

Информационное бюро  
Энергопресс

10'2008

# Новое в российской электроэнергетике



# НОВОЕ В РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

## Ежемесячный электронный журнал

### № 10 октябрь 2008 г.

#### Объединенный редакционный совет издательств ООО «Стрижев-Центр» и ООО «Информбюро «Энерго-пресс»

**Сопредседатель – Паули Виктор Карлович**, директор филиала ОАО «Инженерный центр ЕЭС» — фирмы «ОРГРЭС», главный редактор журнала «Охрана труда за рубежом»

**Сопредседатель – Серебрянников Сергей Владимирович**, ректор Московского энергетического института (Технического университета)

#### Члены Совета

**Шульгинов Николай Григорьевич**, первый заместитель председателя Правления ОАО «СО ЕЭС»

**Зубакин Василий Александрович**, и.о. председателя Правления ОАО «РусГидро»

**Загретдинов Ильяс Шамилевич**, заместитель генерального директора – технический директор ОАО «Группа Е-4», главный редактор газеты «Энерго-пресс»

**Громогласов Александр Аркадьевич**, главный редактор издательств «Стрижев-Центр» и «Энерго-пресс»

**Воронов Виктор Николаевич**, заведующий кафедрой Московского энергетического института (Техни-

ческого университета), главный редактор журнала «Новое в российской электроэнергетике»

**Росляков Павел Васильевич**, проректор Московского энергетического института (Технического университета)

**Пильщиков Аркадий Павлович**, доцент Московского энергетического института (Технического университета)

**Громогласов Сергей Александрович**, заместитель директора издательства «Энерго-пресс» – ответственный секретарь

#### Редколлегия

Главный редактор –  
**Воронов В.Н., д.т.н.**  
Первый заместитель главного редактора –  
**Зорин В.М., д.т.н.**  
Заместитель главного редактора –  
**Громогласов А.А., д.т.н.**  
Ответственный секретарь –  
**Галтеева Е.Ф., к.т.н.**

#### Члены редколлегии:

**Аракелян Э.К., д.т.н.**  
**Васин В.П., д.т.н.**  
**Верещагин И.П., д.т.н.**  
**Жуков Ю.И., к.т.н.**  
**Загретдинов И.Ш.**  
**Лавыгин В.М., к.т.н.**  
**Львов М.Ю., к.т.н.**  
**Мисриханов М.Ш., д.т.н.**  
**Паули В.К., д.т.н.**  
**Пильщиков А.П., к.т.н.**  
**Росляков П.В., д.т.н.**  
**Рыженков В.А., д.т.н.**  
**Рябов М.И., к.т.н.**  
**Седлов А.С., д.т.н.**  
**Соляков В.К., к.т.н.**  
**Томаров Г.В., д.т.н.**

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций, Свидетельство о регистрации: Эл № 77-2655 от 17.04.2000.

#### Содержание

#### Стр.

О подписке на электронные журналы «НОВОЕ В РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ» и «ОХРАНА ТРУДА ЗА РУБЕЖОМ»

3

#### Общие вопросы электроэнергетики

Сетевые расчеты процессов и циклов теплоэнергетических установок. Д.т.н. В.Ф. Очков, д.т.н. А.А. Александров, к.т.н. К.А. Орлов, к.т.н. В.А. Волощук, инж. А.В. Очков (МЭИ-ТУ – ООО «Триеру» – Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина)

5

#### В помощь производству

Математическая модель распределения примесей по тракту энергоблока для систем химико-технологического мониторинга. Д.т.н. В.Н. Воронов, инж. О.В. Егошина (МЭИ – ТУ)

28

Экономическая эффективность тепловизионного контроля электрооборудования подстанций и промышленных предприятий. К.т.н. А.Ю. Хренников (ОАО «ФСК ЕЭС»), инж. М.Г. Сидоренко (филиал ОАО «ФСК ЕЭС») – ТОО МЭС Северо-Запада)

34

О повышении эффективности управления защитным резистором в режиме замыкания на землю. К.т.н. Е.Н. Рыжкова (Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, Казахстан)

44

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней (Перечень ВАК).

## Общие вопросы электроэнергетики

### СЕТЕВЫЕ РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ И ЦИКЛОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Д.т.н. В.Ф. Очков, д.т.н. А.А. Александров, к.т.н. К.А. Орлов,  
к.т.н. В.А. Волощук, инж. А.В. Очков  
(МЭИ-ТУ – ООО «Триеру» – Национальный университет водного хозяйства  
и природопользования, г. Ровно, Украина)**

После публикации информации о сайтах Интернета<sup>1</sup> [1–6], предназначенных для расчета теплофизических свойств воды, водяного пара, газовых смесей (<http://twm.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHVB>) и материалов, используемых в теплоэнергетических и промтеплоэнергетических установках (<http://twm.mpei.ac.ru/ТТНВ>), а также для расчетов и построения диаграмм и циклов теплоэнергетических установок (<http://twm.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html>), у читателей журнала – посетителей сайтов возник ряд вопросов по приемам работы с сайтами, по обходу возможных типичных ошибок при обращении к ним. Данная статья призвана ответить на эти вопросы.

Сначала о возможных приемах работы со страницами сайтов.

На рис. 1 показано решение классической задачи термодинамики по определению термического КПД цикла Ренкина с заданными параметрами свежего пара (13 МПа<sup>2</sup>, 540 °С) и давлением в конденсаторе (5 кПа).

На *T-s* диаграмме, показанной на рис. 1, отображен цикл Ренкина на перегретом паре с докритическим давлением. Давление, естественно, может быть и сверхкритическим. В этом случае изобара, отображающая процесс парообразования в котле, не будет пересекать линию насыщения воды. Ниже (на рис. 18) будет показана страница сайта, с помощью которой можно построить реальную диаграмму цикла Ренкина, вид которой зависит от исходных данных.

Решение данной задачи требует знания термодинамических свойств воды и водяного пара. В верхней половине рис. 1 отображена страница одного из справочников по свойствам воды и водяного пара [7–9]. Справочник, из которого взята таблица, является укороченной версией справочника [9]. Преимущество этого справочника в том, что он существует в электронном виде и его можно открыть в Интернете по адресу [http://catalog.asme.org/books/PrintBook/2006\\_Steam\\_TablesCompact.cfm](http://catalog.asme.org/books/PrintBook/2006_Steam_TablesCompact.cfm), чем мы и воспользовались. Но справочник этот – краткий (compact edition), что выражается, в частности, в значительном шаге табулирования. Из-за этого нельзя непосредственно перенести данные из справочника в нашу задачу о термическом КПД цикла Ренкина, необходима интерполяция в данном случае по температуре, что и отображено в середине рис. 1 (линейная интерполяция). Но мы пока полученными числами (3444.5 и 6.575) не воспользуемся, а покажем, как данную задачу можно решить с помощью современных информационных технологий.

<sup>1</sup> Эти расчетные сайты создавались на базе программ Mathcad и Mathcad Calculation Server (MCS). В будущем расчеты, созданные в среде Mathcad, будут публиковаться в Интернете и интранетах не с помощью MCS, а с помощью программы Windchill.

<sup>2</sup> На сайте WaterSteamPro ([www.wsp.ru](http://www.wsp.ru)) используется международное написание единиц измерения – не МПа, а МРa, не кДж/кг, а kJ/kg (или J/g для экономии места и трафика Интернета) и т.д. Это, наряду с двуязычными комментариями (русский и английский), расширяет круг посетителей сайта. Кроме того, предусмотрены страницы сайта, имя которых включает фрагмент -US, где используются британская система единиц – не МРa, а psi, не kJ/kg, а Btu/lb и т.д. Так, например, сайт с именем WSP/HPT-US возвращает удельную энтальпию воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры. При этом исходные величины должны иметь значения давления, выраженные в psi (фунт силы на квадратный дюйм), и температуры – в °F (температурная шкала Фаренгейта). Ответ же выдается единицами Btu/lb (британская тепловая единица, деленная на фунт). Аналогичный сайт с адресом WSP/HPT-SI оперирует уже мегапаскалями (МРa), температурной шкалой Цельсия (°C) и килоджоулями на килограмм (kJ/kg). Замена буквы Н на букву S в адресе вызываемой страницы Интернета позволяет рассчитывать не удельную энтальпию (H), а удельную энтропию (S) и т.д.

**Table 6. Superheated Steam – SI Units**

Pressure		Temperature—Degrees Celsius									
MPa	(Sat. T)	300	325	350	375	400	450	500	550	600	650
7.0 (285.83)	v	0.0295	0.0326	0.0353	0.0377	0.0400	0.0442	0.0482	0.0520	0.0557	0.0593
	h	2839.8	2935.5	3016.8	3090.4	3159.1	3288.2	3411.3	3531.5	3650.6	3769.4
	s	5.9335	6.0970	6.2303	6.3460	6.4501	6.6351	6.7997	6.9505	7.0909	7.2232
7.5 (290.54)	v	0.0267	0.0298	0.0325	0.0348	0.0370	0.0410	0.0448	0.0483	0.0518	0.0552
	h	2814.3	2917.4	3002.7	3078.8	3149.3	3280.7	3405.3	3526.7	3646.5	3765.9
	s	5.8644	6.0407	6.1805	6.3002	6.4070	6.5954	6.7620	6.9141	7.0555	7.1885
12.0 (324.68)	v		0.0143	0.0172	0.0193	0.0211	0.0242	0.0268	0.0293	0.0317	0.0339
	h		2688.4	2848.0	2959.5	3051.9	3209.8	3350.0	3481.7	3609.0	3734.1
	s		5.4988	5.7607	5.9362	6.0762	6.3027	6.4902	6.6553	6.8055	6.9448
13.0 (330.86)	v			0.0151	0.0173	0.0190	0.0220	0.0245	0.0269	0.0291	0.0312
	h			2803.6	2928.3	3027.6	3192.9	3337.1	3471.4	3600.5	3726.9
	s			5.6635	5.8600	6.0104	6.2475	6.4404	6.6087	6.7610	6.9018
14.0 (336.67)	v			0.0132	0.0155	0.0172	0.0201	0.0225	0.0248	0.0268	0.0288
	h			2752.9	2894.9	3002.2	3175.6	3324.1	3461.0	3591.9	3719.7
	s			5.5595	5.7832	5.9457	6.1945	6.3931	6.5648	6.7192	6.8615
18.0 (356.99)	v				0.0100	0.0119	0.0147	0.0168	0.0187	0.0204	0.0221
	h				2726.9	2886.3	3101.7	3269.7	3418.3	3557.0	3690.4
	s				5.4465	5.6881	5.9973	6.2222	6.4085	6.5722	6.7208

v = specific volume, m<sup>3</sup>/kg    h = enthalpy, kJ/kg    s = entropy, kJ/(kg•K)

ASME Steam Tables – COMPACT EDITION • 23

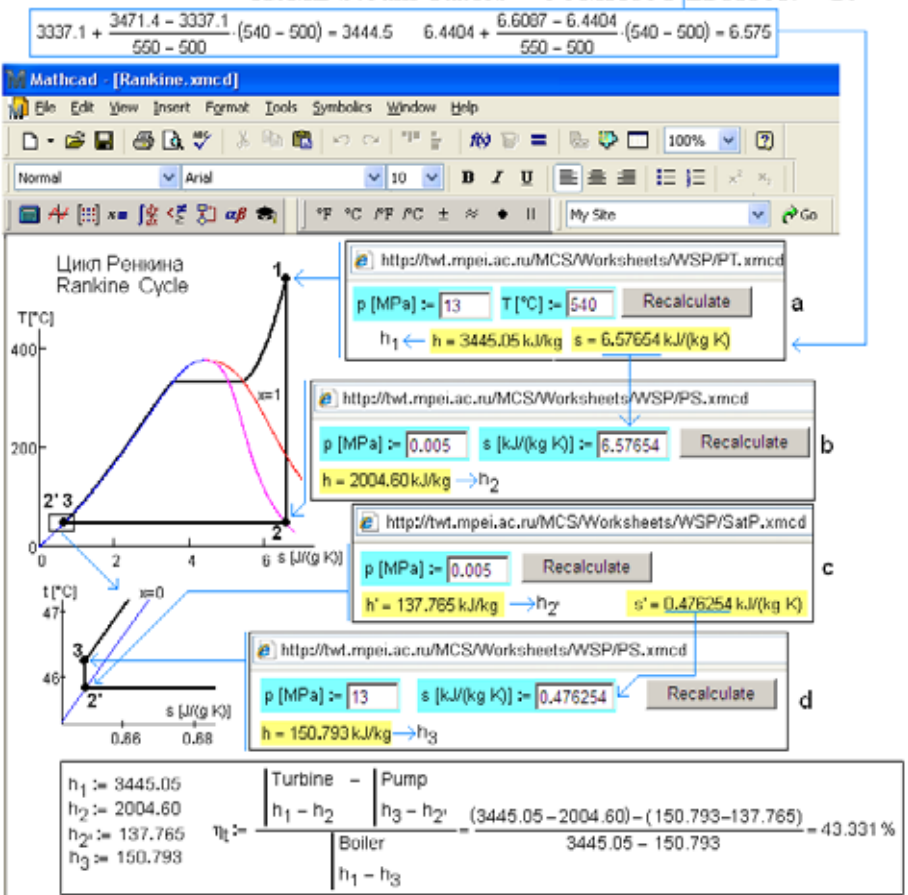


Рис. 1. Расчет термического КПД цикла Ренкина с обращением к таблицам и сайтам Интернета (<http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/PT.xmcd>)

В нижней части рис. 1 показано само решение задачи о КПД цикла Ренкина. Задача решается с помощью инженерного калькулятора Mathcad [10] на компьютере, имеющем выход в Интернет, – на рабочем листе открыты четыре страницы сайта WaterSteamPro.

Страница сайта с адресом [WSP/PT](#)<sup>3</sup> (см. окно **a** на рис. 1) позволяет определить теплофизические свойства воды и водяного пара<sup>4</sup> в зависимости от давления ( $p$ ) и температуры ( $T$ ). Температура и давление – это традиционная пара исходных величин, заложенная во все опубликованные таблицы для однофазной области воды и водяного пара [7–9]. В отличие от этих справочников страница Интернета [WSP/PT](#) позволяет определять параметры воды и водяного пара при любых значениях исходных величин  $p$  и  $T$ , а не только при определенных, дискретно заданных<sup>5</sup>.

Сайт WaterSteamPro содержит страницы, где исходными величинами являются разные сочетания параметров. В частности, страница сайта с адресом [WSP/PS](#) (см. окно **b** на рис. 1), как явствует из адреса, позволяет рассчитывать теплофизические свойства воды и водяного пара в зависимости от давления ( $p$ ) и удельной энтропии ( $s$ ) – это одна из обратных задач<sup>6</sup> формуляции IAPWS-IF97. Данная страница сайта позволяет рассчитать энтальпию пара в конце процесса расширения в турбине (точка 2 на  $T$ - $s$ -диаграмме, показанной на рис. 1). Принимается, что процесс расширения пара в турбине обратимый ( $s = \text{const}$ ), значение удельной энтропии из окна **a** копируется в окно **b**. Точка 2' на  $T$ - $s$ -диаграмме – это вода на линии насыщения при давлении в конденсаторе. Страница сайта с именем [WSP/SatP](#) (окно **c** на рис. 1) поможет решить эту вспомогательную задачу – рассчитает параметры воды и водяного пара на линии насыщения в зависимости от давления<sup>7</sup>. Еще одно обращение к уже описанной странице сайта с адресом [WSP/PS](#) (окно **d** на рис. 1) поможет определить энтальпию воды на выходе из питательного насоса (точка 3 на  $T$ - $s$ -диаграмме). Считается также, что процесс сжатия (повышения давления воды) в насосе обратимый, а неизменяющееся значение удельной энтропии воды в насосе ( $s = \text{const}$ ) определяется в окне **c** (см. рис. 1). После таких обращений к сайту Интернета мы имеем значение удельной энтальпии воды и водяного пара во всех четырех точках цикла Ренкина и можем рассчитать его термический КПД – см. нижнюю часть рис. 1.

Задача, решение которой показано на рис. 1, – простейшая в ряду задач, с которыми приходится сталкиваться инженерам-теплоэнергетикам и студентам технических вузов. Но и при решении в той или иной программной среде более сложных задач их тоже можно «окружить» страницами сайта WaterSteamPro так, как это показано на рис. 1, чтобы снабжать инженера-теплоэнергетика нужными для расчета данными без установки на компьютер каких-либо специальных программ для расчета свойств воды и водяного пара. Достаточно только иметь выход в Интернет.

Какие ошибки («недопонимания») могут возникать при общении со страницами сайта WaterSteamPro?

Во-первых, посетитель сайта может ввести не точку, а запятую в качестве разделителя целой и дробной части десятичного числа. Разработчики сайта WaterSteamPro (авторы данной статьи) сначала хотели предусмотреть использование тут запятой наряду с точкой, но потом от этой идеи отка-

<sup>3</sup> Здесь и далее будут указываться только переменные составляющие адресов. Префикс <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/> и постфикс [.xmcd](#) будут опускаться. Полное имя описываемых страниц сайта прописано в заголовках рисунков – в строке ввода адреса сайтов в среде обозревателя (браузера) Интернета.

<sup>4</sup>  $h$  – удельная энтальпия,  $s$  – удельная энтропия; другие, не показанные на рис. 1:  $v$  – удельный объем,  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость,  $c_v$  – удельная изохорная теплоемкость,  $u$  – удельная внутренняя энергия,  $\mu$  (греческая «мю») – динамическая вязкость,  $\nu$  (греческая «ню») – кинематическая вязкость,  $\kappa$  (греческая «каппа») – показатель изоэнтропы,  $\text{Pr}$  – число Прандтля,  $\lambda$  (греческая «лямбда») – теплопроводность и  $W_s$  – скорость звука (см. ниже рис. 2 и 4).

<sup>5</sup> В справочниках [7–9] шаг изменения дискретных значений давления и температуры стараются делать небольшим. Из-за этого справочники получаются довольно толстыми и неудобными к использованию. В других же справочниках («карманных») и учебниках публикуют укороченные варианты таблиц свойств воды и водяного пара с довольно большим шагом изменения давления и температуры. Но это, повторяем, заставляет неоправданно часто прибегать к интерполяции, что, естественно, снижает точность расчета.

<sup>6</sup> Прямая задача – расчет удельной энтропии по температуре и давлению.

<sup>7</sup> Страница с адресом [WSP/SatT](#) поможет решить аналогичную задачу, где исходной величиной будет не давление, а температура.

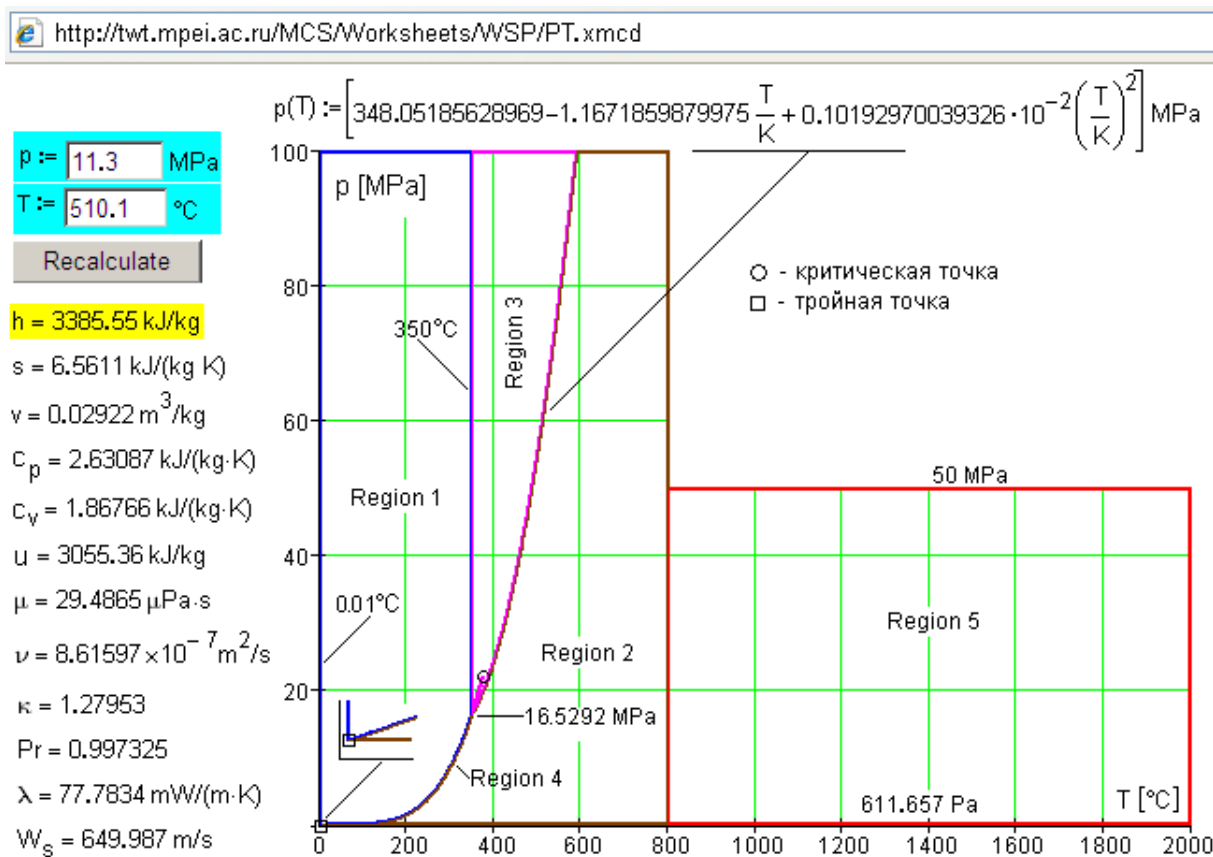


Рис. 2. Сайт с отображением областей формуляции IAPWS-IF97 в  $p$ - $T$ -координатах (<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/PH.xmcd>)

зались. Желательно следовать мировой тенденции и отказываться от запятой в дробных десятичных числах. Правда, возникает проблема: во всех отечественных изданных и готовящихся к публикации «бумажных» монографиях, справочниках, учебниках и статьях по-прежнему в десятичных числах используется запятая, а не точка. И с этой традицией довольно трудно расстаться<sup>8</sup>.

Другой стандарт, диктуемый компьютерами, связан с вводом чисел в экспоненциальной форме. Тут необходимо использовать латинскую (не русскую!) букву E, строчную или прописную. Если, например, в поле ввода с пометкой MPa<sup>9</sup> необходимо занести значение давления 5 kPa, то можно ввести 0.005 (см. окно **b** на рис. 1) или 5E-3 (5e-3).

Вторая ошибка (возможная при использовании как интернетовских, так и «бумажных» таблиц) состоит в том, что посетитель сайта неправильно считает ответ, исказит число при его «ручном» переносе со страницы сайта в другую программную среду или просто на лист бумаги для дальнейшей работы с данной величиной. Дело в том, что числа, выдаваемые сайтом WaterSteamPro, это не тексты, разделенные на отдельные знаки (цифры), а картинки, которые, конечно, можно скопировать в другой документ<sup>10</sup>, но «считывать» их допустимо только с использованием специальных средств (программы FineReader, например) или «вручную» – видя ответ в одном месте, набирать

<sup>8</sup> Такая «ломка» в настоящее время имеет место, например, в Германии. Один из авторов справочника [8], даря экземпляр этого справочника одному из авторов данной статьи, просил сообщить, если в данном справочнике ошибочно встретится «запятая вместо положенной точки».

<sup>9</sup> На сайте WaterSteamPro есть страницы, где ввод значений дополняется выбором единиц давления, температуры и других физических величин. Есть страницы с переводом теплофизических величин из одних единиц в другие. Килопаскали несложно перевести в мегапаскалы, чего не скажешь о переводе, например, джоулей на килограмм в Btu на фунт!

<sup>10</sup> Для этого достаточно подвести курсор мышки компьютера к интересующему ответу (к записи  $h = 3445.05$  kJ/kg, например, см. окно **a** на рис. 1), нажать правую кнопку мышки и выбрать в выпавшем списке команд команду Copy/Копировать.

его на клавиатуре в другом месте (в другом окошке интернетовской страницы – см., например, окна **a** и **b** на рис. 1, где рассчитанное значение удельной энтропии переносится как исходная величина в окошко ввода другой страницы сайта). «Полноценное и безошибочное»<sup>11</sup> считывание ответа возможно при установке пакета WaterSteamPro на компьютер пользователя, о чем мы поговорим ниже.

Третья ошибка обусловлена тем, что посетитель сайта, вольно или невольно, выходит за пределы допустимых значений исходных величин. В этом случае, как и в случае ввода запятой вместо точки, ответ просто не будет выдан. Так что это можно не считать ошибкой. Тут главное понять, в чем состоит неправильность ввода, и исправить его. Для этого на страницах сайта есть ссылки на картинки с отображением областей формуляции IAPWS-IF97. Для пары исходных данных «давление – температура» эти области укладываются в два прямоугольника – см. рис. 2. Для других сочетаний исходных данных конфигурация областей более сложная.

Страница сайта с адресом WSP/RegionAllAxes позволяет перестраивать границы областей формуляции IAPWS-IF97 в других системах координат: температура – энтропия (первая диаграмма на рис. 3), коэффициент сжимаемости<sup>12</sup> – плотность (вторая диаграмма) и т.д. При этом посетителю сайта предоставляется возможность увеличивать те или иные участки диаграмм, что также отображено на рис. 3 (см. увеличенные области вблизи тройной точки  $T$ - $s$ -диаграммы и при высоких температурах на  $Z$ - $p$ -диаграмме).

При обращении к странице сайта с адресом WSP/PH (рис. 4) ведется расчет свойств воды и водяного пара в зависимости от давления ( $p$ ) и удельной энтальпии ( $h$ ). При таком сочетании исходных параметров «раскрывается» область влажного пара, куда можно попасть при определенных сочетаниях значений  $p$  и  $h$ , что и отображено на рис. 4: слева от  $p$ - $h$ -диаграммы отображена расчетная ситуация по однофазному состоянию (степень сухости  $x = "-"$ ), а справа – по двухфазному состоянию (влажный пар, значение  $x$  может изменяться от 0 до 1). Во втором («правом», двухфазном) случае выдаются рассчитанные значения только по  $T$ ,  $s$ ,  $v$  и  $u$ . По остальным величинам ( $c_p$ ,  $c_v$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\kappa$ ,  $\text{Pr}$ ,  $\lambda$  и  $W_s$ ) значения не выдаются, т.к. это выходит за рамки поставленной задачи. Аналогичный алгоритм заложен в сетевой расчет при исходных величинах «давление – удельная энтропия» (см. окно **b** на рис. 1).

На рис. 5 отображен более сложный случай сочетания исходных величин расчета, когда в качестве исходных величин выступают температура и удельная энтальпия.

На рис. 5 показана расчетная ситуация с двумя возможными ответами при некоторых исходных данных, например при  $T = 80$  °C и  $h = 400$  kJ/kg. При таких параметрах могут находиться и влажный пар ( $p = 0.047$  МПа), и вода в однофазной области ( $p = 81.839$  МПа). Обойти эту двойственность помогает «галочка» Double Phase (двухфазная среда), вводящая в сетевой расчет альтернативу: расчет ведется либо в зоне влажного пара, где давление и температура связаны друг с другом, либо в однофазной зоне, где методом последовательных приближений решается обратная задача определения давления по заданным значениям температуры и удельной энтальпии.

На рис. 2, 3, 4 и 5 показаны не только границы допустимых значений исходных величин при расчете свойств воды и водяного пара<sup>13</sup>, но и области (Regions) формуляции IAPWS-IF97: Regions 1 – вода, Regions 2 – перегретый пар, Regions 3 – околос критическая область, Regions 4 – линия насыщения и Regions 5 – пар при высокой температуре. Такое деление на области сделано для оптимизации процесса разработки формул IAPWS-IF97<sup>14</sup>. Мы же прорисовываем эти области для

<sup>11</sup> Ошибка тут заключается и в том, что ответ округляется. На рис. 1 показано, что отмеченные интернетовские страницы выдают шесть значащих цифр в ответах. Но посетитель сайта может менять это умолчание через поле digits, не показанное на рис. 1.

<sup>12</sup>  $Z$  – величина, показывающая, насколько вода и водяной пар (или любая другая среда) при данных параметрах отличаются от идеального газа, у которого  $Z = 1$ . На нашей диаграмме (нижняя часть рис. 3) видно, что водяной пар с высокой температурой и низким давлением может иметь  $Z > 1$ .

<sup>13</sup> Подчеркиваем – границы, а не сами области. Области могут несколько выходить за отмеченные границы.

<sup>14</sup> Формуляция IAPWS-IF95 (см. страницу сайта WSP/iapwsif95) не имеет деления на области, но там расчеты ведутся по более сложным формулам.

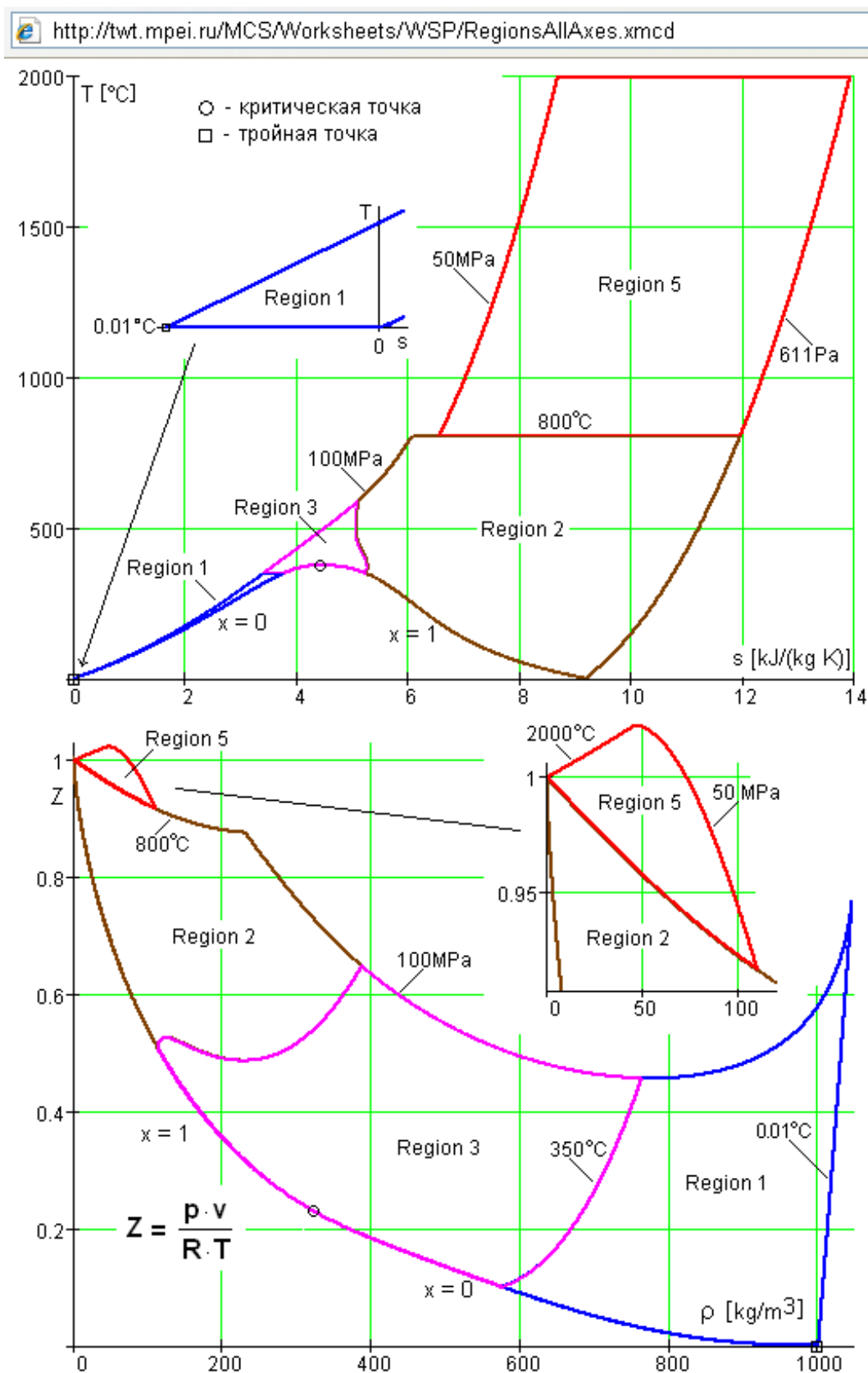


Рис. 3. Сайт с отображением областей формуляции IAPWS-IF97 в произвольных координатах (<http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/RegionsAllAxes.xmcd>)



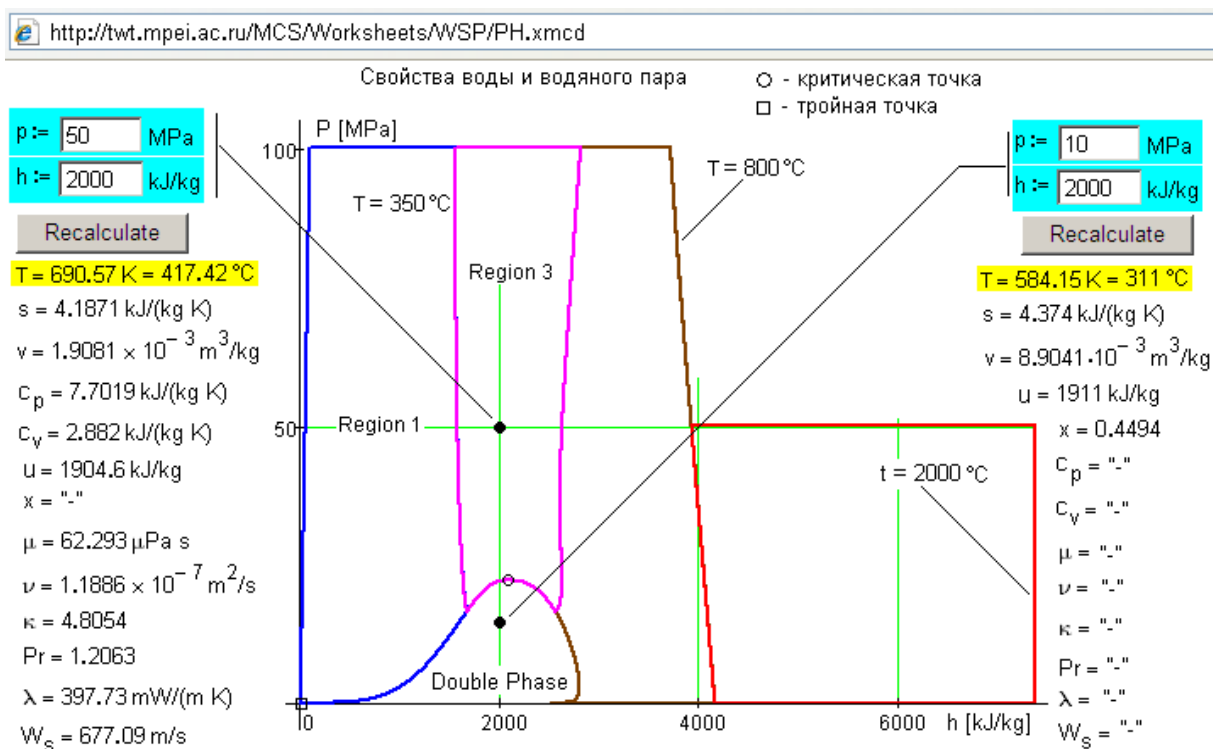


Рис. 4. Сайт с отображением областей формуляции IAPWS-IF97 в  $p$ - $h$ -координатах (<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/PH.xmcd>)

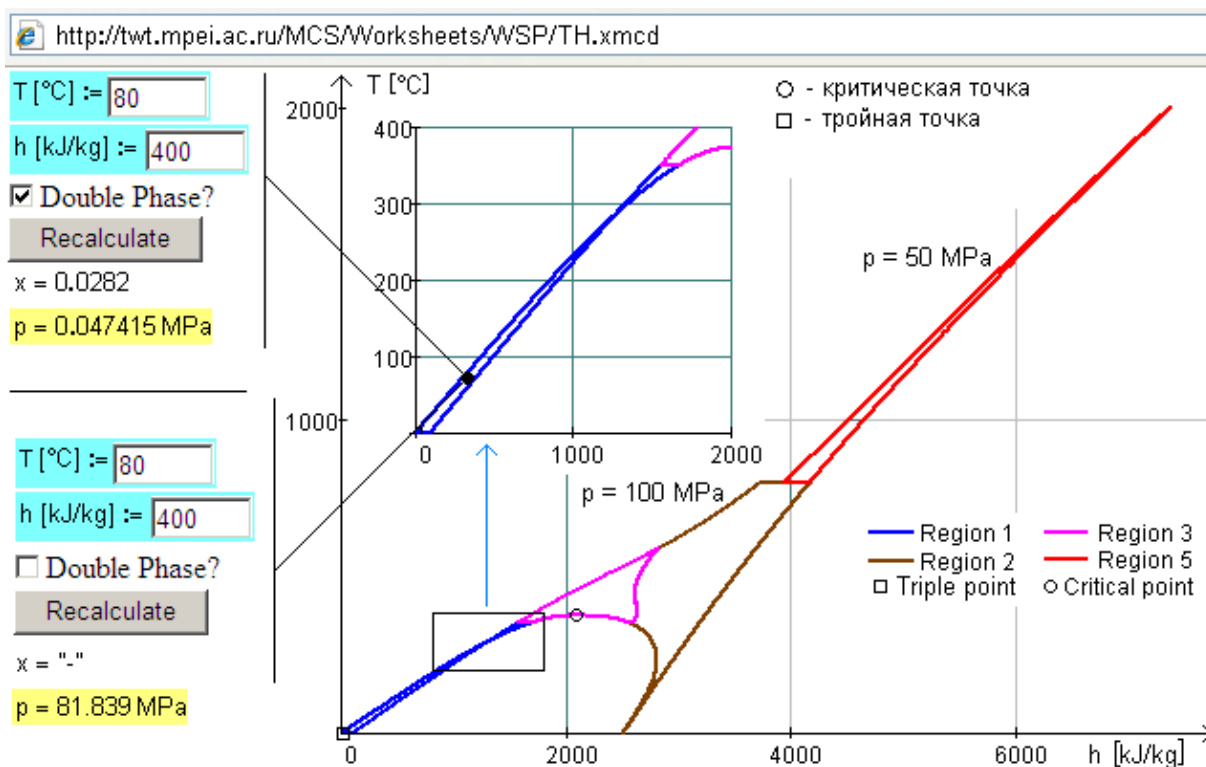


Рис. 5. Сайт с отображением областей формуляции IAPWS-IF97 в  $T$ - $h$ -координатах (<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/TH.xmcd>)

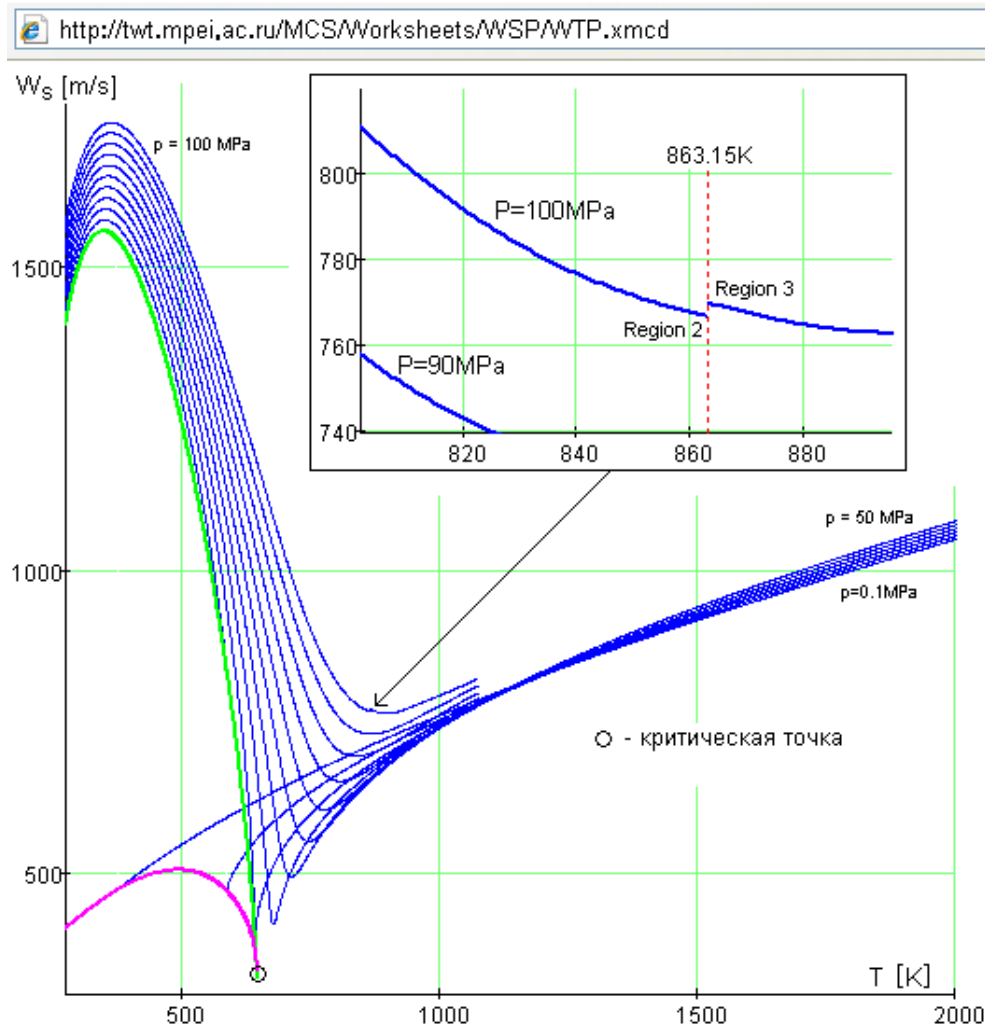


Рис. 6. Пример нестыковки областей формуляции IAPWS-IF97 (<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/WTP.xmcd>)

того, чтобы посетитель сайта помнил, что в данных областях расчеты ведутся по разным формулам и на границах областей возможны нестыковки. Так, на рис. 6 показана страница сайта с адресом [WSP/WTP](http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/WTP.xmcd), где можно рассчитать скорость звука в воде и водяном паре в зависимости от  $p$  и  $T$ , дополнив расчет графическим отображением результата на семействе изобар. Из диаграммы виден «скачок» при переходе из области 2 в область 3, о котором нужно помнить, ведя расчеты.

Сайт WaterSteamPro содержит страницы, где расчет свойств воды и водяного пара сопровождается графическими иллюстрациями разного типа, и это мы уже показали рисунком 6. На рис. 7 показана еще одна подобная страница Интернета с адресом [WSP/WKDiag9](http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/WKDiag9)<sup>15</sup>, где расчет удельной энтропии завершается указанием точки на семействе изоэнтроп в  $T$ - $p$ -диаграмме.

Страница Интернета с адресом [WSP/WKDiag15](http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/WKDiag15) (рис. 8) позволяет рассчитать коэффициент изоэнтропии воды и водяного пара в зависимости от температуры и давления и отобразить расчет не цифрами на графике, а цветом линий (областей) одного уровня: теплые цвета обозначают большие, а холодные – малые величины.

<sup>15</sup> Это «живая», интернетовская диаграмма, повторяющая диаграмму 9 из книги [8].

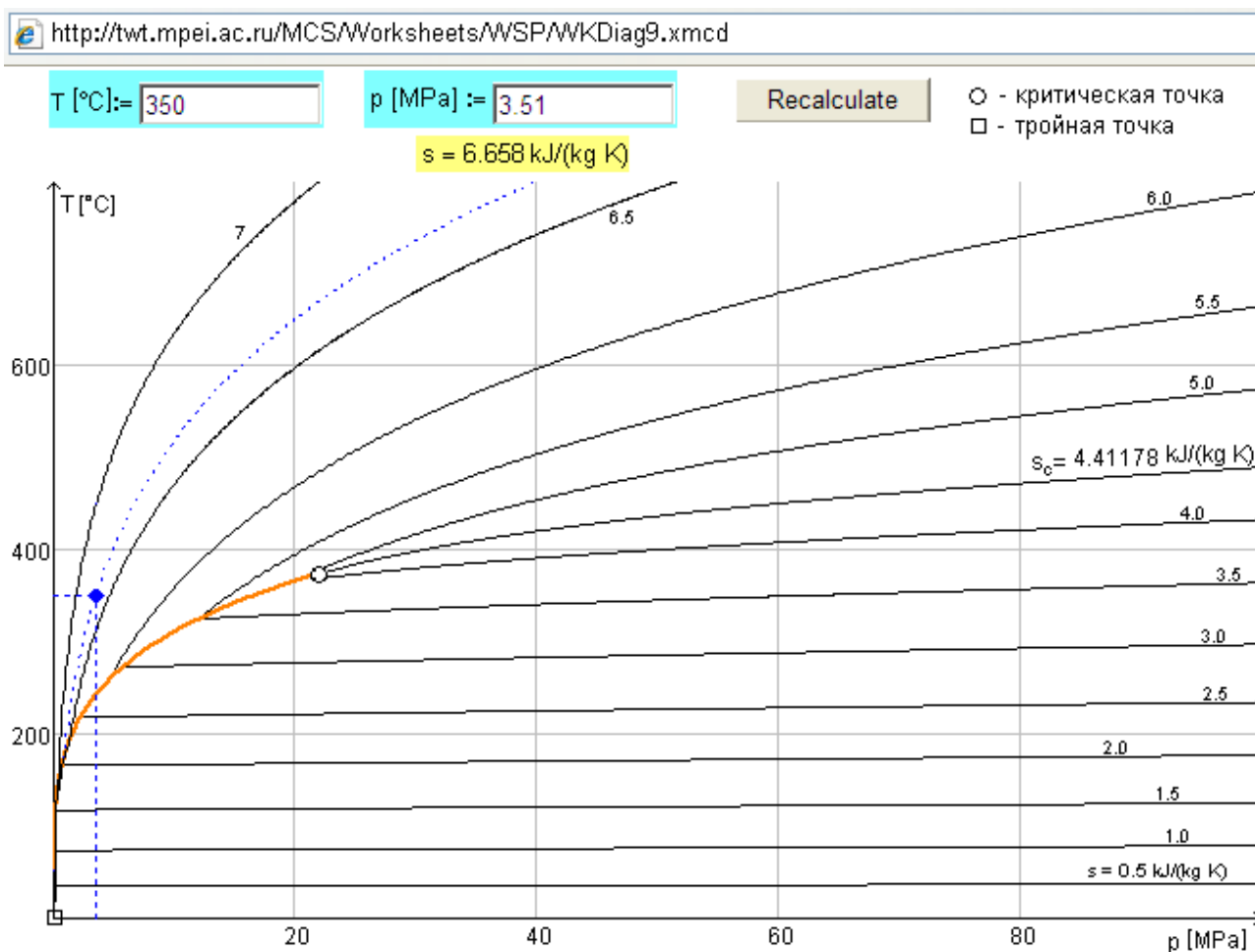


Рис. 7. Семейство изоэнтроп в  $T$ - $p$ -диаграмме (<http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/WKDiag9.xmcd>)

На рис. 9 отображено обращение к странице Интернета с адресом [WSP/HTPs](#) для расчета значения удельной энтальпии воды или водяного пара с отображением на поверхности  $h(p, T)$  рассчитанной точки, через которую проведены изобара ( $p = \text{const}$ ), изотерма ( $T = \text{const}$ ) и изохора ( $v = \text{const}$ ).

Страница Интернета с именем [WSP/XPTHSV](#) (рис. 10) позволяет нам еще раз (см. окно **b** на рис. 1) решить задачу о параметрах влажного пара. При этом посетитель сайта имеет не только расширенный набор вариантов исходных данных ( $p$  или  $T$ ;  $h$ ,  $s$ ,  $v$  или  $x$ ), но и графическую иллюстрацию полученного ответа – изолинии  $x = \text{const}$ , расположенные между пограничными кривыми.

Дополнение численного ответа графиками позволяет, с одной стороны, контролировать «попадание» величин в допустимый диапазон и избежать срыва расчета, а, с другой, видеть некую «динамику» процесса – изменение рассчитываемой величины при изменении исходных данных. Но графическое отражение «утяжеляет» расчет, увеличивает трафик посетителя сайтов Интернета. Поэтому были созданы и «облегченные» версии страниц сайта [WSP/PT](#), [WSP/PH](#), [WSP/PS](#), [WSP/TH](#) и т.д. – см. выше. Более того, если посетителю сайта нужны не все, а отдельные параметры воды и водяного пара, например удельная энтальпия, то он может обратиться к страницам с адресами [WSP/HTP-SI](#) ([WSP/HPS-SI](#) и т.д. с расчетом соответствующих параметров в единицах



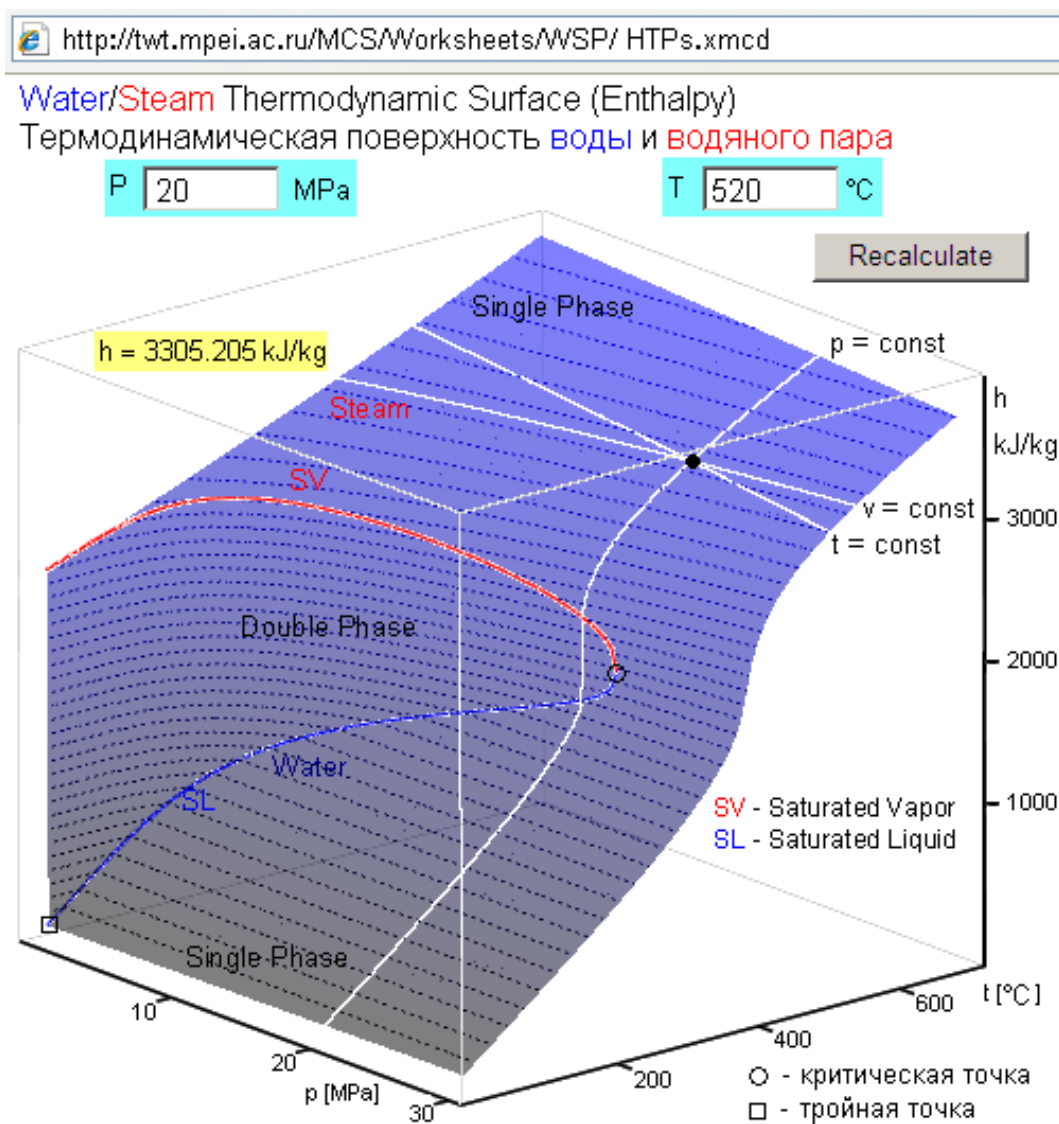


Рис. 9. Одна из поверхностей формуляции IAPWS-IF97 (<http://twm.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/HTPs.xmcd>)

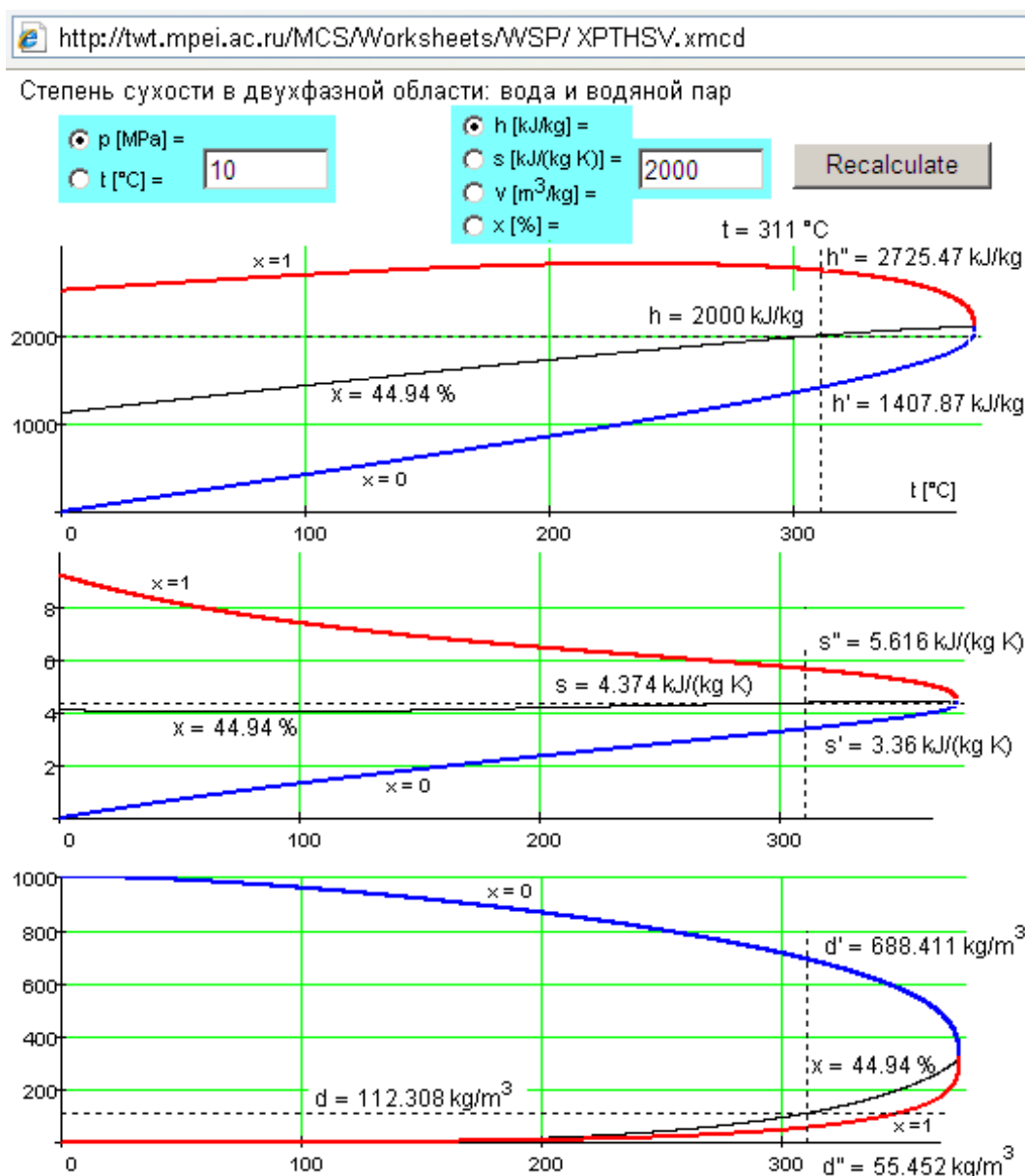


Рис. 10. Сайт для расчета свойств влажного пара  
<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/XPTHSV.xmcd>

Международной системы SI) или WSP/HTP-US (WSP/HTP-US и т.д. с расчетом в британской системе единиц).

На сайте WaterSteamPro есть страницы, на которых ведется расчет не только по отдельным точкам, как это было показано на рис. 1, 2, 4, 5 и 7–10, но и по процессам – по множествам рассчитанных точек, через которые проводятся интерполирующие линии. Так, на рис. 11 показана страница сайта PTU/h-s-Exp, на которой можно рассчитать и отобразить на *h-s*-диаграмме процесс расширения водяного пара.

На рис. 1 был рассчитан обратимый ( $s = \text{const}$ ) процесс расширения пара в турбине. На рис. 11 посетитель сайта может изменять значение  $\eta$  (относительного внутреннего КПД процесса расширения пара в диапазоне от 0 % (дросселирование пара при  $h = \text{const}$ ) до 100 % (обратимый процесс расширения пара при  $s = \text{const}$ ) и получать соответствующие линии расширения в заданной пользо-

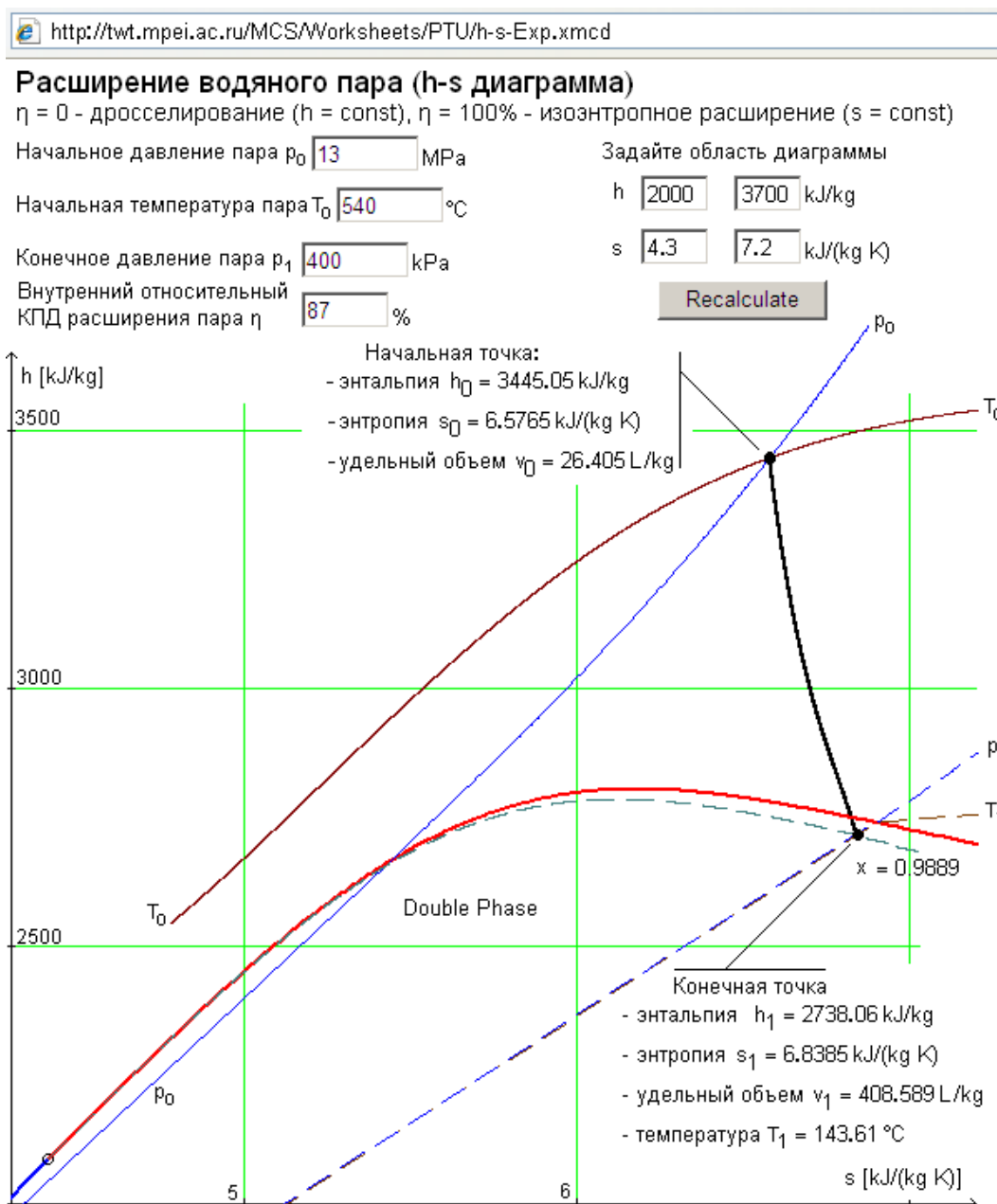


Рис. 11. *h-s*-диаграмма процесса расширения водяного пара (<http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/h-s-Exp.xmcd>)

вателем области *h-s*-диаграммы с прорисовкой изобар и изотерм в начальной и конечной точках расширения пара, а также линию  $x = \text{const}$ , если конечная точка расширения окажется в зоне влажного пара. Соответствующие страницы сайта созданы для отображения расширения пара и в других диаграммах – в *T-s*-диаграмме (PTU/T-s-Exp), в *p-s*-диаграмме (PTU/p-s-Exp) и в *p-h*-диаграмме (PTU/p-h-Exp).

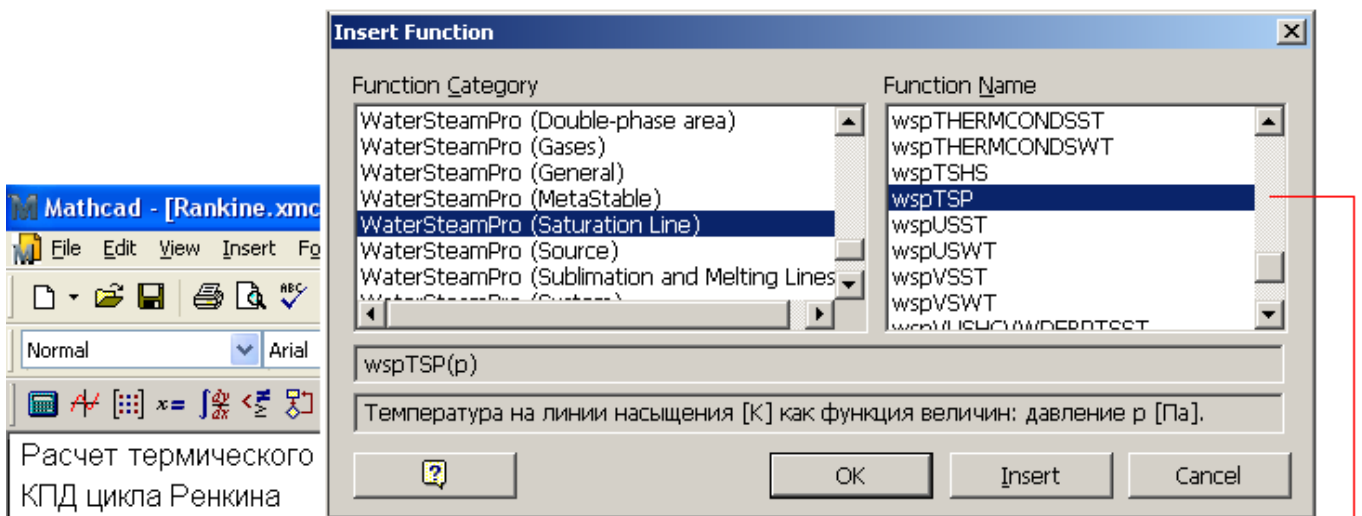
Как уже отмечалось в статье [1], работа с тем или иным программным обеспечением через Интернет имеет свои плюсы и минусы. Основной недостаток технологии перекадывания расчетов с персонального компьютера на серверы Интернета, увы, хорошо известен: в тот момент, когда необходимо провести расчет, связь рабочей станции с сервером может нарушиться или же окажется исчерпанным лимит времени работы с Интернетом. Не следует забывать и о том, что компьютеры многих пользователей просто не подключены к Интернету, а их владельцы довольству-

ются редкими выходами в Сеть с чужих компьютеров или с компьютеров, специально выделенных в организациях для этой цели.

По указанным и другим причинам авторами был предусмотрен альтернативный доступ к расчетам свойств воды и водяного пара через разовое скачивание файлов из Интернета или с распространяемого авторами CD-ROM-диска, если нет доступа в Сеть. Установка пакета WaterSteamPro на компьютере пользователя позволяет не только вести разовые расчеты, описанные выше, но и интегрировать функции, возвращающие свойства воды, водяного пара и газовых смесей, в популярные вычислительные системы – в языки программирования Fortran, Pascal, BASIC, C, в табличный процессор Excel, в уже рассмотренную нами математическую программу Mathcad (рис. 1) и т.д.

На рис. 12 показано решение нашей задачи о термическом КПД цикла Ренкина, когда к программе Mathcad подключены функции пакета WaterSteamPro.

Функции пакета WaterSteamPro в среде Mathcad могут работать в двух режимах. Первый режим (он отображен на рис. 12) – когда функции с префиксом wsp в качестве аргументов имеют вели-



а) Расчет без единиц измерения      Исходные данные    $p_{3-1} := 13 \cdot 10^6$     $T_1 := 540 + 273.15$     $p_{2-2'} := 5 \cdot 10^3$

Температура в конденсаторе    $T_{2-2'} := \text{wspTSP}(p_{2-2'}) = 306.025$        $T_{2-2'} - 273.15 = 32.875$

Энтропия воды на линии насыщения при температуре в конденсаторе    $s_{2'-3} := \text{wspSSWT}(T_{2-2'}) = 476.254$

Энтальпия свежего пара    $h_1 := \text{wspHPT}(p_{3-1}, T_1) = 3.44505 \times 10^6$

Энтальпия воды на выходе из питательного насоса    $h_3 := \text{wspHPS}(p_{3-1}, s_{2'-3}) = 1.50793 \times 10^5$

Теплота, поступающая в котел    $q_{\text{boiler}} := h_1 - h_3 = 3.29426 \times 10^6$

Энтропия свежего пара    $s_{1-2} := \text{wspSPT}(p_{3-1}, T_1) = 6.57654 \times 10^3$

Энтальпия пара, поступающего в конденсатор    $h_2 := \text{wspHPS}(p_{2-2'}, s_{1-2}) = 2.0046 \times 10^6$

Работа турбины    $l_{\text{turbine}} := h_1 - h_2 = 1.44045 \times 10^6$

Энтальпия воды на линии насыщения при температуре в конденсаторе    $h_{2'} := \text{wspHSWT}(T_{2-2'}) = 1.37765 \times 10^5$

Работа насоса    $l_{\text{pump}} := h_3 - h_{2'} = 1.30276 \times 10^4$

$$\eta_t := \frac{l_{\text{turbine}} - l_{\text{pump}}}{q_{\text{boiler}}} = 0.43331$$

Рис. 12. Решение задачи о термическом КПД цикла Ренкина в среде Mathcad с подключенными «безразмерными» функциями пакета WaterSteamPro



чины в базовых единицах измерения системы SI: давление в паскалях, температура по шкале Кельвина, энтальпия в джоулях на килограмм и т.д. Эти функции также возвращают величины в базовых единицах SI (джоули и т.д.). При этом сами единицы измерения не пропечатываются.

Если же в расчете сделать ссылку (Reference – см. рис. 13) на файл watersteampro.mcd, входящий в пакет WaterSteamPro, то будет задействован режим работы, когда аргументы функций с префиксом wsp принимают значения нужной размерности и возвращают соответствующие размерные величины [11]. Это, с одной стороны, делает расчеты более удобными (пользователь имеет возможность вводить и выводить величины в привычных для него единицах измерения: мегапас-

Mathcad - [Rankine.xmcd]

File Edit View Insert Format IO

Normal Arial

Расчет термического КПД цикла Ренкина

b) Расчет с единицами измерения

Reference: D:\Worksheets\Worksheets\MCS\watersteampro.mcd(R)

$kPa := 1000Pa$      $J/(g \cdot K) := \frac{J}{gm \cdot K}$      $J/g := \frac{J}{gm}$

Исходные данные  $p_{3-1} := 13 \cdot MPa$      $T_1 := 540 \cdot ^\circ C$      $p_{2-2'} := 5 \cdot kPa$

Температура в конденсаторе  $T_{2-2'} := wspTSP(p_{2-2'}) = 32.875 \cdot ^\circ C$

Энтальпия свежего пара  $h_1 := wspHPT(p_{3-1}, T_1) = 3445.053 J/g$

Энтальпия воды на выходе из питательного насоса  $h_3 := wspHPS(p_{3-1}, s_{2-3}) = 150.793 J/g$

Теплота, поступающая в котел  $q_{boiler} := h_1 - h_3 = 3294.261 J/g$

Энтальпия пара, поступающего в конденсатор  $h_2 := wspHPS(p_{2-2'}, s_{1-2}) = 2004.604 J/g$

Работа турбины  $l_{turbine} := h_1 - h_2 = 1440.449 J/g$

Работа насоса  $l_{pump} := h_3 - h_2 = 13.0276 J/g$

$\eta_t := \frac{l_{turbine} - l_{pump}}{q_{boiler}} = 43.331 \%$

Сообщение об ошибке – о неверном вызове функции wspHPT: This value has units: Temperature, but must have units: Pressure.

Рис. 13. Решение задачи о термическом КПД цикла Ренкина в среде Mathcad с подключенными «размерными» функциями пакета WaterSteamPro

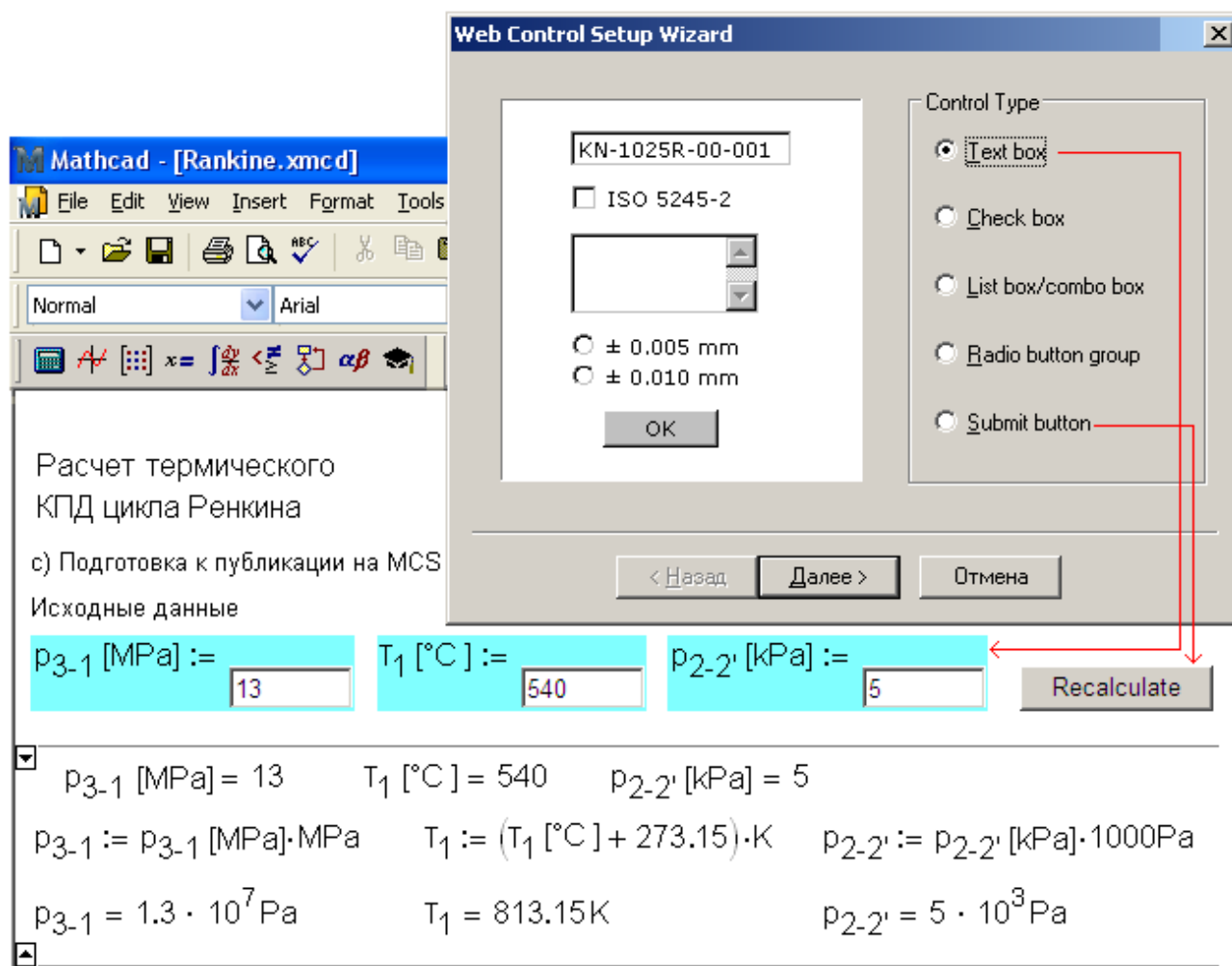


Рис. 14. Подготовка расчета термического КПД цикла Ренкина к публикации в Сети

кали, а не паскалы, температурная шкала Цельсия, а не Кельвина, килоджоули, а не джоули и т.д.), а, с другой стороны, в самом расчете ведется контроль за правильностью счета и вызова функций пакета WaterSteamPro. Так, из рис. 13 видно, что при расчете энтальпии свежего пара при первом вызове функции `wspHPT` был ошибочно нарушен порядок представления аргументов, что привело к аварийному останову расчета с выводом соответствующего сообщения (на английском языке) об ошибке: «Эта переменная должна быть давлением, а не температурой».

Если же расчет, показанный на рис. 13, необходимо будет открыть в Интернете по технологии Mathcad Calculation Server, то достаточно заменить операторы присваивания `:=` на сетевые элементы управления `Text Box` и вставить в расчет кнопку `Recalculate` – см. рис. 14.

Вводить исходные данные можно не только скаляром, но и вектором. Это позволяет не только делать расчеты по одной точке (см. рис. 1, 12 и 13), но и выводить некоторые зависимости. Так, на рис. 15 значение давления в конденсаторе задано вектором, вернее, матрицей с одной строкой<sup>16</sup>. После такого ввода все другие параметры цикла Ренкина, зависящие от значения давления в конденсаторе, также будут рассчитаны и выведены на печать не скалярами, а массивами – матрицами с одной строкой. Это позволяет легко построить графическую зависимость, в данном случае – зависимость термического КПД цикла Ренкина от давления в конденсаторе: проставить на декартовом графике рассчитанные точки и соединить их прямыми линиями (см. рис. 15).

<sup>16</sup> Это сделано для компактности расчета.

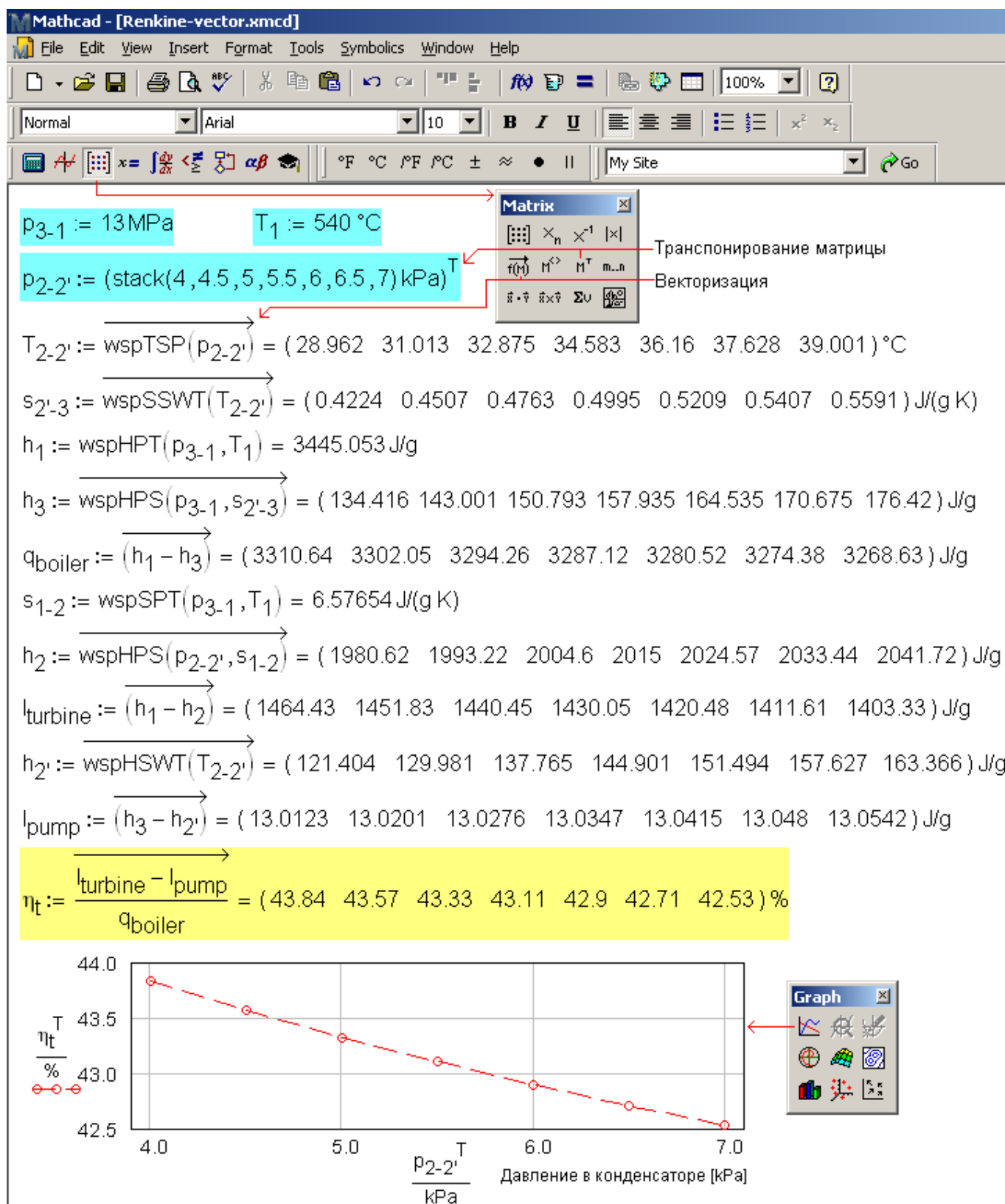


Рис. 15. Расчет и визуализация зависимости термического КПД цикла Ренкина от давления в конденсаторе с использованием вектора исходных данных

Другой подход к построению зависимостей показан на рис. 16, где формируется функция пользователя – зависимость термического КПД цикла Ренкина от температуры острого пара:  $\eta_t(T_1) := \dots$ . Такие функциональные зависимости удобны для построения графиков (см. рис. 15) или оптимизации.

На рис. 17 показан еще один (уже сетевой) расчет цикла Ренкина на перегретом паре, который отличается от расчетов, показанных на рис. 1, 15 и 16, следующим:

– ведется не только термический, но и эксергетический анализ цикла: дополнительно рассчитывается эксергетический КПД цикла  $\eta_{ex}$ , который не «дотягивает» до 100 % не «по вине природы» (законов термодинамики), а «по вине человека» – если бы температура в конденсаторе была равна

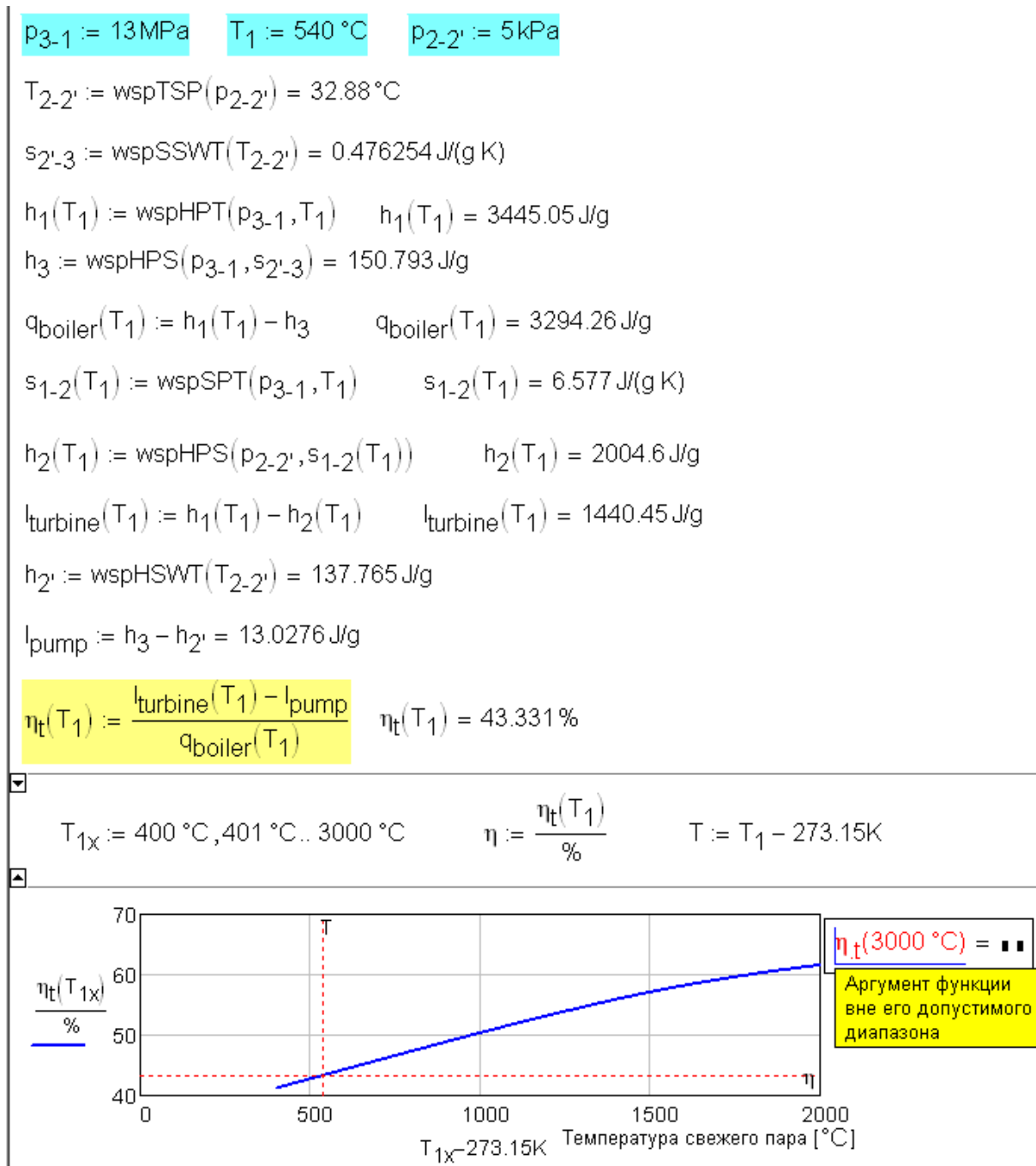


Рис. 16. Расчет зависимости термического КПД цикла Ренкина от температуры свежего пара с построением функции пользователя

не 32.88 °С, а 15 °С (температуре окружающей среды, вернее, температуре охлаждающей воды), то эксергетический КПД был бы равен 100 %;

- учитываются потери в турбине и в питательном насосе через ввод в расчет значений внутренних относительных КПД процесса расширения пара в турбине (см. также рис. 11) и повышения давления воды в питательном насосе;

- посетитель сайта может выбрать параметры осей диаграмм и построить не только традиционные (*h-s*- и *T-s*-диаграммы), но и нетрадиционные и даже экзотические диаграммы, например *c<sub>p</sub>-c<sub>v</sub>*-диаграмму, диаграмму «эксергия-анергия» и т.д.;

- можно строить не только плоские (*h-s*-, *T-s*- и т.п. диаграммы), но и объемные (трехмерные) диаграммы. В частности, на рис. 17 отображена *T-s-p*-диаграмма, на которой более четко виден процесс сжатия воды в питательном насосе. На плоской *T-s*-диаграмме соответствующую область приходится увеличивать (см. рис. 17 слева). На трехмерной диаграмме этого делать не надо – точки, отмечающие вход и выход в питательном насосе, разделены дополнительной осью давления.

Подробное описание такого расчета дано на сайте <http://tw.t.mpei.ac.ru/TTHB/2/ThermCycleMCS-Create.html>.

Страница сайта, показанная на рис. 17, как уже было подчеркнуто, позволяет строить различные, в том числе и трехмерные, диаграммы – традиционные, нетрадиционные и даже экзотические. У теплотехников нет единого мнения о том, какие диаграммы следует считать традиционными. Во всех учебниках по термодинамике приводятся *T-s*- и *h-s*-диаграммы, которые, безусловно, считаются традиционными. Но «Бог любит троицу!». Какую диаграмму нужно считать третьей тради-

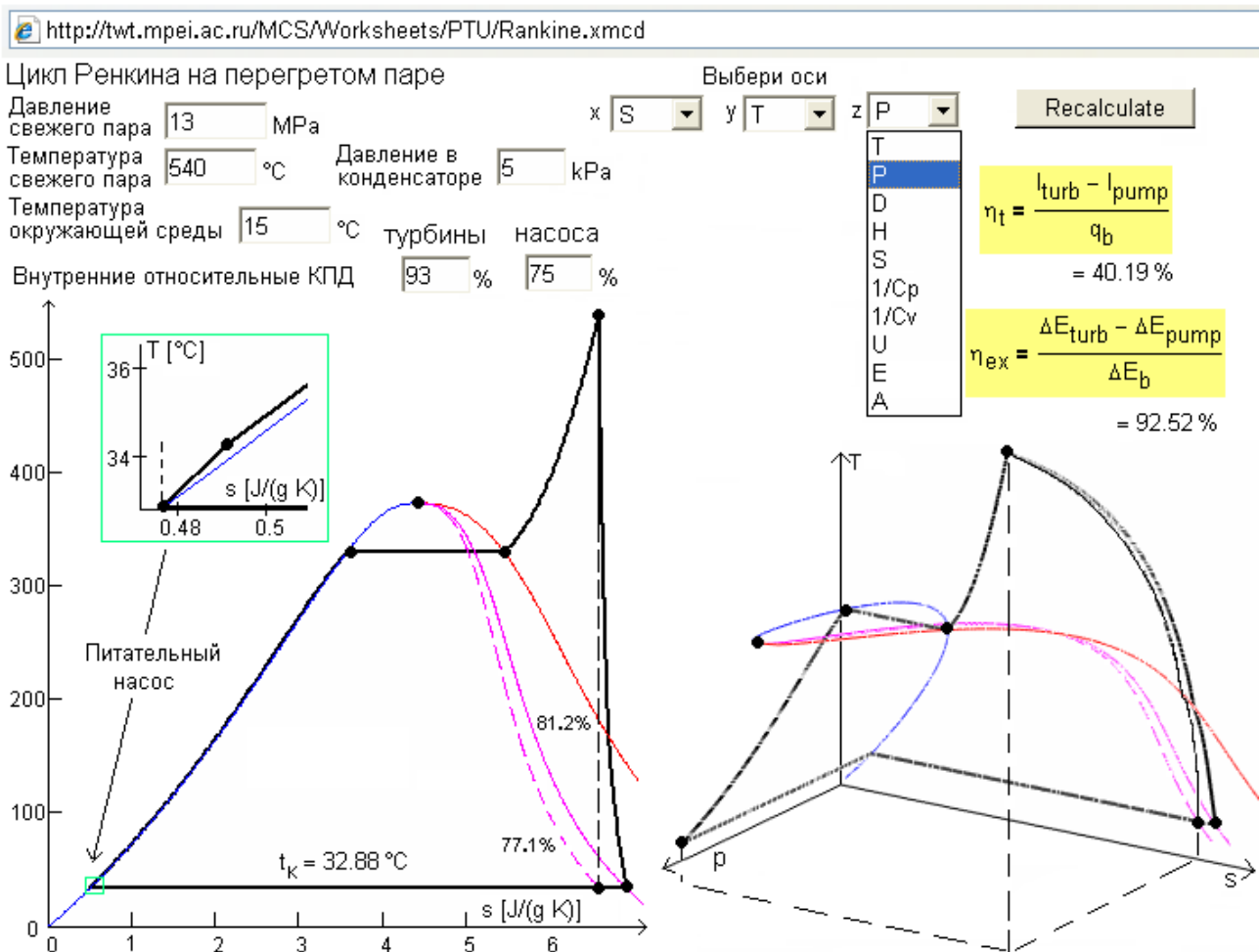


Рис. 17. Сетевой расчет цикла Ренкина (<http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd>)

ционной? Многие на эту роль выдвигают  $p-s$ -диаграмму (см. <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/p-s-Exp.xmcd>).

Но рис. 18 говорит, что это не так. Здесь показан виртуальный объект, который можно назвать «кубиком Ренкина». В него вписана трехмерная  $T-s-h$ -диаграмма цикла. Если этот кубик повернуть одной плоскостью к наблюдателю (посетителю сайта), то получится  $h-s$ -диаграмма, на другой плоскости –  $T-s$ -диаграмма, на третьей –  $T-h$ -диаграмма, которую, по-видимому, и следует считать «третьей традиционной».

Для лучшего понимания механизма работы теории размерностей применительно к пакету WaterSteamPro рассмотрим задачу по расчету термического КПД простейшего бинарного цикла (рис. 19).

В расчете, показанном на рис. 19, ведется дополнительный контроль размерностей за счет ввода в расчет двух разных физических величин, имеющих одинаковую размерность, – массы газа (kgg) и массы воды и водяного пара (kgws). Благодаря этому данные величины, имея одинаковую размерность массы, сохраняют признак «разноразмерности», что позволяет вести дополнительный контроль: в нижней части рис. 19 показано, что, к примеру, нельзя сложить удельные работы паровой и газовой турбин, поскольку эти показатели с одинаковой размерностью (энергия, деленная на массу) являются разными физическими величинами. Такое сложение можно провести, введя в расчет величину  $m$  (отношение массового расхода газа к массовому расходу воды и водяного пара), имеющую единицу измерения kgg/kgws. Как это достигается?

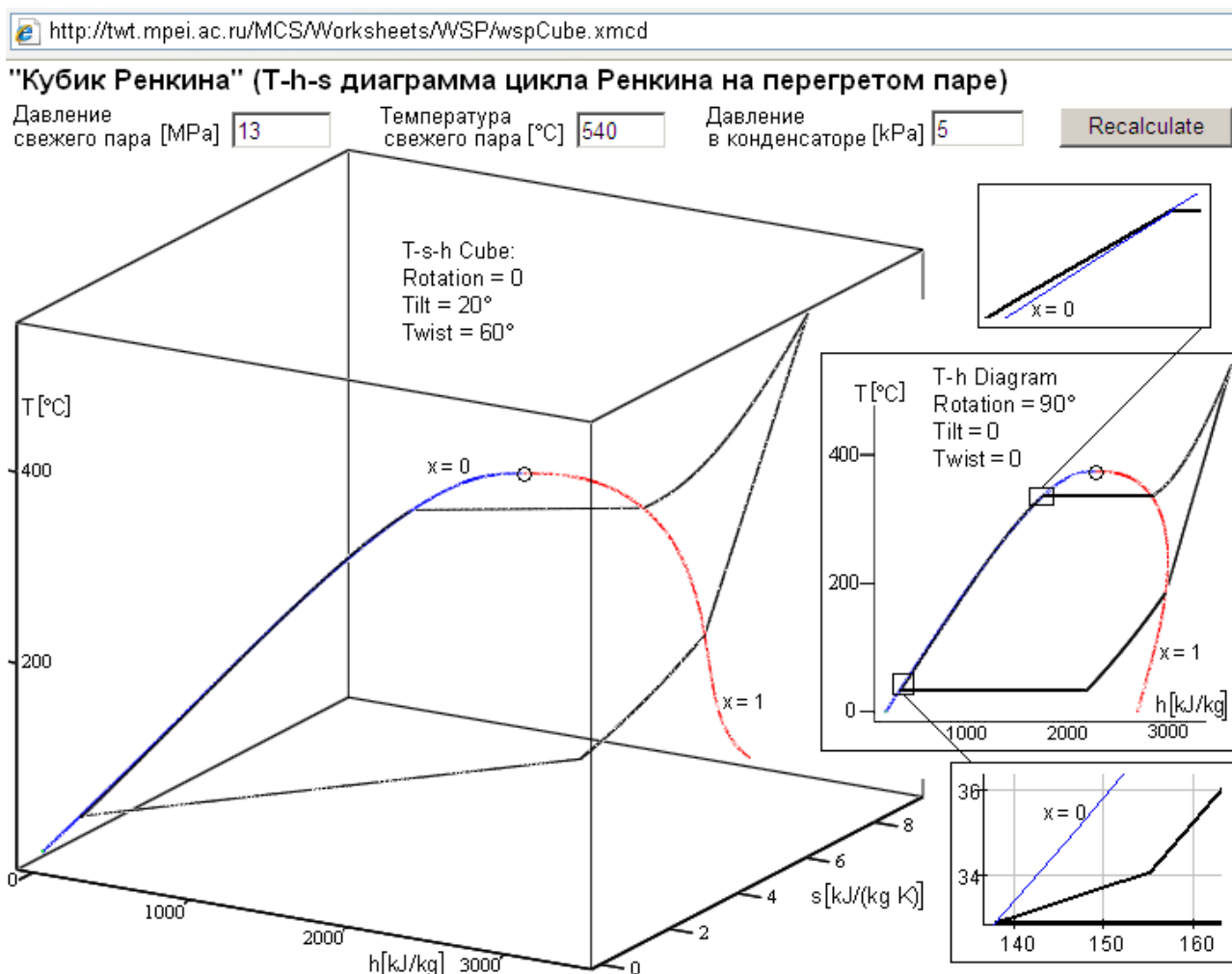


Рис. 18. Кубик Ренкина  
(<http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/wspCube.xmcd>)

Измените исходные данные и нажмите кнопку Recalculate

Газовая турбина  
Рабочее тело: air

$P_1$  [MPa] := 0.1  
 $T_1$  [°C] := 15  
 $P_2$  [MPa] := 1  
 $T_3$  [°C] := 1100  
 $T_5$  [°C] := 130

Паровая турбина  
 $P_6$  [MPa] := 9  
 $T_6$  [°C] := 480  
 $\Delta T_{c-r}$  [K] := 17

Обозначения:  
h - удельная энтальпия  
s - удельная энтропия  
q - удельная теплота  
l - удельная работа  
 $\eta$  - термический КПД  
k<sub>gg</sub> - кг газа  
k<sub>gws</sub> - кг воды или водяного пара

с - компрессор  
сс - камера сгорания  
gt - газовая турбина

Recalculate

Расчет газовой турбины  
 $af = \text{"air"} \quad h_1 := \text{wspgHGST}(af, T_1) = 288.56 \text{ kJ/kgg} \quad s_1 := \text{wspgSGSPT}(af, p_1, T_1) = 6.83 \text{ kJ/(kgg K)}$   
 $s_2 := s_1 \quad T_2 := \text{wspgTGSPS}(af, p_2, s_2) = 279.02 \text{ °C} \quad h_2 := \text{wspgHGST}(af, T_2) = 557.39 \text{ kJ/kgg}$   
 $p_3 := p_2 \quad s_3 := \text{wspgSGSPT}(af, p_3, T_3) = 7.847 \text{ kJ/(kgg K)} \quad h_3 := \text{wspgHGST}(af, T_3) = 1483.61 \text{ kJ/kgg}$   
 $p_4 := p_1 \quad s_4 := s_3 \quad T_4 := \text{wspgTGSPS}(af, p_4, s_4) = 498.08 \text{ °C} \quad h_4 := \text{if}(T_4 > T_6, \text{wspgHGST}(af, T_4, \text{"Error"}) = 790.87 \text{ kJ/kgg}$   
 $q_{cc} := h_3 - h_2 = 926.22 \text{ kJ/kgg} \quad l_{gas turb} := h_3 - h_4 = 692.74 \text{ kJ/kgg} \quad l_{compressor} := h_2 - h_1 = 268.83 \text{ kJ/kgg}$   
 $\eta_{gas turb} := \frac{l_{gas turb} - l_{compressor}}{q_{cc}} = 45.77 \%$  кг газа (воздуха)

Расчет паровой турбины  
 $h_6 := \text{wspHPT}(p_6, T_6) = 3336.33 \text{ kJ/kgws} \quad s_6 := \text{wspSPT}(p_6, T_6) = 6.593 \text{ kJ/(kgws K)}$   
 $T_7 := T_1 + \Delta T_{c-p} = 32 \text{ °C} \quad p_7 := \text{wspPST}(T_7) = 4.76 \text{ kPa} \quad s_7 := s_6 \quad x_7 := \text{wspXSTS}(T_7, s_7) = 77.12 \%$   
 $h_7 := \text{wspHSTX}(T_7, x_7) = 2004.37 \text{ kJ/kgws} \quad T_8 := T_7 \quad h_8 := \text{wspHSWT}(T_8) = 134.11 \text{ kJ/kgws}$   
 $p_9 := p_6 \quad s_9 := \text{wspSSWT}(T_8) = 0.464 \text{ kJ/(kgws K)} \quad s_9 := s_8 \quad h_9 := \text{wspHPS}(p_9, s_9) = 143.13 \text{ kJ/kgws}$   
 $q_{boiler} := h_6 - h_9 = 3193.2 \text{ kJ/kgws} \quad l_{steam turb} := h_6 - h_7 = 1331.96 \text{ kJ/kgws} \quad l_{pump} := h_9 - h_8 = 9.023 \text{ kJ/kgws}$   
 $\eta_{steam turb} := \frac{l_{steam turb} - l_{pump}}{q_{boiler}} = 41.43 \%$  кг воды и водяного пара

Расчет парогазовой установки  
 $h_5 := \text{wspgHGST}(af, T_5) = 404.51 \text{ kJ/kgg}$   
 Тепловой баланс котла-утилизатора  $m \cdot (h_4 - h_5) = h_6 - h_9 \quad m := \frac{h_6 - h_9}{h_4 - h_5} = 8.26 \text{ kgg/kgws}$   
 $q_{cc} := m \cdot (h_3 - h_2) = 7655.13 \text{ kJ/kgws} \quad l_{gas turb} := (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) = 423.91 \text{ kJ/kgg}$   
 $l_{steam turb} := (h_6 - h_7) - (h_9 - h_8) = 1322.94 \text{ kJ/kgws} \quad \frac{m \cdot l_{gas turb}}{l_{steam turb}} = 2.648$   
 $l_{gas turb} + l_{steam turb} = \blacksquare$  Несоответствие единиц измерения  
 $\eta_{combined cycle} := \frac{m \cdot l_{gas turb} + l_{steam turb}}{q_{cc}} = 63.05 \%$

Рис. 19. Сетевой расчет парогазового цикла  
(<http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/PGU.xmcd>)

```

kgg := cd      J/kgg :=  $\frac{J}{\text{kgg}}$       J/(kgg K) :=  $\frac{J}{\text{kgg K}}$       Единицы измерения для газа

Энтальпия газа
wspgHGST(gas_specification, t) := wspgHGST[user]  $\left( \text{gas\_specification}, \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/\text{kgg}$ 

Энтропия газа
wspgSGSPT(gas_specification, p, t) := wspgSGSPT[user]  $\left( \text{gas\_specification}, \frac{p + Pa}{Pa} - 1, \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/(\text{kgg K})$ 

Температура газа
wspgTGSPS(gas_specification, p, s) := wspgTGSPS[user]  $\left( \text{gas\_specification}, \frac{p + Pa}{Pa} - 1, \frac{s + J/(\text{kgg K})}{J/(\text{kgg K})} - 1 \right) \cdot K$ 

kgws := kg      J/kgws :=  $\frac{J}{\text{kgws}}$       J/(kgws K) :=  $\frac{J}{\text{kgws K}}$       Единицы измерения для воды и водяного пара

Энтальпия воды и водяного пара
wspHPT(p, t) := wspHPT[user]  $\left( \frac{p + Pa}{Pa} - 1, \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/\text{kgws}$ 

Энтропия воды и водяного пара
wspSPT(p, t) := wspSPT[user]  $\left( \frac{p + Pa}{Pa} - 1, \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/(\text{kgws K})$ 

Давление насыщения воды и водяного пара
wspPST(t) := wspPST[user]  $\left( \frac{t + K}{K} - 1 \right) Pa$       Степень сухости водяного пара
wspXSTS(t, s) := wspXSTS[user]  $\left( \frac{t + K}{K} - 1, \frac{s + J/(\text{kgws K})}{J/(\text{kgws K})} - 1 \right)$ 

Энтальпия влажного водяного пара на линии насыщения
wspHSTX(t, x) := wspHSTX[user]  $\left( \frac{t + K}{K} - 1, x \right) \cdot J/\text{kgws}$       Энтальпия воды на линии насыщения
wspHSWT(t) := wspHSWT[user]  $\left( \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/\text{kgws}$ 

Энтальпия водяного пара на линии насыщения
wspHSST(t) := wspHSST[user]  $\left( \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/\text{kgws}$       Энтропия воды на линии насыщения
wspSSWT(t) := wspSSWT[user]  $\left( \frac{t + K}{K} - 1 \right) \cdot J/(\text{kgws K})$ 

Энтальпия воды и водяного пара
wspHPS(p, s) := wspHPS[user]  $\left( \frac{p + Pa}{Pa} - 1, \frac{s + J/(\text{kgws K})}{J/(\text{kgws K})} - 1 \right) \cdot J/\text{kgws}$ 

```

Рис. 20. Создание размерных функций на основе безразмерного пакета WaterSteamPro

На рис. 20 показано содержание файла watersteampro.mcd, ссылка на который была показана на рис. 13.

В файле watersteampro.mcd делаются размерными все функции пакета. На рис. 20 такая операция проводится только с теми функциями, которые участвуют в расчете парогазового цикла. При этом за единицу массы газа принимается... не участвующая в данном расчете единица силы света кандела cd.

На рис. 20 показан сетевой расчет простейшего парогазового цикла. Но на сайте <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/ThermCycleMCS.html> размещены более сложные расчеты по реальным паротурбинным, газотурбинным и парогазовым установкам.

### Заключение

Считается, что на первом месте списка важнейших «IT-переворотов» – событий, которые серьезно изменяют жизнь пользователей компьютеров в течение ближайшего времени, стоит развитие так называемых «облачных вычислений» – предоставление удаленных вычислительных мощностей, дискового пространства («облаков») и каналов связи заказчику. На использование «облачных



вычислений» пользователей толкает, помимо прочего, высокая стоимость лицензионных программ для отдельных рабочих станции, аренды помещений, электроэнергии и... борьба с компьютерным пиратством. Под «облаками» понимаются вычислительные центры, которые на порядок мощнее собственных инфраструктур пользователей. Вместо физических серверов заказчикам выделяются виртуальные серверы, развернутые на распределенной сети компьютеров промышленной мощности.

Пакет программ и расчетные web-страницы сайтов WaterSteamPro (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB>) и Thermal Cycles (<http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/ThermCycleMCS.html>) будут полезны всем тем, кому необходимы свойства рабочих тел и теплоносителей энергетики, а также расчеты и визуализация процессов и циклов теплоэнергетических установок «в облаках».

Работа по созданию «облачных» расчетных серверов для теплоэнергетиков и теплотехников является частью инновационной образовательной программы (<http://inedu.mpei.ru>), выполняемой Московским энергетическим институтом ([www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)) для развития Электронной Энциклопедии Энергетики ([www.trie.ru](http://www.trie.ru)).

### Литература

1. **Свойства** теплоносителей и рабочих тел энергетики: информация в Интернете / В.Ф. Очков, А.А. Александров, К.А. Орлов, А.В. Очков // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 1 (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/NREE-1-2008/index.html>).
2. **Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф.** Математические пакеты – новые подходы при расчетах процессов термодинамики и других научных дисциплин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2005. № 11–12 ([http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mat\\_h\\_Therm/index.html](http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mat_h_Therm/index.html)).
3. **Thermodynamic Cycles: Calculations on the Internet** / Valeriy OCHKOV, Alexey ALEXANDROV, Konstantin ORLOV, Alexey OCHKOV // Proceedings of the 7-th Conference «Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow», June 26–27. Pilsen, Czech Republic, 2008 (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/InternetCycles-Pilsen-2008-Report.html>).
4. **Теплофизические** свойства воды и водяного пара в Интернете / А.А. Александров, В.Ф. Очков, К.А. Орлов, А.В. Очков // Промышленная энергетика. 2007. № 2 (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WspIn/index.html>).
5. **Очков В.Ф., Александров А.А., Орлов К.А.** Термодинамические циклы: расчеты в Интернете // Вестник МЭИ. 2007. № 1 ([http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Therm\\_Cycle\\_Art/index.html](http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Therm_Cycle_Art/index.html)).
6. **Alexandrov A.A., Ochkov V.F., Orlov K.A.** Steam Tables and Diagrams on Mathcad Calculation Server for Personal Computers, Pocket Computers and Smart Phones // Proceedings of the 15-th International Conference of the Property of Water and Steam, Berlin/Germany, 2008, September 7–11 (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Berlin2008.html>).
7. **Александров А.А., Григорьев Б.А.** Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: Изд. МЭИ, 1999.
8. **W. Wagner, H.-J. Kretzschmar.** International Steam Tables – Properties of Water and Steam based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97. Geidelberg/Germany: Springer, 2008 (<http://www.springer.com/engineering/mechanical+eng/book/978-3-540-21419-9>).
9. **ASME Steam Tables for Industrial Use** / W.T. Parry, J.C. Bellows, J.S. Gallagher, A.H. Harvey / American Society of Mechanical Engineers (ASME Press), 1999.
10. **Очков В.Ф.** Mathcad 14 для студентов, инженеров конструкторов. С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007 ([http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad\\_14/index.html](http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad_14/index.html)).
11. **Очков В.Ф.** Физические и экономические величины в Mathcad и Maple. М.: Финансы и статистика, 2002 ([http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword\\_book.htm](http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword_book.htm)).