

Этюд 4. Мой первый теплотехнический Mathcad-расчет

Если мы имеем под рукой функции по свойствам основного рабочего тела и теплоносителя теплоэнергетики — воды и водяного пара (см. *этюд 1*) и умеем работать с размерными величинами (см. *этюд 2*), то нам очень просто решить одну несложную теплотехническую задачу — рассчитать термический КПД (η_t) простейшего паротурбинного энергетического цикла.

В среде Mathcad есть очень полезный инструмент — ссылка на другой Mathcad-документ, и мы о нем уже рассказывали в *этюде 1* (см. рис. 1.5, например). В среде Mathcad 15 такую ссылку можно делать на документ, хранящийся на собственном компьютере, в локальной компьютерной сети и в Интернете. На рис. 4.1 показаны команды Mathcad 15, выполнив которые, можно сделать ссылку на очень интересный и полезный файл с именем H2O, расширением xmc dz, хранящийся в Интернете по адресу <http://tw.t.mpei.ru/tthb>.

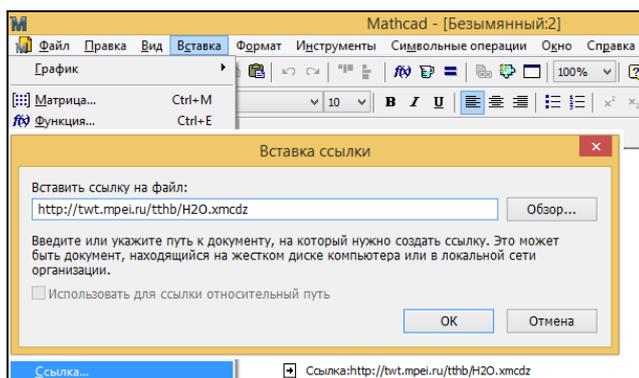


Рис. 4.1. Ссылка на Mathcad-документ в Интернете

После такой ссылки в рабочем Mathcad-документе станут доступными (видимыми, как говорят программисты) функции, возвращающие (опять же программистский жаргон) значения свойств воды и водяного пара в зависимости от параметров этого рабочего тела (см. верхнюю часть рис. 4.2).

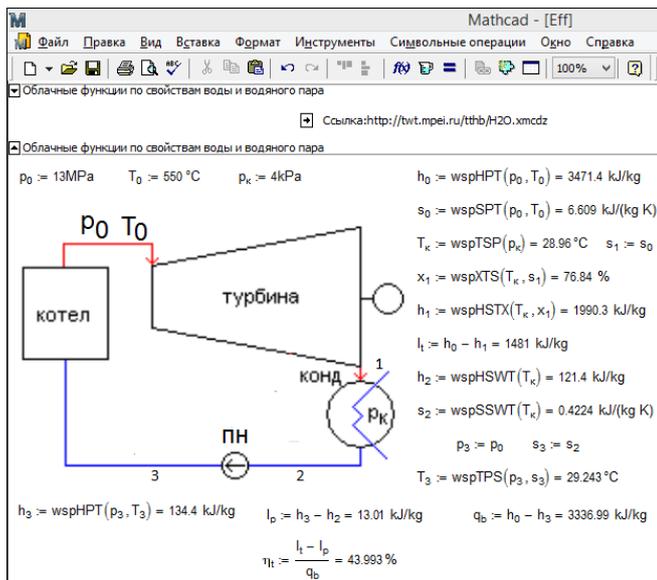


Рис. 4.2. Расчет КПД паротурбинного цикла в среде Mathcad 15 с использованием "облачных" функций

При расчете КПД паротурбинного цикла нам понадобятся следующие функции, имеющие префикс *wsp* (см. в *этиде 2* рис. 2.21):

- wspHPT* — удельная энтальпия (*h*) воды и водяного пара в зависимости от давления (*p*) и температуры (*T*);
- wspSPT* — удельная энтропия (*s*) воды и водяного пара в зависимости от давления (*p*) и температуры (*T*);
- wspTSP* — температура (*T*) воды на линии насыщения (*s* — здесь *saturation*) в зависимости от давления (*p*);
- wspXTS* — степень сухости (*x*) влажного пара в зависимости от температуры (*T*) и удельной энтропии (*s*);
- wspHSWT* — удельная энтальпия (*h*) на линии насыщения (*s*) воды (*w*) в зависимости от температуры;
- wspSSWT* — удельная энтропия (*h*) на линии насыщения (*s*) воды (*w*) в зависимости от температуры;
- wspTPS* — температура (*T*) в зависимости от давления (*p*) и удельной энтропии (*s*).

Имея под рукой вышеперечисленные функции, несложно рассчитать удельную энтальпию воды и водяного (h) пара в различных точках паротурбинного цикла, удельную работу турбины (l_t — t , turbine), удельную работу, затрачиваемую на привод питательного насоса (l_p — p , pump), удельную теплоту, получаемую в паровом котле (q_b — b , boiler) и, наконец, искомое значение термического КПД (см. конец рис. 4.2).

Расчет, показанный на рис. 4.2, может работать, только если компьютер пользователя подключен к Интернету. Если же это не так, то ссылка, показанная на рис. 4.2, станет красной и из нее "выпадет" сообщение об ошибке (рис. 4.3).

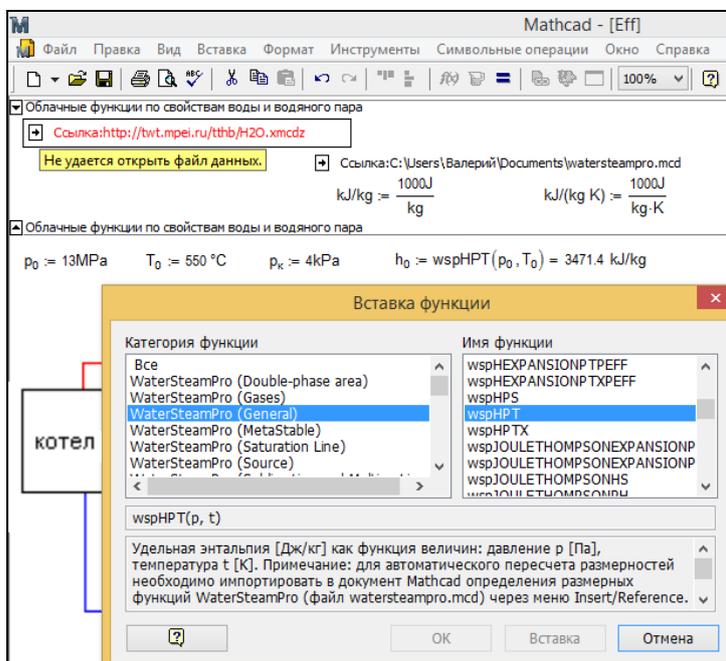


Рис. 4.3. Расчет КПД паротурбинного цикла с использованием функций пакета WaterSteamPro

Исправить аварийную ситуацию, зафиксированную на рис. 4.3, можно двумя путями.

Во-первых, можно подгрузить на компьютер пакет WaterSteamPro, о котором мы уже упоминали в *этой* 2 (см. рис. 2.17 и 2.18). Необходимо только вставить в расчет ссылку на файл watersteampro.xmcd, поставляемый вместе с пакетом WaterSteamPro. (На рис. 4.3 под этой ссылкой расположена пара операторов: задание

Добавлено примечание (P1): Ссылки на рисунки верные? Может, 2.21 и 2.22?

единиц измерения удельных энтальпий (kJ/kg) и энтропий ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$). Ввод таких сложных имен переменных ведется через аккорд $\langle\text{Shift}\rangle+\langle\text{Ctrl}\rangle+\langle\text{k}\rangle$. (Кстати, почему теплотехники работают с килоджоулями на килограмм, а не с джоулями на грамм? Так было бы короче. Но привычка — вторая натура!)

Если щелкнуть мышью два раза по работающей ссылке на "облачные" функции, показанной на рис. 4.2 (на рис. 4.3 она не работает, т. к. нет связи с Интернетом), то будет скачан и открыт в среде Mathcad документ, начало и средняя часть которого показаны на рис. 4.4.

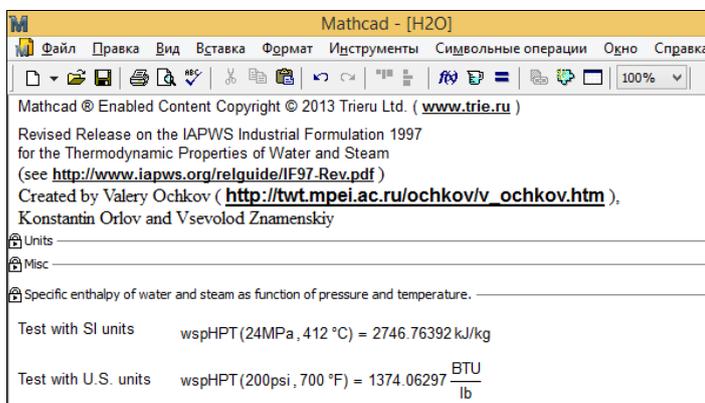


Рис. 4.4. "Облачный" Mathcad-документ с функциями по свойствам воды и водяного пара

На этом рисунке представлен вызов функции wspHPT , возвращающей удельную энтальпию воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры. Сама эта функция скрыта и защищена паролем в отдельной области. Эта и другие функции созданы по рекомендациям Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.org), в которой, как уже было отмечено в *этой* 1, работают авторы этой книги.

Скачанный файл H2O.xmcdz можно сохранить на своем компьютере или в своей локальной сети и делать на него ссылку при теплотехнических расчетах в среде Mathcad, как это показано на рис. 4.5.

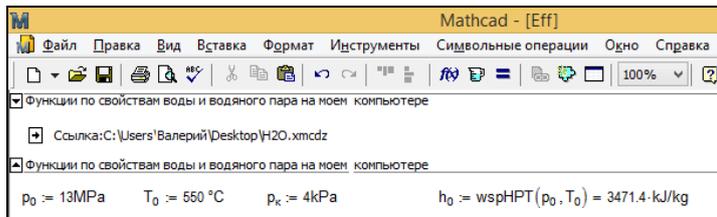


Рис. 4.5. Ссылка на Mathcad-документ, хранимый на рабочем столе

Расчет, показанный на рис. 4.2, несложно превратить в функцию, возвращающую термический КПД η_c простейшего идеального паротурбинного цикла в зависимости от давления p_0 и температуры T_0 острого пара и давления в конденсаторе p_k (рис. 4.6).

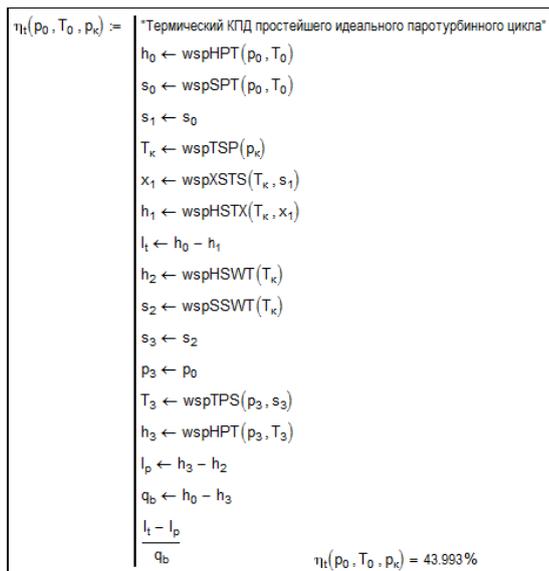


Рис. 4.6. Функция пользователя в среде Mathcad

Решение на рис. 4.2, где выведены "на печать" все промежуточные результаты, можно считать отладочным вариантом решения на рис. 4.6. Еще один момент. По функции, показанной на рис. 4.6, очень легко построить графические зависимости, чего не скажешь о расчете, представленном на рис. 4.2.

Если Mathcad-документ с функцией, показанной на рис. 4.6, поместить, например, на рабочий стол компьютера, то на этот файл можно также делать ссылки (рис. 4.7).

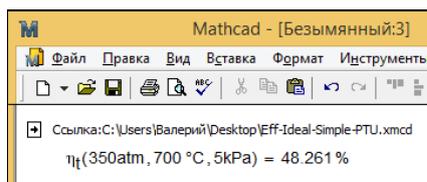


Рис. 4.7. Расчет КПД паротурбинного цикла через ссылку на функцию пользователя

На этом рисунке не показана ссылка на файл H2O.xmcdz — она хранится в файле с именем Eff-Ideal-Simple-PTU.xmcdz: ссылка, так сказать, на ссылку.

Технология создания функций пользователя и сохранения их на компьютере, в локальной компьютерной сети или в Интернете — это эффективная методика решения инженерных задач, включая теплотехнические, и мы уже упоминали об этом в *этиде 1*. Имея под рукой такие функции, несложно в среде Mathcad строить и диаграммы теплотехнических циклов [1].

Многие инженеры и научно-технические работники проводят расчеты в среде "бухгалтерского" табличного процессора Excel, который упоминался во *введении*. На рис. 4.8 показана таблица Excel, к которой по технологии DLL прикреплены функции пакета WaterSteamPro. Их список можно видеть в диалоговом окне Excel вставки функций, показанном на этом же рисунке (см. также рис. 4.3 с подобным списком). Это позволило рассчитать КПД паротурбинного цикла по формулам, показанным на рис. 4.2. Исходные данные введены в ячейки **B2**, **B3** и **B4**. Остальные ячейки столбца **B** заполнены формулами, по которым ведутся расчеты. Эти формулы показаны на рис. 4.9. Такой показ становится возможным после выполнения команды **Показать формулы** на вкладке **Формулы**.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	p_0	13 MPa		13000000 Pa								
3	T_0	550 °C		823,15 K								
4	p_k	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_k	302,11 K		28,96 °C								
8	x_k	0,76838 -		76,84 %								
9	h_1	1990347 J/kg		1990,35 kJ/kg								
10	h_2	1481043 J/kg		1481,0 kJ/kg								
11	h_3	121404 J/kg		121,40 kJ/kg								
12	s_2	422,448 J/(kg K)		0,42245 kJ/(kg K)								
13	p_2	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_2	134415,91 J/kg		134,4 kJ/kg								
17	h_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 %								

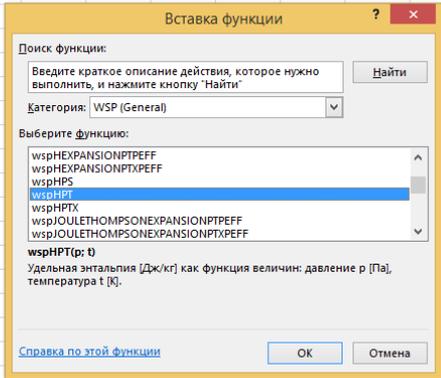


Рис. 4.8. Расчет КПД паротурбинного цикла в среде Excel с использованием функций пакета WaterSteamPro

Сравнивая рис. 4.2 (Mathcad), 4.8 и 4.9 (Excel), можно еще раз убедиться в том, что работа с табличным процессором намного труднее и запутаннее, чем работа с инженерным калькулятором Mathcad. В среде Mathcad, 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 Mathcad 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. 4.2, и в ячейке **B19** на рис. 4.9. 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_k	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_k	=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. 4.9. 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. 4.10 показан Excel-расчет, отображенный на рис. 4.2 (Mathcad), 4.8 и 4.9 (Excel), с тем отличием, что в формулах столбца **B** фигурируют не координаты ячеек таблицы (**B5**, **D2** и т. д.), а имена этих ячеек (h_0 , p_0 и т. д.), которые им были заранее присвоены через команду **Имя диапазона**. Так ячейка таблицы **B5** в расчете, показанном на рис. 4.10, имеет имя h_0 (нижний индекс h_0 тут недопустим) и хранит удельную энтальпию водяного пара, поступающего в турбину. Этот параметр рассчитывается с помощью функции $wspHPT(p_0; T_0)$, аргументы которой, хранятся в ячейках **D2** и **D3**, с именами p_0 и T_0 соответственно. На рис. 4.10 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_k	4	kPa	$=B4*1000$	Pa
5	h_0	<u>$=wspHPT(p_0;T_0)$</u>	J/(kg K)	$=B5/1000$	kJ/kg
6	s_0	$=wspSPT(p_0;T_0)$	J/(kg K)	$=B6/1000$	kJ/(kg K)
7	T_k	$=wspTSP(p_k)$	K	$=B7-273,15$	°C
8	x_1	$=wspXSTS(T_k;s_0)$	-	$=B8*100$	%
9	h_1	$=wspHSTX(T_k;x1_)$	J/kg	$=B9/1000$	kJ/kg
10	l_1	$=h_0-h1_$	J/kg	$=B10/1000$	kJ/kg
11	h_2	$=wspHSWT(T_k)$	J/kg	$=B11/1000$	kJ/kg
12	s_2	$=wspSSWT(T_k)$	J/(kg K)	$=B12/1000$	kJ/(kg K)
13	p_3	$=p_0$	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	$=(l_t-l_p)/q_b$	-	$=B19*100$	%

Рис. 4.10. Расчет КПД паротурбинного цикла в среде Excel: работа с именованными ячейками

К некоторым именам ячеек таблицы, показанной на рис. 4.10, 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**).

На рис. 4.2 показана схема простейшей 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 Mathcad. 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. Автором книги разработана специализированная программа для автоматизации этой работы [2]. Ознакомиться с демонстрационной версией этой программы можно на сайте <http://twm.mpei.ac.ru/CALCULON>.

На рис. 4.11 показано окно программы проверки знания схем с закруженной в нее эталонной схемой (нижняя часть) и схемой, нарисованной пользователем (верхняя часть). Прямая ссылка на этот пример — http://twm.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://twf.mpei.ac.ru/twtshell/index.htm>) будет автоматически предложена на сайте.

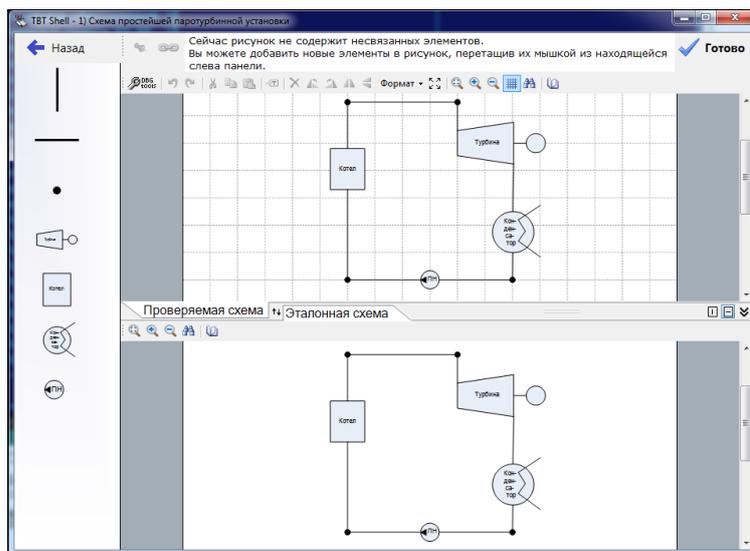


Рис. 4.11. Схема простейшей паротурбинной установки в программе автоматизированной проверки знания схем

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. 4.12 показан результат работы программы в том случае, когда пользователь забыл нарисовать в схеме питательный насос.

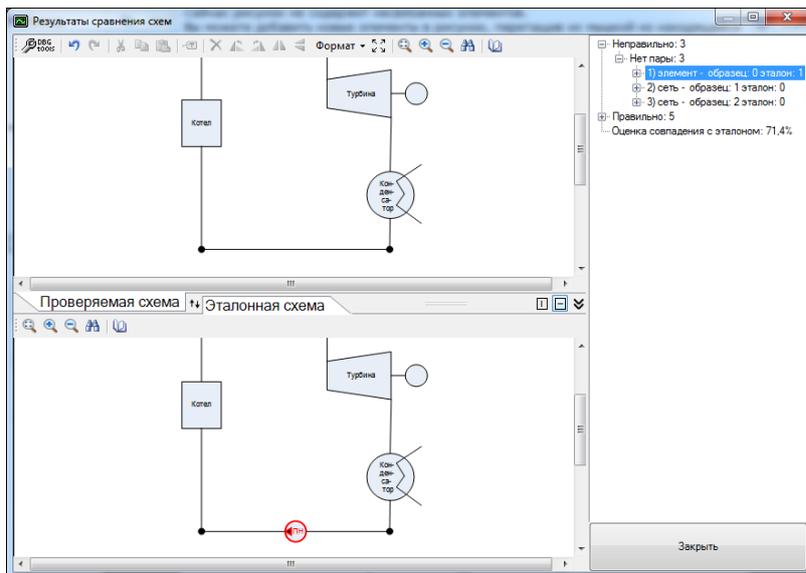


Рис. 4.12. Сравнение схемы паротурбинного блока с его эталоном

Алгоритм сравнения двух схем (названный автором 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 [3]. Семейство алгоритмов Gemini (Близнецы), основанных на итерационном вычислении и сравнении хеш-кодов для отдельных элементов и "сетей" графа, широко используется в электронной промышленности 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 авторской "Электронной энциклопедии энергетики" (www.trie.ru), в которой можно найти много теплотехнических схем с мультимедийными "прибамбасами". Одна из таких схем показана на рис. 4.13.

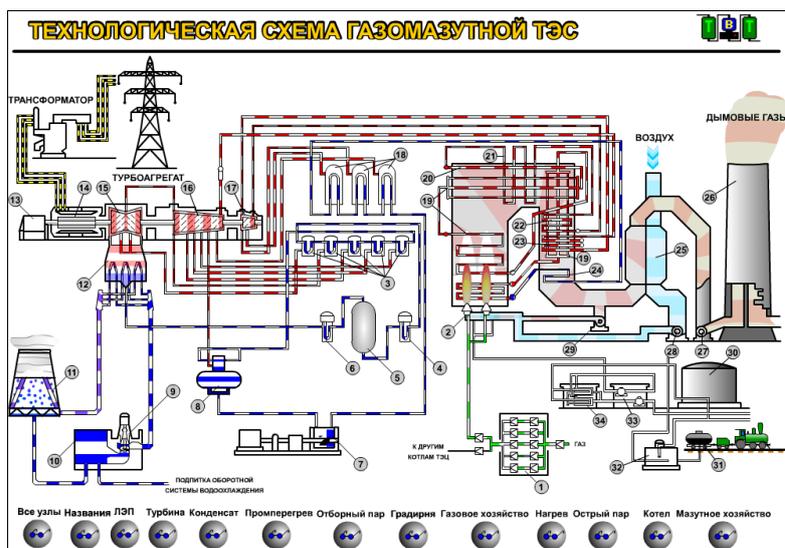


Рис. 4.13. Одна из мультимедийных теплотехнических схем "Электронной энциклопедии энергетики"

Нажимая круглые кнопки, показанные в нижней части рис. 4.13, можно выделять отдельные участки схемы электростанции. Кроме того, от данной мультимедийной схемы можно быстро переходить к соответствующим описаниям в Энциклопедии.

Литература

1. Очков В. Ф. Построение диаграмм термодинамических циклов: шаг за шагом // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2009. — № 2, 3. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/ThermCycleMCS-Create.html>.
2. Очков А. В. Компьютерная программа по изучению и автоматизированной проверке знания технологических схем // Тезисы докладов Международной научно-методической конференции "Информатизация инженерного образования Инфорно-2014". 15–16 апреля 2014. URL: <http://inforino2014.mpei.ru>.
3. Ebeling C. Gemini II: A Second Generation Layout Validation Program // Proceedings of ICCAD 1988.

4. Очков В. Ф. Создание "Электронной энциклопедии энергетики" — информационный вклад в производственные и учебные процессы // Теплоэнергетика. — 2007. — № 7. URL: http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/TE_7_2007/index.html.