

# ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:

- *Технические предложения по созданию паротурбинной установки для замены устаревших энергоблоков 150...300 МВт*
- *Повышение эффективности промышленно-отопительных ТЭЦ*
- *Технические расчеты в сфере Mathcad*

**2** **2000**

---

**МАИК «НАУКА»  
ИНТЕРПЕРИОДИКА**





УДК 621.039.54

## Теплотехнические расчеты в среде Mathcad

Очков В.Ф.<sup>1</sup>, Утенков В.Ф., кандидаты техн. наук, Орлов К.А., бакалавр техн. наук

Московский энергетический институт

Описана методика решения теплотехнических задач с помощью математического пакета Mathcad. Даны ссылки на адреса Internet, где хранятся функции термодинамических свойств воды и водяного пара.

В настоящее время для решения учебных, инженерно-технических и научных задач наряду с традиционными языками программирования (Fortran, Pascal, BASIC, C и др.) и табличными процессорами (Excel) широко используются специализированные математические пакеты (Maple, Mathematica, MatLab, Mathcad и др.), которые позволяют специалистам в конкретной научно-технической области быстро осваивать работу на компьютере и реализовывать на них математические модели, не вдаваясь в тонкости программирования и не прибегая к услугам программистов [1].

Работа в среде Mathcad — это третья ступень в применении вычислительной техники при решении научно-технических задач. Первые две ступени — работа в машинных кодах и использование языков программирования. Mathcad является зарегистрированной торговой маркой фирмы MathSoft, Inc. (www.mathsoft.com), представляющая собой сокращение английской фразы: **Mathematical Computer Aided Design** — математическое проектирование с помощью компьютера, математическая система автоматизированного проектирования (САПР).

Ниже приведен пример решения типовой задачи теплоэнергетики, которая дает представления об особенностях работы в среде Mathcad.

### Особенности среды Mathcad

1. Интерфейс пользователя в среде Mathcad имеет операторы ввода и вывода значений переменных и выражений.

В среде Mathcad три оператора ввода:

$A \leftarrow \square$  — ввод значения **локальной переменной**, область видимости которой ограничена местом ввода

переменной и концом вычислительной процедуры, отмеченной вертикальной чертой, фиксирующей начало и конец программного блока (см. ниже программы формирования функций  $v_w$  и  $h_{ss}$ );

$A := \square$  — ввод значения **полуглобальной переменной**, ее область видимости — это часть Mathcad-документа, расположенная правее и ниже места ввода переменной;

$A \equiv \square$  — ввод значения **глобальной переменной**, область видимости которой весь Mathcad-документ.

Кроме того, в Mathcad-документе возможны ссылки на другой Mathcad-документ (на соответствующий Mathcad-файл на диске — файл с расширением mcd), переменные и пользовательские функции которого становятся видимыми в текущем Mathcad-документе.

В среде Mathcad два оператора вывода:

$A = \square [\square]$  — вывод численного значения переменной или выражения: на месте первого операнда появляется числовая или текстовая константа, а на месте второго (необязательного операнда) — соответствующая размерность (см. таблицу), если числовая константа размерная; пользователь вправе менять размерность умолчания на любую другую, определенную к данному моменту;

$A \rightarrow \square$  — вывод символического значения переменной или выражения.

Переменные в среде Mathcad могут хранить скалярное, векторное и матричное значения. Ниже во фрагменте Mathcad-документа переменной  $a$  присваивается скалярное вещественное значение, переменной  $V$  — вектор, элементы (компоненты) которого — целочисленный скаляр, вещественный скаляр и комплексный скаляр, а переменной  $M$  — квадратная матрица третьего порядка, где все элементы кроме одного — целочисленные скаляры. Ввод векторов и матриц (массивов)

<sup>1</sup> 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14. МЭИ.



Теплотехнические единицы измерения физических величин, встроенные в Mathcad

Физическая величина	Единица измерений
Время (time)	day (день), hr (час), min (минута), s или sec (секунда) и yr (год)
Вязкость динамическая (dynamic viscosity)	poise (пуаз)
Вязкость кинематическая (dynamic viscosity)	stokes (стокс)
Давление (pressure)	atm (атмосфера физическая), in_Hg (дюйм ртутного столба), Pa (паскаль), psi (фунт силы на квадратный дюйм) и torr (мм ртутного столба)
Длина (length)	cm (сантиметр), ft (фут), in (дюйм), km (километр), m (метр), mi (миля), mm (миллиметр) и yd (ярд)
Количество вещества (substance)	mole (моль)
Масса (mass)	gm (грамм), kg (килограмм), lb (фунт), mg (миллиграмм), oz (унция), slug (пуд), ton (тонна британская) и tonne (тонна метрическая)
Мощность (power)	hp (лошадиная сила) и kW или W или watt (ватт)
Объем (volume)	floz (объемная унция), gal (галлон), L или liter (литр) и mL (миллилитр)
Площадь (area)	acre (акр) и hectare (гектар)
Сила (force)	dyne (дина), kgf (килограмм силы), lbf (фунт силы) и N или newton (ньютон)
Скорость (velocity)	kph (километр в час) и mph (миля в час)
Температура (temperature)	K (градусы Кельвина) и R (градусы Ренкина)
Энергия (energy)	BTU (британская тепловая единица), cal (калория), erg (эрг), J или joule (джоуль) и kcal (килокалория)

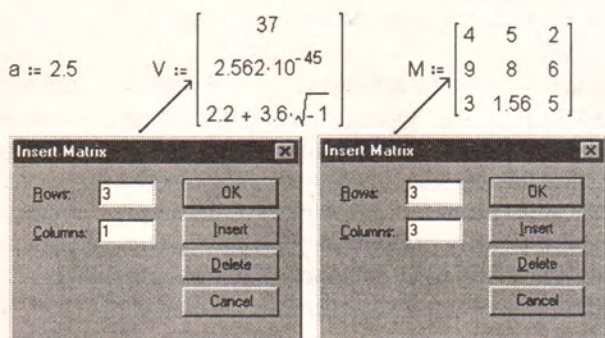


Рис. 1

в среде Mathcad осуществляется через диалоговое окно «Insert Matrix» (рис. 1).

Размер существующих массивов допустимо увеличивать (клавиша «Insert» — см. выше) или уменьшать («Delete»).

Скаляром, а также элементом вектора **V** и матрицы **M** могут быть не только число (целое, вещественное или комплексное — см. элементы приведенного выше вектора **V**), но и алгебраическое выражение, текст, а также новый вектор или матрица (механизм составных массивов). Булевы значения «True» (Истина) и «False» (Ложь) в среде Mathcad имеют значения 1 и 0 соответственно. Рассчитанные значения могут быть выведены в десятичном (умолчание), двоичном, восьмеричном или шестнадцатеричном формате.

Имена переменных в среде Mathcad могут содержать буквы латиницы (например, **t**), буквы кириллицы (**тнач**) и (чего нет в традиционных языках программирования) пробелы (**тнач**) и буквы греческого алфавита (**ξ<sub>нач</sub>**). Кроме того, в именах переменных допустимы нижние индексы и штрихи (**ξ'<sub>нач</sub>**). Все это позволяет делать Mathcad-документ максимально «читаемым», т.е. давать переменным и функциям те имена, которые закрепились за ними в процессе формирования той или иной научной дисциплины задолго до появления компьютеров.

2. В работе с Mathcad есть особенность, позволяющая называть его не просто математическим, а физико-математическим пакетом. Часто, решая физическую задачу, пользователь делает ошибки не в формулах и не в счете, а в размерностях физических величин. Данный пакет поддерживает основные системы физических величин (СИ, килограмм-метр-секунда, грамм-сантиметр-секунда и британскую систему единиц) и ведет пересчет, а также контроль размерностей (см. таблицу).

Для присваивания величине размерности за числовой константой ставится знак умножения (но его можно и не ставить) и вводится название соответствующей размерности. — **L: = 5 m** (или **L: = 5 m**, что более соответствует общепринятой норме записи размерностей).

Для ввода размерностей предусмотрено диалоговое окно «Ввод размерности» («Insert Unit»), определяющее физическую величину (Dimension), единицу изме-

рения (Ur  
с которой  
величины  
3. В па  
ческий а  
ски реша  
библиоте  
следующ  
Бессе.  
компл  
решен  
(задача I  
производ  
типа I  
фина  
работ  
преоб  
гипер  
обраб  
интер  
Predictio  
логар  
ponential  
теори  
Combin  
ступе  
плотн  
расп  
случ  
регре  
обра  
реше  
же реш  
сорт  
стат  
текс  
триг  
окру  
Round-  
рабо  
волн





Рис. 2

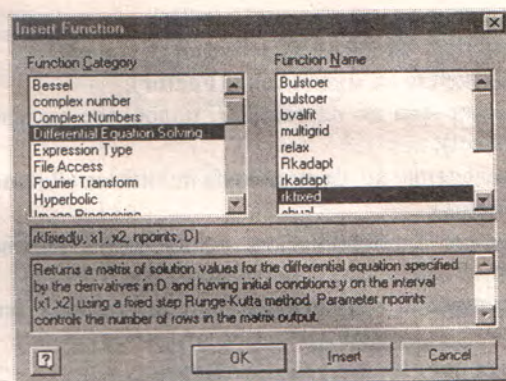


Рис. 3

решения (Unit) и систему единиц (System), в соответствии с которой по умолчанию будут выводиться размерные величины (рис. 2).

3. В пакет Mathcad интегрирован мощный математический аппарат, позволяющий численно и аналитически решать разнообразные задачи без вызова внешних библиотек. Перечень встроенных функций Mathcad следующий:

- Бесселя (Bessel);
- комплексных чисел (Complex Numbers);
- решения дифференциальных уравнений и систем (задача Коши, краевая задача, уравнения в частных производных — Differential Equation Solving);
- типа выражения (Expression Type);
- финансовых (Financial, Mathcad 2000);
- работы с файлами (File Access);
- преобразований Фурье (Fourier Transform);
- гиперболические (Hyperbolic);
- обработки образов (Image Processing);
- интерполяции и экстраполяции (Interpolation and Prediction);
- логарифмические и экспоненциальные (Log and Exponential);
- теории чисел и комбинаторики (Numbers Theory/Combinatorics);
- ступенек и условия (Piecewise Continuous);
- плотности вероятности (Probably Density);
- распределения вероятности (Probably Distribution);
- случайных чисел (Random Numbers);
- регрессии и сглаживания (Regression and Smoothing);
- обработки сигналов (Signal Processing);
- решения алгебраических уравнений и систем, а также решения оптимизационных задач (Solving);
- сортировки (Sorting);
- статистические (Statistics);
- текстовые (String);
- тригонометрические (Trigonometric);
- округления и работы с частью числа (Truncation and Round-Off);
- работы с векторами и матрицами (Vector and Matrix);
- волнового преобразования (Wavelet Transform).

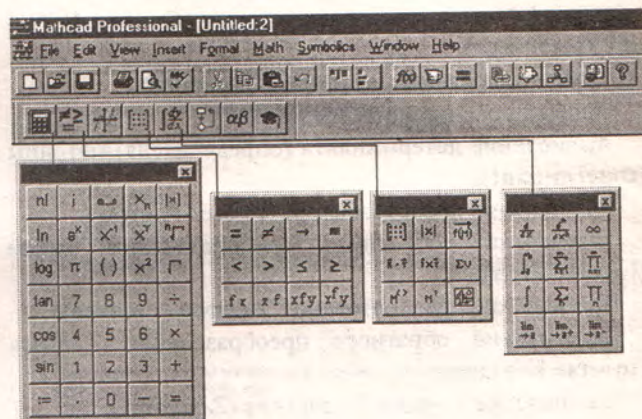


Рис. 4

Для работы со встроенными функциями предусмотрено диалоговое окно «Ввод функции» («Insert Function»), показывающее группы функций (Function Category), имя функции (Function Name), ее синтаксис и краткую аннотацию (рис. 3).

Кроме математических функций в Mathcad-документе можно работать с математическими операторами, которые вводятся нажатием соответствующих кнопок панелей инструментов (рис. 4).

Одна из причин популярности Mathcad заключается в том, что пользователь вправе вставлять в документы функцию либо оператор в зависимости от того, к чему он привык, изучая математику в школе или в институте. Благодаря этому Mathcad-документ максимально похож на лист с математическими выкладками, написанными от руки или созданными в среде какого-либо текстового процессора (MS Word, Scientific Word, Chiriter и др.).

В систему Mathcad, кроме того, интегрированы средства символьной математики, что позволяет решать поставленные задачи (этап задачи) не только численно, но и аналитически. Ниже перечислены основные команды из меню символьной математики Mathcad:

- символьное вычисление выражения (Symbolically);
- вычисление численного значения символьного выражения (Floating Point);
- комплексное преобразование выражения (Complex);



упрощение выражения (**Simplify**);  
 раскрытие скобок в выражении (**Expand**);  
 разложение на множители (**Factor**);  
 группировка по слагаемым, подобным выделенному (**Collect**);  
 определение коэффициентов полинома (**Polynomial Coefficients**);  
 решение алгебраических уравнений и неравенств (**Solve**);  
 подстановка переменной или выражения (**substitute**);  
 поиск производной (**Differentiate**);  
 поиск первообразной (**Integrate**);  
 разложение в ряд Тейлора (**Expand to Series**);  
 разложение на элементарные дроби (**Convert to Partial Fraction**);  
 транспонирование матрицы (**Transpose**);  
 инвертирование матрицы (**Invert**);  
 вычисление детерминанта (определителя) матрицы (**Determinant**);  
 вычисление преобразования Фурье (**Fourier**);  
 вычисление обратного преобразования Фурье (**Inverse Fourier**);  
 вычисление преобразования Лапласа (**Laplace**);  
 вычисление обратного преобразования Лапласа (**Inverse Laplace**);  
 вычисление  $z$ —преобразования (**Z-trans**);  
 вычисление обратного  $z$ —преобразования (**Z-trans**).

4. Математические выражения в среде Mathcad записываются в их общепринятой нотации: числитель находится сверху, а знаменатель — снизу, в интеграле пределы интегрирования также расположены на привычных местах. Казалось бы, все это мелочи, никак не влияющие на вычислительный процесс, но программа должна быть понятной не только для компьютера, но и для человека. Пользователь, анализируя Mathcad-документ на экране дисплея или на бумаге принтера, видит, что данная величина записана в числителе и ее рост приводит к возрастанию всего выражения. А это очень важно при анализе математических моделей, форма и содержание которых едины.

5. В среде Mathcad процесс создания программы идет параллельно с ее отладкой и оптимизацией. Пользователь, введя в Mathcad-документ новое выражение, может не только сразу подсчитать, чему оно равно при определенных значениях переменных и в выбранной системе размерностей, но и построить график или поверхность, беглый взгляд на которые может безошибочно показать, где кроется ошибка, если она была допущена при вводе формул или при создании самой математической модели. Отладочные фрагменты можно оставить в готовом документе для того, чтобы, например, еще раз убедить воображаемого или реального оппонента в правильности модели. Система Mathcad оборудована средствами анимации, что позволяет реализовать созданные модели не только в статике (числа, таблицы, графики), но и в динамике (анимационные клипы).

6. Пакет Mathcad дополнен справочником по основным математическим и физико-химическим формулам и константам, которые можно автоматически переносить в документ без опасения внести в них искажения, нередкие при ручной работе. К пакету можно приобрести те или иные электронные учебники по различным дисциплинам: решению обыкновенных дифференциальных уравнений, статистике, термодинамике, теории управления, сопротивлению материалов и т.д. Прежде чем приступить к решению задачи пользователь может изучить электронный учебник и перенести из него в свой документ нужные фрагменты, отдельные формулы и константы.

7. Не выходя из среды Mathcad, можно открывать новые документы на других серверах и пользоваться преимуществами информационных технологий, предоставляемых Internet. На рис. 5 приведено диалоговое окно, открываемое из среды Mathcad, с помощью которого пользователь может обмениваться информацией и вести совместные проекты по следующим разделам: математика и статистика, астрономия и навигация, электроэнергетика, физика, химия и химическая промышленность и т.д.:

Пользователи пакета Mathcad (или пакета Mathcad Explorer — свободно распространяемой в Internet уко-

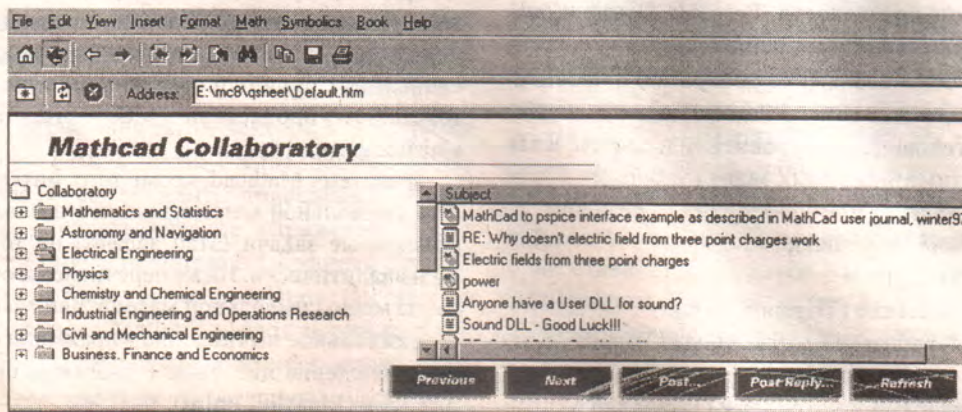
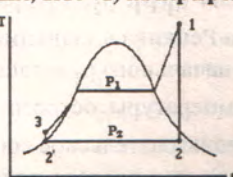
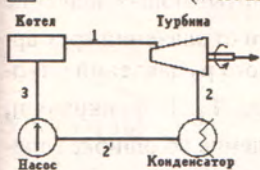


Рис. 5

Котел  
 3  
 2  
 Насос  
 1. Пользоват  
 МПа:=10<sup>6</sup>. Р  
 кг:=kg  
 2. Параметр  
 Температура о  
 Давление в ко  
 3. Решение 1  
 Referen  
 Удельная энтр  
 Пар в турбине  
 Удельная энтр  
 Удельная энтр  
 Степень сухос  
 Удельная энтал  
 Удельная энтал  
 при Р конденса  
 Удельная энтал  
 при Р конденса  
 Удельная энтал  
 выходящего из  
 Удельная работ  
 Удельный объе  
 Удельная работ  
 Удельная энтал  
 Удельная темп  
 Термический э  
 роченной  
 сообщен  
 (Post Rep  
 Задач  
 Mathcad  
 Ренкина  
 Расче  
 ских раз  
 мм рт ст  
 2 В М  
 вноситьс  
 и рисунок  
 мой цикл



**Определить термический кпд цикла Ренкина (W.J. Rankine; 1820-72) на перегретом паре.**



1. Пользовательские единицы измерения и дополнительная функция  
 $\text{МПа} := 10^6 \cdot \text{Па}$     $\text{бар} := 10^5 \cdot \text{Па}$     $\text{мм рт ст} := \text{torr}$     $\text{м} := \text{m}$   
 $\text{кг} := \text{kg}$     $\text{кДж} := 10^3 \cdot \text{J}$     $\text{ат} := \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$     $^{\circ}\text{C}(t) := (t + 273.15) \cdot \text{K}$
2. Параметры цикла   Давление острого пара    $P_1 := 80 \cdot \text{бар}$     $P_1 = 81.6 \cdot \text{ат}$   
 Температура острого пара    $T_1 := 560 \text{ } ^{\circ}\text{C}$     $T_1 = 833.15 \cdot \text{K}$     $T_1 = 1499.7 \cdot \text{R}$   
 Давление в конденсаторе    $P_2 := 40 \cdot \text{мм рт ст}$     $P_2 = 0.053 \cdot \text{бар}$     $P_2 = 0.054 \cdot \text{ат}$

3. Решение 1 - последовательный расчет

Reference: C:\Program Files\MathSoft\Mathcad\Thermo\Wat&Stea.mcd

Удельная энтропия острого пара  $s_1 := s_{ss}(T_1, P_1)$     $s_1 = 6.909 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$   
 Пар в турбине расширяется адиабатно и обратимо  $s_2 := s_1$   
 Удельная энтропия воды на линии насыщения при P конденсатора  $s_{w2} := s_w(P_2)$     $s_{w2} = 0.476 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$   
 Удельная энтропия пара на линии насыщения при P конденсатора  $s_{n2} := s_s(P_2)$     $s_{n2} = 8.395 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$   
 Степень сухости пара, выходящего из турбины:  $x_2 := \frac{s_2 - s_{w2}}{s_{n2} - s_{w2}}$     $x_2 = 81.23 \cdot \%$   
 Удельная энтальпия острого пара  $h_1 := h_{ss}(T_1, P_1)$     $h_1 = 3545.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельная энтальпия воды на линии насыщения при P конденсатора  $h_{w2} := h_w(P_2)$     $h_{w2} = 137.82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельная энтальпия пара на линии насыщения при P конденсатора  $h_{n2} := h_s(P_2)$     $h_{n2} = 2560.81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельная энтальпия влажного пара, выходящего из турбины:  $h_2 := h_{n2} \cdot x_2 + h_{w2} \cdot (1 - x_2)$     $h_2 = 2106.1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельная работа турбины:  $l_T := h_1 - h_2$     $l_T = 1439.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельный объем конденсата турбины:  $v_{w2} := v_w(P_2)$     $v_{w2} = 0.001005 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$   
 Удельная работа насоса:  $l_N := v_{w2} \cdot (P_1 - P_2)$     $l_N = 8.034 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельная энтальпия питательной воды:  $h_3 := h_{w2} + l_N$     $h_3 = 145.85 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Удельная теплота, подводимая в цикле:  $q_1 := h_1 - h_3$     $q_1 = 3400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$   
 Термический кпд цикла:  $\eta_1 := \frac{l_T - l_N}{q_1}$     $\eta_1 = 42.11 \cdot \%$

Рис. 6

роченной версии Mathcad) могут послать на сервер свое сообщение (кнопка Post...) или вступить в дискуссию (Post Reply...) по интересующему их вопросу.

**Задача.** На рис. 6—8 представлен расчет в среде Mathcad термического КПД простейшего цикла Ренкина<sup>2</sup> [2].

Расчет предваряется заданием (п. 1) пользовательских размерностей физических величин (МПа, бар, мм рт ст, м, кг, кДж и ат), которые связываются со

<sup>2</sup> В Mathcad-документ в качестве комментариев могут вноситься не только тексты, комментирующие расчет, но и рисунки. В частности, расчет КПД проиллюстрирован схемой цикла и его T, s-диаграммой.

4. Решение 2 - построение графических зависимостей

4.1. Формирование функции пользователя с тремя аргументами: параметрами цикла

```

 $\eta_1(P_1, P_2, T_1) :=$  "Расчет кпд цикла Ренкина"
 $x_2 \leftarrow$  "Расчет степени сухости пара"
 $s_1 \leftarrow s_{ss}(T_1, P_1)$     $s_2 \leftarrow s_1$ 
 $s_{w2} \leftarrow s_w(P_2)$     $s_{n2} \leftarrow s_s(P_2)$ 
 $\frac{s_2 - s_{w2}}{s_{n2} - s_{w2}}$ 
error("Сухость пара должна быть от 0 до 1") if ( $x_2 > 1$ ) + ( $x_2 < 0$ )
 $l_T \leftarrow$  "Расчет работы турбины"
 $h_1 \leftarrow h_{ss}(T_1, P_1)$     $h_{n2} \leftarrow h_s(P_2)$ 
 $h_{w2} \leftarrow h_w(P_2)$     $h_2 \leftarrow h_{n2} \cdot x_2 + h_{w2} \cdot (1 - x_2)$ 
 $h_1 - h_2$ 
 $l_N \leftarrow$  "Расчет работы насоса"
 $v_{w2} \leftarrow v_w(P_2)$ 
 $v_{w2} \cdot (P_1 - P_2)$ 
 $q_1 \leftarrow$  "Расчет подводимой теплоты"
 $h_3 \leftarrow h_{w2} + l_N$ 
 $h_1 - h_3$ 
 $\frac{l_T - l_N}{q_1}$ 
    
```

4.2. Проверка решения в п. 3    $\eta_1(80 \cdot \text{бар}, 40 \cdot \text{мм рт ст}, 560 \text{ } ^{\circ}\text{C}) = 42.11 \cdot \%$

Рис. 7

4.3. Построение табличной зависимости кпд цикла от температуры острого пара при  $P_1 = 10 \text{ МПа}$  и  $P_2 = 0.01 \text{ атм}$

$T_1 := 650 \cdot \text{K}, 660 \cdot \text{K}, \dots, 750 \cdot \text{K}$	$T_1$	$\eta_1(10 \cdot \text{МПа}, 0.01 \cdot \text{атм}, T_1)$
650 K	650 K	0.427
660 K	660 K	0.433
670 K	670 K	0.438
680 K	680 K	0.443
690 K	690 K	0.446
700 K	700 K	0.447
710 K	710 K	0.447
720 K	720 K	0.447
730 K	730 K	0.448
740 K	740 K	0.449
750 K	750 K	0.450

4.4. Построение графической зависимости кпд цикла от давления в конденсаторе при различных значениях  $P_1$  (5, 10 и 15 МПа);  $T_1 = 560 \text{ } ^{\circ}\text{C}$

$P_2 := 10 \cdot \text{мм рт ст}, 30 \cdot \text{мм рт ст}, 760 \cdot \text{мм рт ст}$

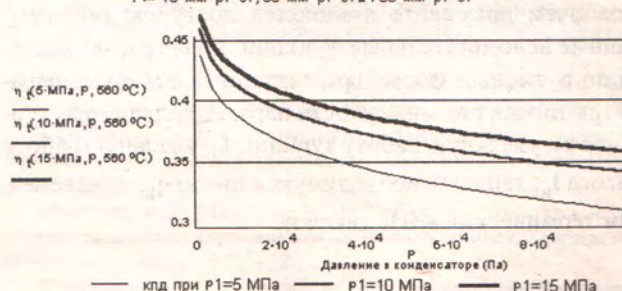


Рис. 8

встроенными в Mathcad — Pa, torr, m, kg, J, kgf и см (см. таблицу).

Расчет КПД цикла ведется двумя способами:

в режиме суперкалькулятора (п.п. 2 и 3 см. рис. 6);

в режиме программного формирования функции пользователя, возвращающей КПД цикла, (п. 4 — рис. 7).



Режим суперкалькулятора удобен при отладке расчета (при поиске в нем возможных ошибок) и при подготовке его протокола к проверке (например, к оппонированию рецензентом). Значение введенной переменной или переменной, рассчитанной по заданной пользователем формуле, там же выводится на экран дисплея и/или бумагу принтера с выбранной пользователем размерностью и точностью; массивы и пользовательские функции могут визуализироваться двух- и трехмерными графиками.

Функции, возвращающие термодинамические параметры воды и водяного пара [3], вводятся в расчет ссылкой (**Reference** — см. начало п. 3 на рис. 6) на соответствующий Mathcad-документ.

Авторами данной статьи построены почти все функции термодинамических свойств воды и водяного пара: удельная энтальпия кипящей воды на линии насыщения  $h_w(p)$ , удельная энтальпия сухого пара на линии насыщения  $h_s(p)$ , удельная энтропия кипящей воды на линии насыщения  $s_w(p)$ , удельная энтропия сухого пара на линии насыщения  $s_s(p)$ , удельная энтропия перегретого пара  $s_{ss}(T, p)$  и др. Соответствующий самораскрывающийся архивный файл с именем **WaterSteamPro.exe** хранится на FTP-сервере по Internet-адресу: <ftp://twt.mpei.ac.ru/ochkov/thermo.mcd>. Этот файл можно по сети Internet скопировать на компьютер конкретного пользователя, разархивировать файл и задействовать его в термодинамических расчетах, что и было сделано при решении этой задачи. Кроме того, о свойствах воды и водяного пара (и некоторых других веществ) можно узнать, просмотрев в Internet следующие сайты:

<http://www.lapws.oug> (Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара);

<http://webbook.nist.gov/chemistr/fluid> (Национальный институт стандартов США).

После ссылки на файл со свойствами воды и пара в рабочем документе становятся доступны (видимы) данные вспомогательные функции. Далее расчет ведется по рутинным формулам, задающим основные параметры цикла: степень сухости пара, выходящего из турбины  $x_2$ , удельную работу турбины  $I_T$ , удельную работу насоса  $I_n$ , теплоту, подводимую в цикле  $q_k$ , и, наконец, сам термический КПД цикла  $\eta_t$ .

В п. 4 (см. рис. 7) программно формируется функция пользователя  $\eta_t(p_1, p_2, T_1)$ , рассчитывающая значение КПД цикла Ренкина в зависимости от значений трех аргументов: начального  $p_1$  и конечного  $p_2$  давлений в турбине и температуры острого пара  $T_1$ . В функцию  $\eta_t$  встроено пользовательское сообщение об ошибке (оператор **error**): при расчете подразумевается, что в конденсатор поступает влажный пар (допущение расчета).

При формировании функции  $\eta_t$  все промежуточные значения заносятся оператором  $\square \leftarrow \square$  в локальные переменные, область видимости которых ограничена самой программой-функцией. Вертикальные линии отмечают начала и концы соответствующих операторных блоков.

Функция пользователя  $\eta_t(p_1, p_2, T_1)$  позволяет средствами Mathcad построить табличные (п. 4.3) и графические (п. 4.4) [рис. 8] зависимости, связывающие КПД цикла с его параметрами.

Mathcad-файл с решением рассмотренной в данной статье задачи читатель может получить по адресу <ftp://twt.mpei.ac.ru/ochkov/thermo.mcd>.

Там же помещены следующие папки:

**TOT** — задачи тепло- и массообмена (А.П. Солодов);

**TOE** — задачи теоретических основ электротехники (Э.В. Кузнецов);

**ASU** — задачи из области автоматизированных систем управления (М.А. Панько, В.Р. Сабанин, В.В. Усенко, К.А. Орлов и др.)

**СНЕМ** — задачи из области химико-технологических основ энергетики (В.Ф. Очков).

Коллекция задач, решенных в среде Mathcad, хранится по Internet-адресам: <http://www.mathsoft.com/appsindex.html> и <http://webserve.mathsoft.com/mathcad/collab>.

Редакция планирует поместить серию статей по использованию Mathcad в теплоэнергетических расчетах.

#### Список литературы

1. Очков В.Ф. Mathcad 8 Pro для студентов и инженеров. М.: КомпьютерПресс, 1999.
2. Theory and Selected Problems of Thermodynamics for Engineers (Теория и некоторые задачи курса термодинамики для инженеров). Электронный учебник для среды Mathcad, созданный по одноименной книге Merle C. Potter and Craig W. Somerton.
3. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во МЭИ, 1999.

УДК 621.1

Аверкин

вание систем

Акимова

школе турбо

Алексеев

в ОАО «ТМ

лое машино

Байбикова

синтеза про

машинах //

Балабанов

ЧНД турбин

реконструк

Баринов

плутации в

тика. 1999.

Баринов

мощностью

Бергер

ленная энер

Бергер

по давлению

трические с

Богачков

устойчивос

параметры

Борисов

и эксплуата

Металловед

Бродов

ция маслоо

ка. 1999. №

Бурин

ра в пароту

ческая моде

Вайн

вание меха

бин высоко

Векслер

компрессор

та металл

Венедик

дель профи

плезнергет

Воронин

нии электр

Гладш

тых корпус

Голова

ТЭС // Изв.

Голош

Совершенство

Тяжелое ма

Голош

естественн

энергетика

Гутор

эксплуатац