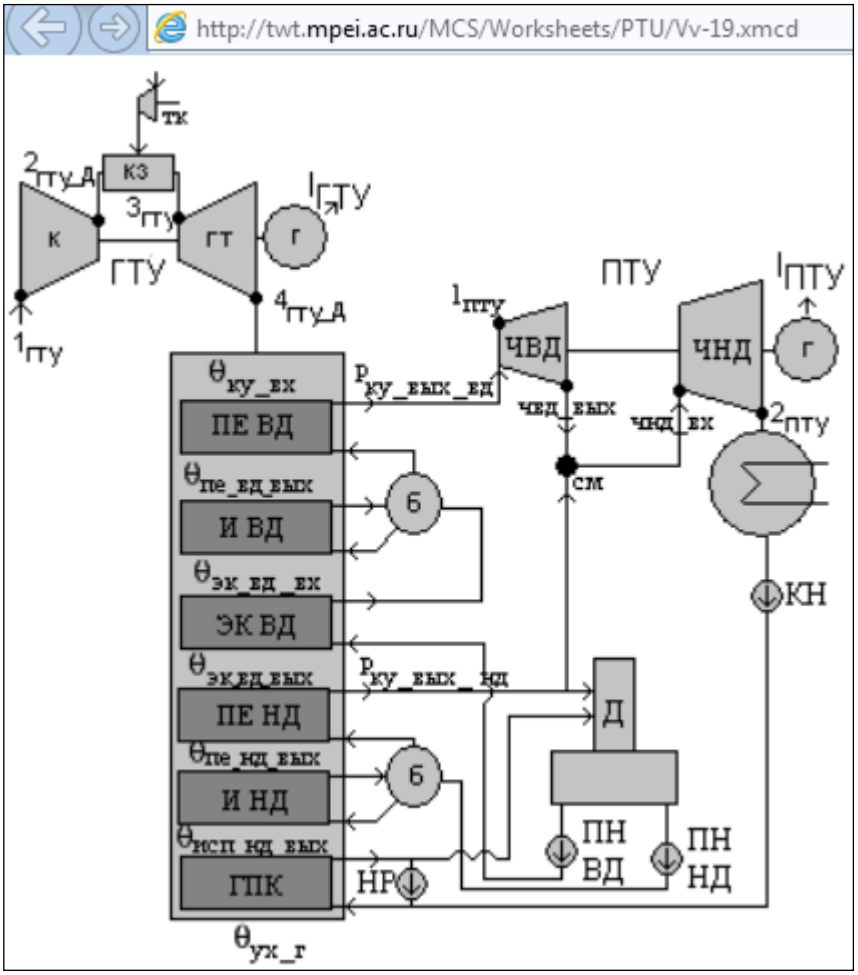


Рис. 11.16. ПГУ с двухконтурным котлом-утилизатором

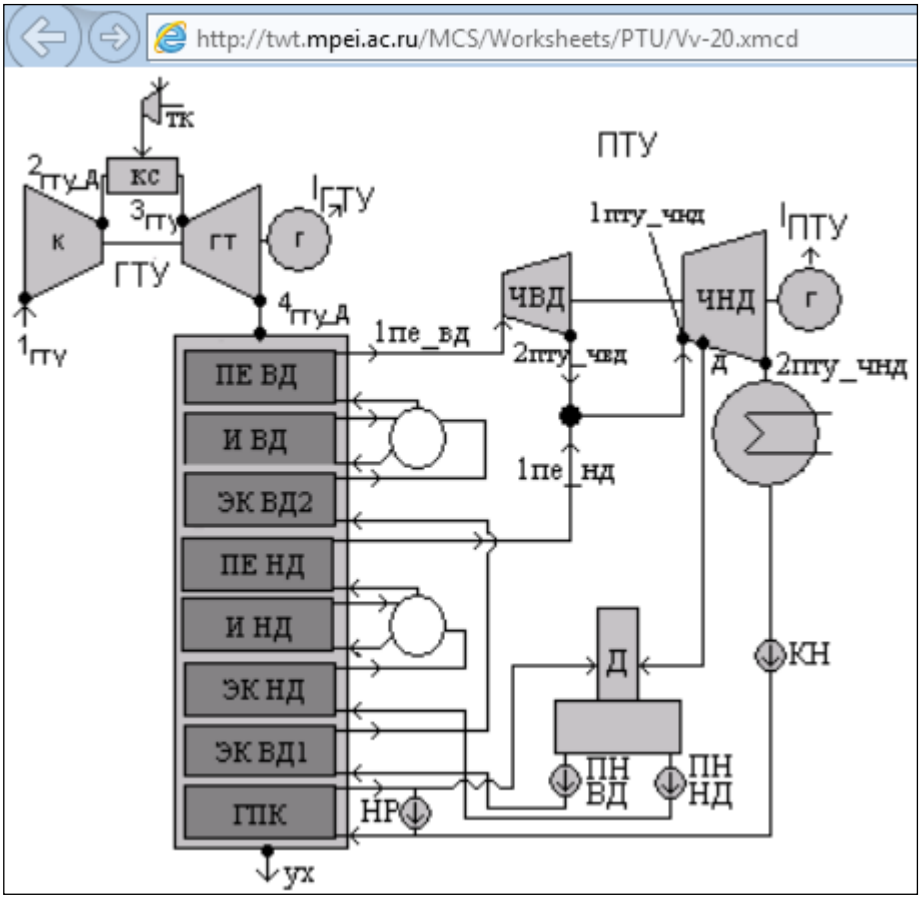


Рис. 11.17. ПГУ с двухконтурным котлом-утилизатором и применением двухступенчатого нагрева питательной воды в экономайзере

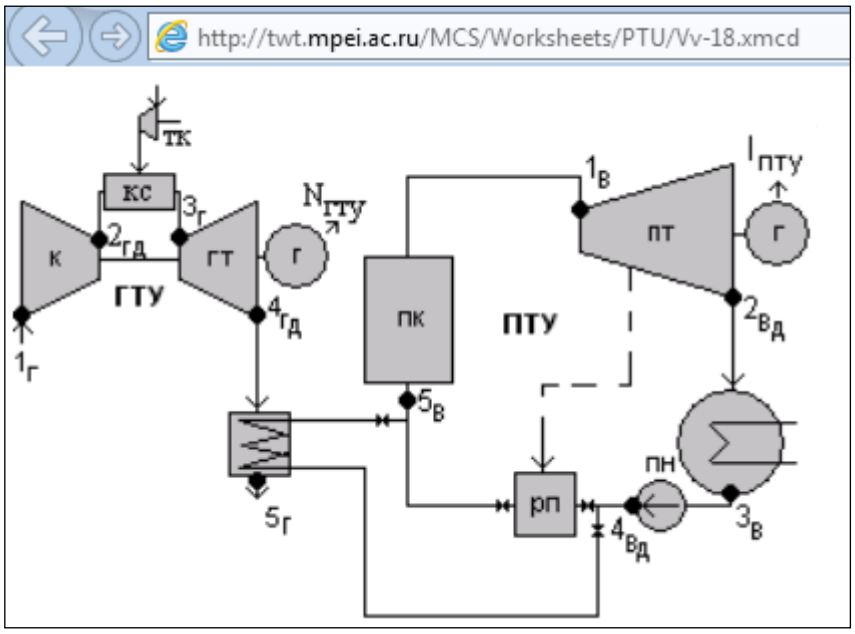


Рис. 11.18. ПГУ с полузависимой схемой (с вытеснением регенерации)

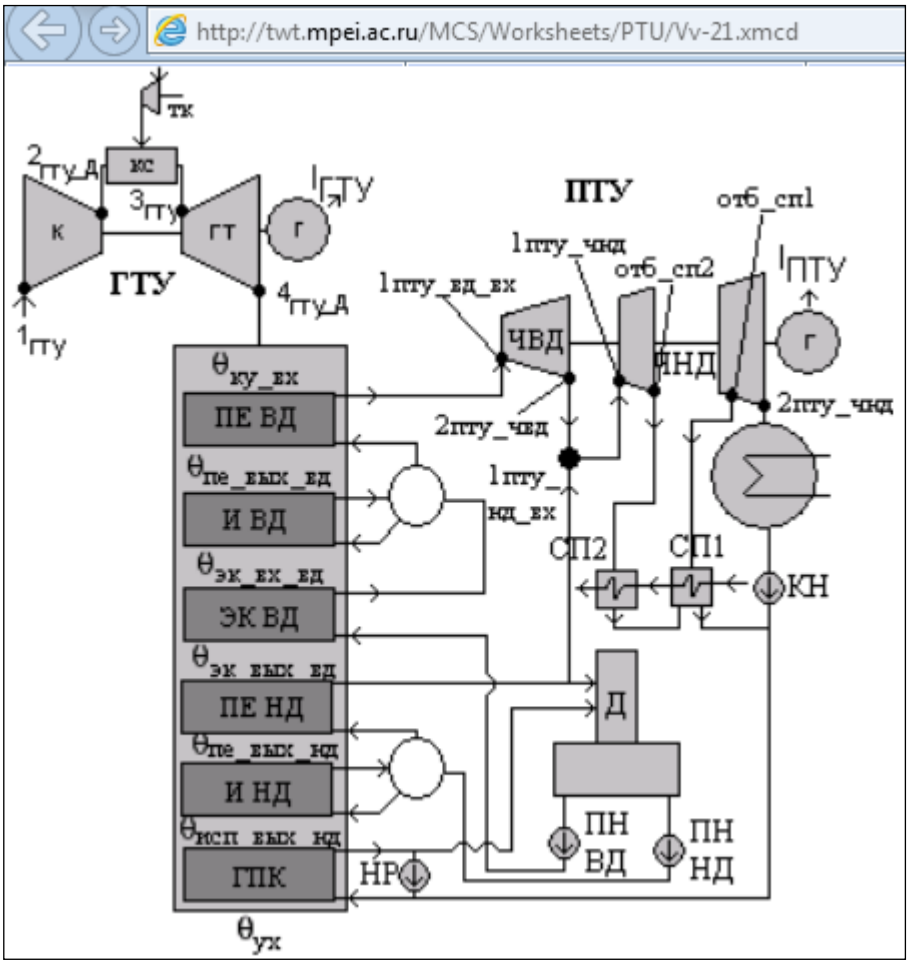


Рис. 11.19. ПГУ с теплофикационной паровой турбиной

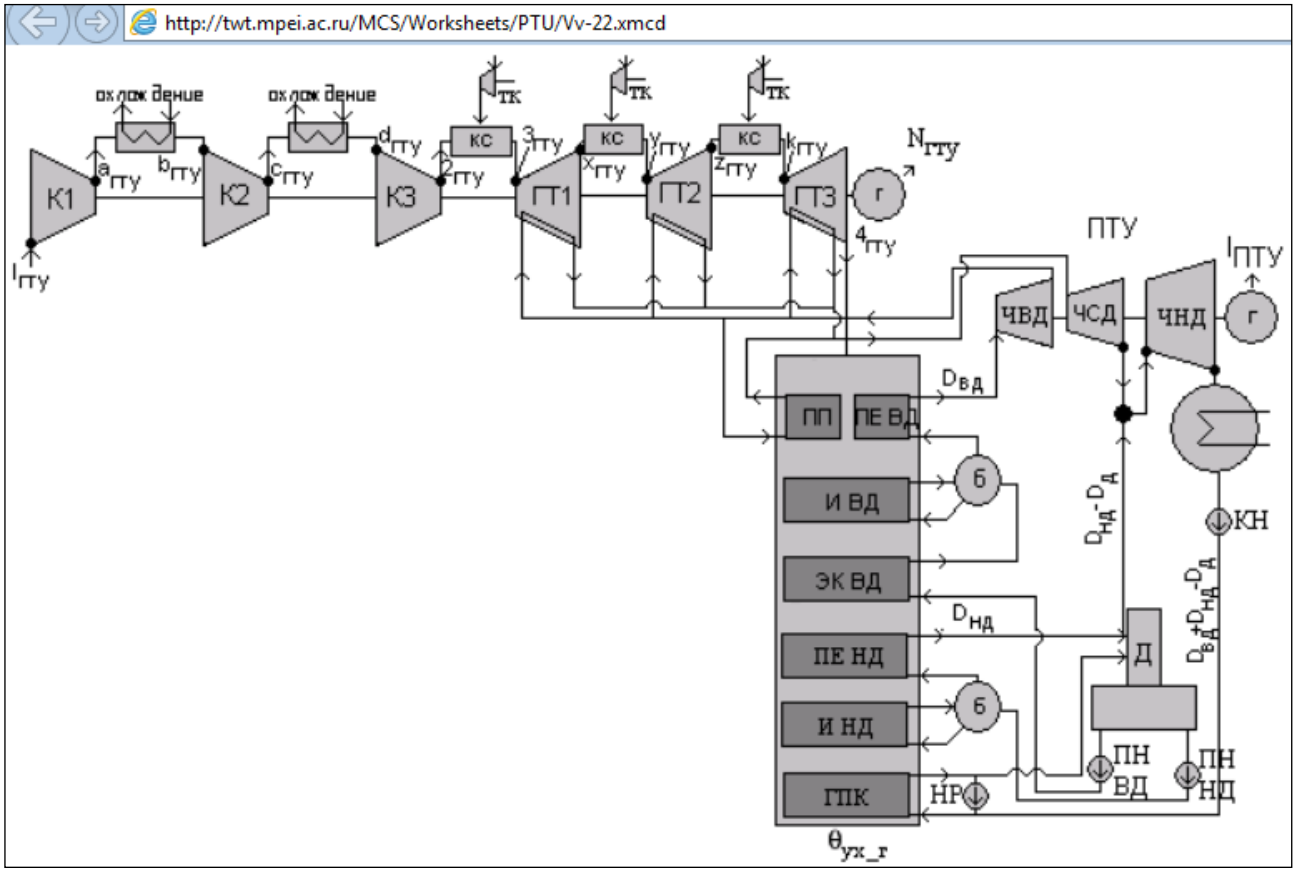


Рис. 11.20. ПГУ с многоступенчатым сжатием воздуха, многоступенчатым подводом тепла и двухконтурным котлом-утилизатором

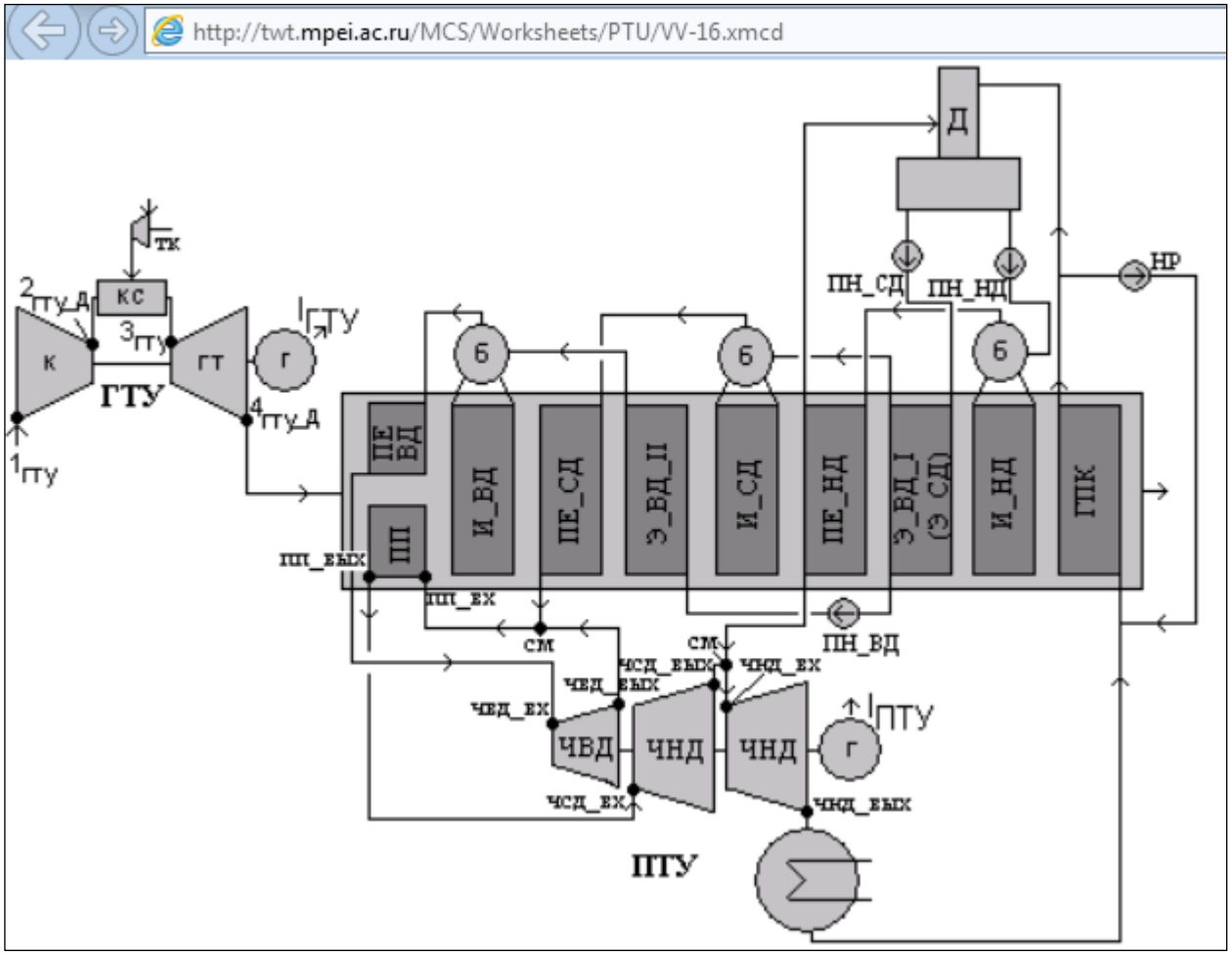


Рис. 11.21. ПГУ с трехконтурным котлом-утилизатором

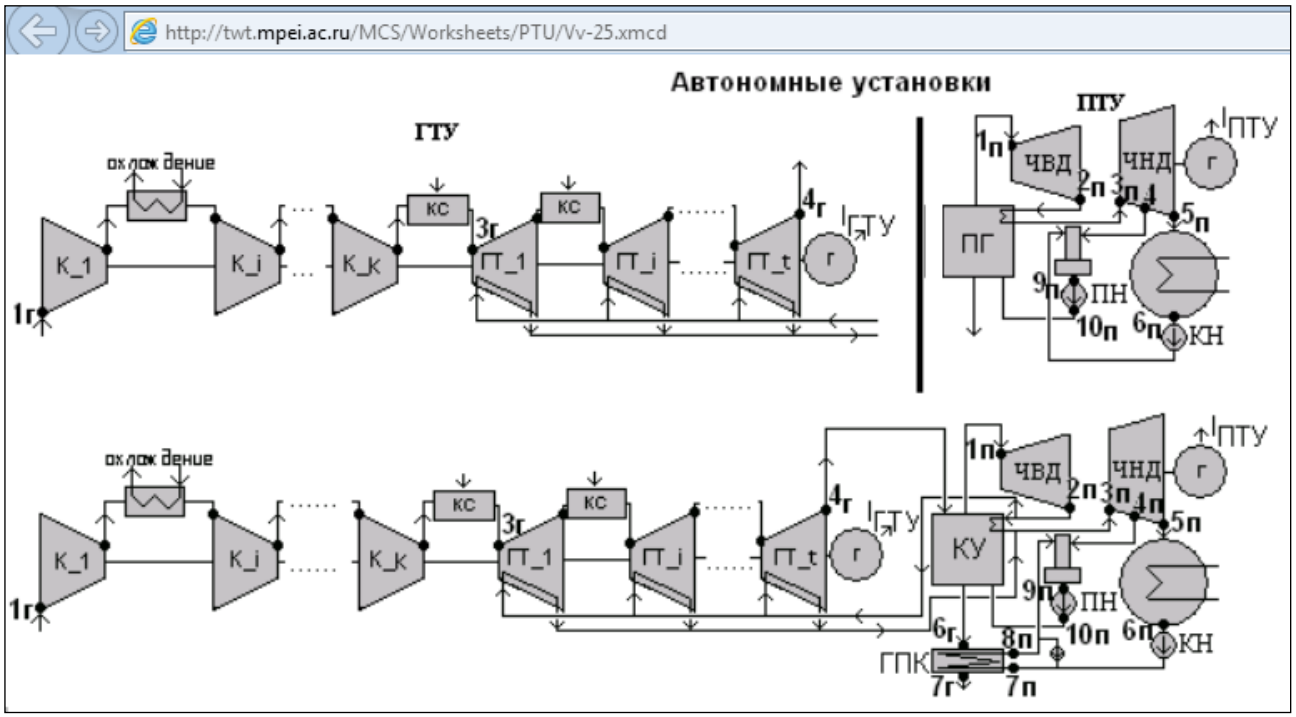


Рис. 11.22. Сравнение ГТУ и ПТУ с ПГУ

Парогазовые установки в российской энергетике до недавнего времени внедрялись, как «картошка на Руси» – нередко в ущерб традиционным «культурам». Главный инженер одного крупного российского энергообъединения, жаловался второму автору этой книги в том плане, что их насильно заставляли строить парогазовый блок на электростанции, где уже давно стоят и прекрасно работают шесть традиционных паротурбинных блоков по 800 МВт. На этой электростанции собирались строить седьмой аналогичный блок и уже соорудили для него фундамент. Но нет! Нужно строить седьмой энергоблок по парогазовой схеме. А это требует нового фундамента, создания новых служб – эксплуатационной, ремонтной и т.д. И самое главное тут в том, что никакой особой экономии средств этот новый блок не дал. Да, расход топлива на выработку киловатта-часа электроэнергии снизился за счет более высокого КПД бинарного цикла (см. расчеты на рис. 11.1-11.3), но вся эта финансовая выгода ушла на… оплату сервисного обслуживания газовой турбины, которую поставит зарубежная фирма. А в последнее время появились проблемы и с запчастями – санкции…

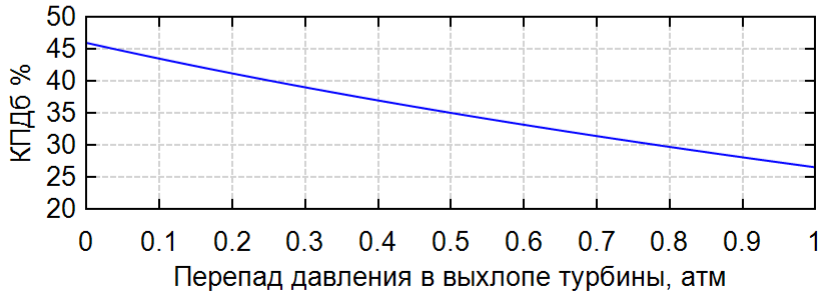
И ещё одно важное замечание.

На рисунках 11.5 и 11.7 показана схема котла-утилизатора П-образной формы, что нетипично для блоков ПГУ, и мы уже это отметили. Дело в том, что КПД ГТУ сильно зависит от давления на выхлопе турбины. На рисунке 11.23 показан оценочный расчёт КПД ГТУ от перепада давления на выхлопе газовой турбины. А там стоит не просто выхлопная труба (дымоход), а котел-утилизатор башенного типа с теплообменными поверхностями внутри.

$T_1 := 20\ °C \quad p_1 := 1\ atm \quad n := 10 \quad T_3 := 1000\ °C \quad wm := "Air"$

$\eta_T(\Delta p) :=$
$h_1 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_1, "T", T_1, wm)$
$s_1 := \text{CoolProp_Props}("S", "P", p_1, "T", T_1, wm)$
$p_2 := p_1 \cdot n$
$[s_2 := s_1 \quad \textit{Обратимы процесс сжатия воздуха}]$
$T_2 := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_2, "S", s_2, wm)$
$h_2 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_2, "T", T_2, wm)$
$[l_{GC} := h_2 - h_1 \quad \textit{Работа компрессора}]$
$p_3 := p_2$
$h_3 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_3, "T", T_3, wm)$
$[q := h_3 - h_2 \quad \textit{Подведённое тепло}]$
$s_3 := \text{CoolProp_Props}("S", "P", p_3, "T", T_3, wm)$
$p_4 := p_1 + \Delta p$
$[s_4 := s_3 \quad \textit{Обратимый процесс в газовой турбине}]$
$T_4 := \text{CoolProp_Props}("T", "P", p_4, "S", s_4, wm)$
$h_4 := \text{CoolProp_Props}("H", "P", p_4, "T", T_4, wm)$
$[l_{GT} := h_3 - h_4 \quad \textit{Работа турбины}]$
$\left[\frac{l_{GT} - l_{GC}}{q} \quad \textit{Термический КПД ПГУ}\right]_1$

$\Delta p := [(0\ atm), 0.01\ atm .. (1\ atm)]$



$\text{augment}\left(\frac{\Delta p}{atm}, \overrightarrow{\eta_T(\Delta p)} \cdot 100\right)$

Рис. 11.23. Зависимость термического КПД ГТУ от сопротивления на выхлопе

На рисунке 11.23 показано, что помещение курсора на переменной *Δp* (аргумент функции) подсвечивает эту переменную во всей функции, включая и её имя. Эта полезный инструмент описан в главе 10 – см. текст около рис. 10.5). Некоторые операторы функции на рис. 11.23 являются первым элементом матрицы с одной строкой и двумя столбцами. Второй элемент этой матрицы – это комментарии в виде имени переменной с пробелами. Как ввести эти пробелы в имена переменных, рассказано

Для снижения газодинамического сопротивления трубы ПГУ делают намного ниже и шире труб ПТУ. Это можно видеть на фотографии московской ТЭЦ-16 на рисунке 11.24 с тремя узкими и высокими трубами давно установленных ПТУ, начинающихся на нулевой отметке (у земли), и с одной широкой, но низкой трубой недавно установленной ПТУ, начинающейся с крыши сооружения, где установлен котел-утилизатор.

Рис. 11.24. Фото одной из московских ТЭЦ с трубами для ПГУ и ПТУ

Еще один аспект, определяющий размеры труб тепловых электростанций – это используемое топливо. Многие московские ТЭЦ планировались для работы с каменным углем, если не в качестве основного, так в качестве резервного топлива[60]. Поэтому-то дымовые трубы строились высокими для более безопасного рассеивания над Москвой

[60] Сейчас в Москве осталась только одна такая ТЭЦ – ТЭЦ-22.

золы, образующейся при сжигании твердого топлива[61]. Сейчас основное топливо московских ТЭЦ – это природный газ, а в качестве резервного топлива выступает в основном мазут. Но высокие трубы остались. Московские парогазовые установки работают только на природном газе[62].

В свое время руководство энергетикой страны приняло решение перехода на ПГУ с использованием импортного энергетического оборудования, в частности, газовых энергетических турбин. Этому способствовало и активное, если не сказать, агрессивное и зачастую нечестное лоббирование западными энергомашиностроительными компаниями. Многие опытные специалисты возражали, но их не слушали. А возражения касались того, что нужно развивать отечественное машиностроение. Западное оборудование из стран, которые в настоящее время называют недружественными, могло быть эффективнее и надежнее российского в техническом плане, но оно оказалось ненадежным в политическом плане: санкции не допускают поставку запчастей и заводского сервисного обслуживания… Такая же печальная история случилась и с российской гражданской авиацией, где также используются газовые турбины, но не энергетические с электрогенератором, а авиационные, топливом для которых служит не природный газ, а авиационный керосин. Кстати, на самолетах есть и отдельные небольшие энергетические турбины с электрогенератором, ток от которых питает воздушное судно в тот момент, когда основные турбины ещё не запущены.

Задания читателям:

1. Реализовать в среде SMath расчёты, открывающиеся по ссылкам, показанным на рис. 11.13-11.22.

[61] Белые клубы дыма, выходящие из труб ТЭЦ, – это клубы не дыма, а водяного пара, образующегося при сжигании природного газа, состоящего в основном из метана. Когда сжигают уголь, то белых клубов дыма почти нет, так как это топливо в основном состоит из углерода, и сконденсировавшихся водяных паров в дыме практически нет.

[62] Второй автор этого учетного пособия в студенческие годы работал в научной группе МЭИ, исследовавшей возможность газификации угля в целях его использования в энергетических газотурбинных установках – простых и входящих в состав парогазовых установок. Этому автору в 2005 году на кафедре паровых и газовых турбин Харьковского политехнического института показывали первую в СССР энергетическую газовую турбину. Советский Союз в свое время был пионером в разработке ГТУ и ПГУ. Но затем общий застой коснулся и этой отрасли энергетики – см. ниже.

Литература:

1. Трухний, А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов / А.Д. Трухний. — М.: ОАО «Издательский Дом МЭИ», 2015. — 667 с.
2. Цанев, С.В. Газотурбинные энергетические установки / В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка. — М.: ОАО «Издательский Дом МЭИ», 2011. — 428 с.
3. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) / Г.Г. Ольховский // Теплоэнергетика. 2013. № 3.
4. Очков В. Ф., Орлов К. А., Кузнецов В. Н., Знаменский В. Е, Аунг Ту Ра Тун. Парогазовые циклы: три аспекта компьютерных расчетов // Энергосбережение и водоподготовка. № 5. 2017. С. 36-46 (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/PGU-3.pdf)

Глава 12 Энергетические циклы на неводных теплоносителях (написано совместно с Н.Л. Будариным)

Цикл Ренкина был предложен в 50-х годах XIX века почти одновременно шотландским инженером и физиком У. Ренкином и немецким физиком и механиком Р. Клазиусом. В органическом цикле Ренкина используются химические испарения вместо пара, который используется в оригинале цикла. Химикаты или хладагенты, используемые в органическом цикле Ренкина (ОЦР – ORC), включают фреон, бутан, пропан, аммиак, и новые, «экологически чистые», хладагенты.

Применение ОЦР позволяет использовать низкопотенциальную тепловую энергию выхлопных газов газотурбинных установок (ГТУ) и двигателей внутреннего сгорания (ДВС), геотермальных источников и других тепловых потоков с относительно невысокой температурой. Органический цикл Ренкина можно использовать для опреснения морской воды, получения электроэнергии путем сжигания биотоплива, а также для утилизации тепловых отходов промышленных предприятий [1].

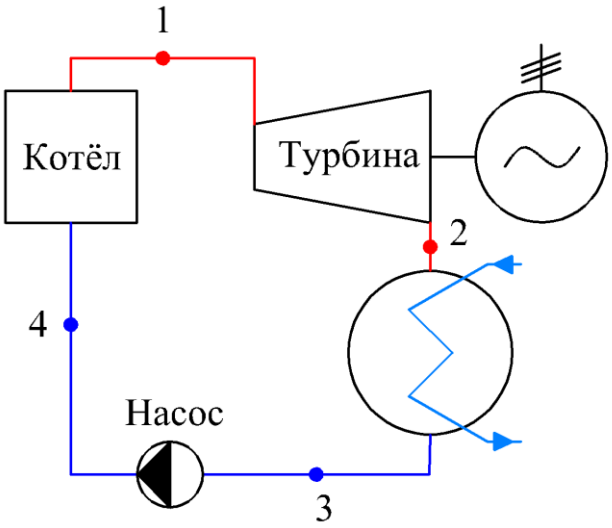
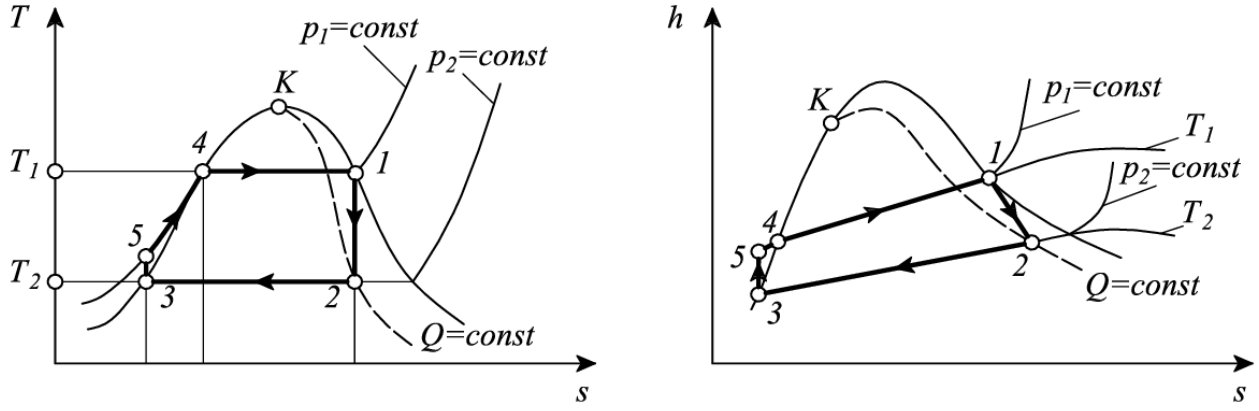


Рис. 12.1. Схема теплосиловой установки с ОЦР (ORC)



а б

Рис. 12.2. Диаграммы ОЦР (ORC): а – T, s-диаграмма; б – h, s-диаграмма

Идеальный органический цикл Ренкина в T, s- и h, s-диаграммах изображен на рис. 12.2. Принцип его работы следующий: рабочее тело поступает в турбину, где путем

адиабатического расширения приводит в действие генератор, который преобразует механическую работу в электрическую энергию (процесс 1-2). Далее хладагент поступает в конденсатор, где проходит изобарический и изотермический отвод тепла. Влажный пар в конденсаторе полностью конденсируется по изобаре p_2 = const (точка 3 на рис. 12.2). Затем вода сжимается насосом от давления p_2 до давления p_1; этот адиабатный процесс показан в T, s-диаграмме вертикальным отрезком 3-5. Малая длина отрезка адиабаты 3-5 свидетельствует о малой работе, затрачиваемой насосом на сжатие воды, что является важным преимуществом цикла Ренкина [2].

Расчет в программе SMath

Постановка задачи. Провести расчет органического цикла Ренкина на этаноле, определив термический, внутренний относительный и абсолютный КПД цикла. Определить термодинамические свойства рабочего тела в ключевых точках процесса, используя пакет CoolProp, и, задаваясь относительными внутренними КПД турбины и насоса, рассчитать реальный цикл. Построить T, s-диаграмму с идеальным и реальном циклом с помощью пакета «График». Исходные данные: температура этанола на входе в турбину T_1 = 150°C, на выходе T_2 = 50°C; относительный внутренний КПД насоса $\eta_{oiн}$ = 80%, турбины $\eta_{oiт}$ = 80%.

Решение.

Работа с функциями пакета CoolProp

С помощью пакета CoolProp определим давление на входе и выходе из турбины по соответствующим температурам. Для определения теплофизических свойств рабочего тела необходимо воспользоваться встроенной функцией `CoolProp_Props`. Для удобства и компактности расчета создадим пользовательскую функцию *Prps*, связав ее со встроенной функцией:

```
Prps(x1,x2,x3,x4,x5):=CoolProp_Props(x1,x2,x3,x4,x5,"Ethanol"
                                     ),
```

где `xi` – аргументы, фиксирующие теплофизические свойства веществ (см. главу 1).

Таким образом, присвоив функции пользователя *Prps* встроенную функцию *CoolProp_Props* можно определить давление этанола на входе и выходе из турбины по соответствующим температурам (формулы 12.1 и 12.2).

$$p_1 := \mathrm{Prps}("P"; "T"; T_1; "Q"; 1) = 0{,}983\ \text{МПа} \qquad (12.1)$$

$$p_2 := \mathrm{Prps}("P"; "T"; T_2; "Q"; 1) = 29{,}41\ \text{кПа} \qquad (12.2)$$

Примечание: по умолчанию SMath выдает давление в паскалях, температуру в кельвинах, удельную энтальпию в греях, поэтому в расчёте данные единицы измерения были заменены (см. рис. 2.3 в главе 2).

Здесь определяется давление *"P"* по температуре *"T"*, в частности от T_1 и T_2, и по степени сухости *"Q"*, равной 1 (насыщенный пар; это значение можно задавать от 0 до

1). Аналогичным образом рассчитываются значения удельной энтальпии и удельной энтропии в точке 1 (формулы 12.3 и 12.4).

$$h_1 := Prps\left("H"; "T"; T_1; "Q"; 1\right) = 929,6\ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.3)$$

$$s_1 := Prps\left("S"; "T"; T_1; "Q"; 1\right) = 2,245\ \frac{кДж}{кг\ К} \qquad (12.4)$$

Степень сухости этанола на входе в конденсатор определим по температуре и энтропии в точке 2 (формула 12.5).

$$x_2 := Prps\left("Q"; "T"; T_2; "S"; s_2 := s_1\right) = 89,94\ \% \qquad (12.5)$$

где Q – степень сухости, обозначаемая в пакете CoolProp через такой идентификатор.

Удельная энтальпия этанола на входе в конденсатор (формула 12.6).

$$h_2 := Prps\left("H"; "T"; T_2; "Q"; x_2\right) = 722,1\ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.6)$$

Из выражения для относительного внутреннего КПД турбины находим реальную удельную энтальпию этанола на входе в конденсатор (формула 12.7).

$$h_{2д} := h_1 - \eta_{oiт} \cdot \left(h_1 - h_2\right) = 763,6\ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.7)$$

С помощью нее найдем реальную удельную энтропию этанола на входе в конденсатор (формула 12.8).

$$s_{2д} := Prps\left("S"; "P"; p_2; "H"; h_{2д}\right) = 2,374\ \frac{кДж}{кг\ К} \qquad (12.8)$$

Определим удельные энтальпию и энтропию этанола на входе в насос (формулы 12.9 и 12.10).

$$h_3 := Prps\left("H"; "T"; T_2; "Q"; 0\right) = -79,26\ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.9)$$

$$s_3 := Prps\left("S"; "T"; T_2; "Q"; 0\right) = -0,235\ \frac{кДж}{кг\ К} \qquad (12.10)$$

где Q равно 0 для жидкости на линии насыщения.

По давлению и энтропии находим температуру этанола на выходе из насоса (формула 12.11).

$$T_4 := Prps\left("T"; "P"; p_4 := p_1; "S"; s_4 := s_3\right) = 50,18\ °C \qquad (12.11)$$

По найденной температуре находим энтальпию этанола после насоса (формула 12.12).

$$h_4 := Prps\left("H"; "T"; T_4; "P"; p_4 := p_1\right) = -78,01\ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.12)$$

Задаваясь относительным внутренним КПД насоса, находим реальные удельные энтальпию и энтропию этанола на входе в котел (формулы 12.13 и 12.14).

$$h_{4д} := \frac{1}{\eta_{оін}} \cdot \left(h_4 - h_3\right) + h_3 = -77,70 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.13)$$

$$s_{4д} := Prps\left("S"; "P"; p_1; "H"; h_{4д}\right) = -0,234 \ \frac{кДж}{кг \ К} \qquad (12.14)$$

Найдем удельную теплоту, подаваемую в котел (формула 12.15).

$$q_1 := h_1 - h_{4д} = 1007 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.15)$$

Удельная теплота, забираемая в конденсаторе, определяется по формуле 12.16.

$$q_2 := h_{2д} - h_3 = 842,9 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.16)$$

Теоретическая и реальная удельная работа турбины (формулы 12.17 и 12.18).

$$l_т := h_1 - h_2 = 207,4 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.17)$$

$$l_{тд} := h_1 - h_{2д} = 165,9 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.18)$$

Термический КПД цикла Ренкина на этаноле определяется по формуле 12.19.

$$\eta_t := \frac{\left(h_1 - h_2\right) - \left(h_4 - h_3\right)}{h_1 - h_4} = 20,46 \ \% \qquad (12.19)$$

Теоретическая и реальная удельная работа насоса (формулы 12.20 и 12.21).

$$l_н := h_4 - h_3 = 1,248 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.20)$$

$$l_{нд} := h_{4д} - h_3 = 1,56 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.21)$$

Удельная работа обратимого и реального цикла Ренкина на этаноле (формулы 12.22 и 12.23).

$$l_{ст} := l_т - l_н = 206,2 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.22)$$

$$l_{стд} := l_{тд} - l_{нд} = 164,4 \ \frac{кДж}{кг} \qquad (12.23)$$

Внутренний относительный КПД цикла Ренкина на этаноле определяется по формуле 12.24.

$$\eta_{ir} := \frac{l_{стд}}{l_{ст}} = 79,73 \ \% \qquad (12.24)$$

И наконец внутренний абсолютный КПД цикла Ренкина на этаноле рассчитывается по формуле 12.25.

$$\eta_{ирабс} := \eta_{ir} \cdot \eta_t = 16,31\ \%$$ (12.25)

Данные для построения диаграмм

Для построения T, s-диаграммы сначала необходимо определить температуры этанола в критической и тройной точках. Для этого воспользуемся функцией *Prps* с такими первыми аргументами как "*Tcrit*" и "*Ttriple*" (формулы 12.26 и 12.27).

$$T_{Cr} := Prps\left("Tcrit"; ""; 0; ""; 1\right) = 241,6\ °C$$ (12.26)

$$T_{Tr} := Prps\left("Ttriple"; ""; 0; ""; 0\right) = -114\ °C$$ (12.27)

Эти температуры также можно найти на сайте coolprop.org в разделе свойств этанола [3].

Необходимо также задать количество n точек (элементов) вектора TT_{sat} значений температур и диапазон итераций для построения кривых на диаграмме (формуляция 12.28).

$$n := 3000 \qquad i := [1; 1,5..n]$$

$$TT_{sat} := T_{Tr} + \frac{T_{Cr} - T_{Tr}}{n} \cdot i$$ (12.28)

Встроенный оператор «Диапазон с указанием второго значения» находится в диалоговом окне «Матрицы» панели инструментов SMath (рис. 12.3):

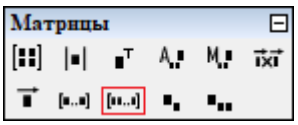


Рис. 12.3. Оператор «Диапазон с указанием второго значения»

Далее нужно выбрать встроенный оператор векторизации (с функцией применения данного действия к каждому элементу вектора) в панели инструментов «Матрицы» пакета SMath (рис. 12.4):

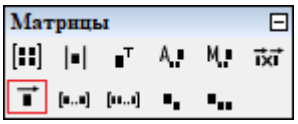


Рис. 12.4. Оператор векторизации

Далее необходимо задать векторы удельных энтропий, по которым строятся линии насыщения (формулы 12.29 и 12.30 с оператором векторизации).

$$\overrightarrow{sV_{sat} := Prps\left("S"; "T"; TT_{sat}; "Q"; 1\right)}$$ (12.29)

$$\overrightarrow{sL_{sat} := Prps\left("S"; "T"; TT_{sat}; "Q"; 0\right)}$$ (12.30)

Чтобы кривые отобразились на диаграмме, необходимо воспользоваться встроенной функцией *augment* и оператором «Алгебраическая система» (рис. 12.5).

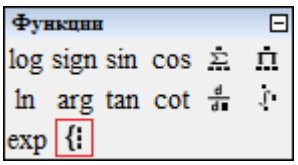


Рис. 12.5. Оператор «Алгебраическая система»

Итоговая система для построения кривых насыщения (saturation lines) будет выглядеть так (формуляция 12.31).

$$SL := \begin{pmatrix} \text{augment}\left(\dfrac{sV_{sat}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \dfrac{TT_{sat}}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"."};\ 1;\ \text{"red"}\right) \\ \text{augment}\left(\dfrac{sL_{sat}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \dfrac{TT_{sat}}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"."};\ 1;\ \text{"blue"}\right) \end{pmatrix} \quad (12.31)$$

Внесем переменную «SL» в T, s-диаграмму (рис. 12.7).

Примечания: здесь ведется перевод в единицы измерения (кДж/кг К и °C), элемент построения линии (точка размером «1») и цвет линий (красный "red" и синий "$blue$"). Таким образом, получаем кривые насыщения, показанные на рис. 12.7.

Далее построим линии идеального и реального органического цикла Ренкина на этаноле. Для этого необходимо построить соответствующие процессам диапазон давления, векторы плотности, энтальпии, температуры и энтропии в теоретических и реальных точках расширения в турбине (формулы 12.32 – 12.36).

$$p_{12} := \left[p_1 ; p_1 - \frac{p_1 - p_2}{n} .. p_2\right] \quad (12.32)$$

$$D_{12} := \overrightarrow{Prps\left("D"; "P"; p_{12}; "S"; s_1\right)} \quad (12.33)$$

$$h_{12} := \overrightarrow{Prps\left("H"; "P"; p_{12}; "D"; D_{12}\right)} \quad (12.34)$$

$$T_{12д} := \overrightarrow{Prps\left("T"; "P"; p_{12}; "H"; h_{12д}\right)} \quad (12.35)$$

$$D_{12д} := \overrightarrow{Prps\left("D"; "P"; p_{12}; "H"; h_{12д}\right)} \quad (12.36)$$

$$s_{12д} := \overrightarrow{Prps\left("S"; "T"; T_{12д}; "D"; D_{12д}\right)} \quad (12.37)$$

Таким образом, реальный процесс расширения этанола в турбине рассчитывается по формуле 12.38.

$$l_{12д} := \text{augment}\left(\frac{s_{12д}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_{12д}}{\text{К}} - 273{,}15\right) \quad (12.38)$$

Повторим вычисления для реального процесса сжатия этанола в насосе и внесем новые функции в T, s-диаграмму (рис. 12.7).

$$p_{12} := \left[p_1 ; p_1 - \frac{p_1 - p_2}{n} .. p_2 \right]$$

$$\overrightarrow{T_{12} := Prps\left("T"; "P"; p_{12}; "S"; s_1\right)}$$

$$\overrightarrow{h_{12} := Prps\left("H"; "P"; p_{12}; "T"; T_{12}\right)}$$

Saturation pressure [982550 Pa] corresponding to T [423.15 K] is within 1e-4 % of given p [982550 Pa] : PropsSI("H","P",982549.6589,"T",423.15,"Ethanol")

$$\overrightarrow{T_{12д} := Prps\left("T"; "P"; p_{12}; "H"; h_{12д}\right)}$$

$$\overrightarrow{s_{12д} := Prps\left("S"; "P"; p_{12}; "T"; h_{12д}\right)}$$

$$l_{12д} := \text{augment}\left(\frac{s_{12д}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}} ; \frac{T_{12д}}{\text{К}} - 273{,}15 \right)$$

Рис. 12.6. Ошибка «Saturation pressure»

Примечание: при определении термодинамических свойств этанола с помощью функции `Props`, а именно энтальпии при расширении в турбине от давления и температуры, появляется ошибка, представленная на рис. 12.6. В ней говорится, что давление насыщения, соответствующее температуре, находится в пределах 0,0004 % от давления насыщения, поскольку и жидкость, и пар определяются вдоль кривой насыщения [4]. Вариант расчета, позволяющий избежать ошибки, предложен выше.

Для построения всего цикла ОЦР воспользуемся функцией `augment` и оператором фигурные скобки «Алгебраическая система» (формуляция 12.39).

$$Cycle := \text{augment}\left(\begin{bmatrix} \frac{Prps("S";"T";T_1;"Q";0)}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{s_{2д}}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{s_3}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{s_{4д}}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \\ \frac{Prps("S";"T";T_1;"Q";0)}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_{2д}}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_{4д}}{\text{К}} - 273{,}15 \\ \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15 \end{bmatrix}\right) \quad (12.39)$$

Важно, чтобы точки T и s координат были последовательно введены в тело функции – испарение (нагрев и кипение) этанола в котле от точки 0 до точки 1, идеальное расширение от точки 1 до 2 и реальное до точки 2д, конденсация до точки 3, идеальное сжатие в насосе до дочки 4 и реальное сжатие до точки 4д.

Полученную переменную *Cycle* вводим в диаграмму (рис. 12.7).

Для отображения линий сухости этанола в насыщенном состоянии в теоретических и реальных точках введем в расчет переменную *X*. Степень сухости в реальной точке определим с помощью встроенной функции *Props* (формула 12.40 и формуляция 12.41).

$$x_{2д} := \text{Prps}("Q";"T";T_2;"S";s_{2д}) = 94{,}60\ \% \quad (12.40)$$

$$X := \begin{cases} \text{augment}\left(\frac{\overrightarrow{Prps("S";"T";TT_{sat};"Q";x_2)}}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}}; \frac{TT_{sat}}{\text{К}} - 273{,}15\right) \\ \text{augment}\left(\frac{\overrightarrow{Prps("S";"T";TT_{sat};"Q";x_{2д})}}{\text{кДж кг}^{-1}\,\text{К}^{-1}}; \frac{TT_{sat}}{\text{К}} - 273{,}15\right) \end{cases} \quad (12.41)$$

Данную переменную внесем в диаграмму на рис. 12.7.

В завершении построения T, s-диаграммы создадим ещё одну переменную с именем *Points*, которая отмечает точки на графике (формуляция 12.42).

$$Points := \begin{cases} \text{augment}\left(\frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"1"};\ 14;\ \text{"black"}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_{2д}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_{2д}}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"2д"};\ 14;\ \text{"black"}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_1}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"2"};\ 14;\ \text{"black"}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_3}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_2}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"3-4"};\ 14;\ \text{"black"}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{s_{4д}}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_{4д}}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{" 4д"};\ 14;\ \text{"black"}\right) \\ \text{augment}\left(\frac{Prps\left(\text{"S"};\ \text{"T"};\ T_1;\ \text{"Q"};\ 0\right)}{\text{кДж кг}^{-1}\ \text{К}^{-1}};\ \frac{T_1}{\text{К}} - 273{,}15;\ \text{"0"};\ 14;\ \text{"black"}\right) \end{cases} \tag{12.42}$$

Примечания: точки 1, 2, 2д, 3-4, 4д от T и s координат были последовательно введены в переменную *Points* и обозначены соответствующими литерами размера 14 цвета *"black"*.

В итоге всех построений получаем искомую T, s-диаграмму работы этанола в цикле Ренкина, показанную на рис 12.7.

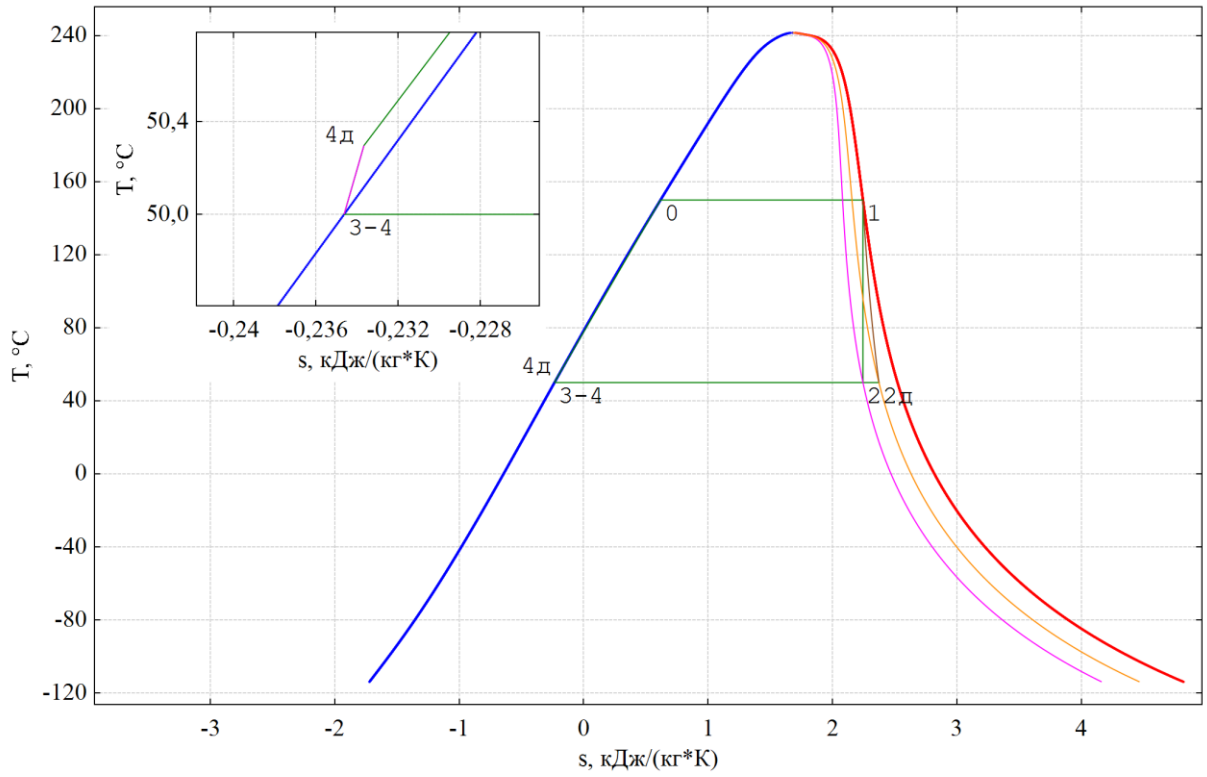
Длина отрезка 3-4д в T, s и h, s-диаграммах в области жидкости весьма мала, а изобары проходят очень близко друг от друга. Благодаря этому при изоэнтропном сжатии этанола, находящемся при температуре 50 °C и давлении насыщения 29,4 кПа, до давления 982,5 кПа температура воды возрастает менее чем на один кельвин, и можно с хорошей степенью приближения считать, что в области жидкости изобары воды практически совпадают с кривой насыщенной жидкости; поэтому зачастую при изображении цикла Ренкина в T, s-диаграмме изобары в области жидкости сливаются с левой пограничной кривой [2].

Для построения кривых в области сжатия этанола необходимо задать количество n точек (элементов) вектора TT_{sat} значений температур и диапазон итераций для построения кривых на диаграмме (формуляция 12.43).

$$n := 500 \qquad i := [1;\ 1{,}01\ ..\ n]$$

$$TT_{sat} := T_{Tr} + \frac{T_{Cr} - T_{Tr}}{n} \cdot i \tag{12.43}$$

Таким образом, устанавливая диапазон и количество точек для разных областей, можно ускорить вычисления и построение диаграмм в пакете SMath (рис. 12.7).



$$\begin{bmatrix} SL_{Ts} \\ Cycle_{Ts} \\ X_{Ts} \\ Points_{Ts} \\ l_{12д,Ts} \\ l_{34д,Ts} \end{bmatrix}$$

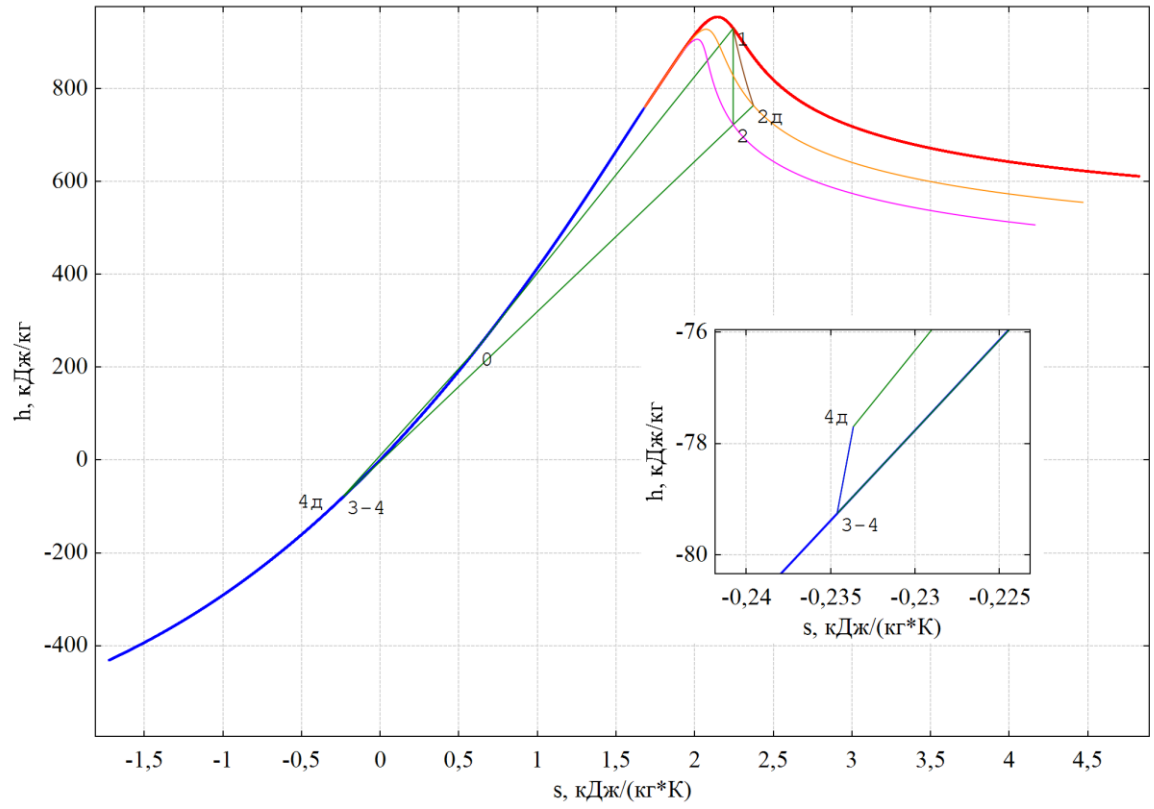
Рис. 12.7. T, s-диаграмма ОЦР (ORC)

Аналогичным образом строится h, s-диаграмма, только помимо векторов удельных энтропий необходимо задать векторы удельных энтальпий (формулы 12.44 и 12.45).

$$hV_{sat} := \overrightarrow{Prps\left("H"; "T"; TT_{sat}; "Q"; 1\right)} \qquad (12.44)$$

$$hL_{sat} := \overrightarrow{Prps\left("H"; "T"; TT_{sat}; "Q"; 0\right)} \qquad (12.45)$$

Далее через функцию *augment* строятся линии насыщения, сам термодинамический цикл, а также точки процесса по значениям удельных энтальпий и энтропий. Также задается количество точек вектора TT_{sat} значений температур и диапазон итераций для построения кривых в области сжатия (рис. 12.8).



SL_{hs}
$Cycle_{hs}$
X_{hs}
$Points_{hs}$
$l_{12д,hs}$
$l_{34д,hs}$

Рис. 12.8 h, s-диаграмма ОЦР (ORC)

Задание читателям

1. Постройте T, h, p, v, p, s и p, v диаграммы вышеописанного термодинамического цикла.
2. Рассчитайте органический цикл Ренина на метаноле CH_3OH, пропане C_3H_8 и аммиаке NH_3.
3. Рассчитайте в среде SMath термодинамический цикл на сврхкритическом углекислом газе (см. http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/CO2-cycle.xmcd).

Список литературы

1. Белов Г. В., Дорохова М. А. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. НП «НЭИКОН» - 2009. - №3. - С. 35-46
2. Кириллин В. А, Сычев В. В, Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. Москва «Энергоатомиздат» 1983 - 416 с.
3. http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/Ethanol.html#fluid-ethanol

4. http://www.coolprop.org/coolprop/HighLevelAPI.html#vapor-liquid-and-saturation-states