

## «Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов

Очков В.Ф.<sup>1</sup>, д.т.н., Фенкель М.<sup>2</sup>, д-р, Орлов К.А.<sup>1</sup>, к.т.н., Очков А.В.<sup>1</sup>, инж., Знаменский В.Е.<sup>1</sup>, асп.

Национальный исследовательский университет МЭИ<sup>1</sup>

Национальный институт стандартов и технологии, США<sup>2</sup>

Описана технология теплотехнических расчетов, использующая ссылки на Интернет-функции («облачные» функции) по свойствам рабочих веществ парогазовых циклов.

Расчеты циклов паротурбинных, газотурбинных и парогазовых установок требуют знания термодинамических свойств рабочих веществ (вода и/или водяной пар, воздух, дымовые газы и др.), задействованных в циклах. Когда такие расчеты ведутся *вручную*, то можно пользоваться «бумажными» таблицами [1] по термодинамическим свойствам конкретных рабочих веществ на линии насыщения, в однофазной области и в областях неустойчивого состояния (переохлажденный пар, перегретая вода и т.д.). Расчеты же на *компьютере* требуют специальных программных *функций*, возвращающих значения свойств рабочих веществ в зависимости от параметров цикла.

Одной из самых распространенных и удобных программ по свойствам рабочих веществ и теплоносителей энергетики (включая промышленную и «бытовую» энергетику – энергетику, использующую небольшие установки с органическими рабочими телами) является программа WaterSteamPro [2-3]. После скачивания (download) этой программы с сайта [www.wspr.ru](http://www.wspr.ru) и установки ее на компьютере в теплотехнических расчетах<sup>3</sup> становятся видимыми более 300 функций не только по свойствам рабочих веществ, но и по некоторым процессам в термодинамических циклах.

Технология *скачивания* функций с сайтов Интернета (или установки их на компьютере с диска или с «флешки», если у рабочей станции нет выхода в Интернет) имеет один существенный недостаток, заключающийся в следующем.

Программы для компьютеров, в частности, программы для расчетов теплофизических свойств индивидуальных веществ и их смесей непрерывно дополняются и совершенствуются. Это в первую очередь связано и с тем, что появляются новые

---

<sup>1</sup> 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, НИУ МЭИ – [www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)

<sup>2</sup> NIST-Boulder, MS 107.00, 325 Broadway, Boulder, Colo. 80305-3337

<sup>3</sup> А они могут вестись практически во всех программных средах: табличный процессор Excel, инженерный калькулятор Mathcad, язык программирования технических расчетов Matlab, язык символьный вычислений Maple, языки программирования высокого уровня C, BASIC, Pascal, fortran и др. В данной статье мы ограничились рассмотрением только пакета Mathcad.

формуляции (наборы формул с их описанием)<sup>4</sup>, определяющие порядок расчетов конкретных свойств конкретных веществ<sup>5</sup>. Кроме того, в существующих программах исправляются ошибки и неточности, расширяется область их применения, улучшаются их характеристики (быстродействие, объем занимаемой памяти компьютера и др.). Такие программы также непрерывно переделываются в связи с тем, что меняется аппаратная и программная часть компьютеров, используются, например новые операционные системы. Пользователи программ по свойствам веществ часто не успевают за этими изменениями и работают с устаревшими версиями. Но это еще полбеда. Настоящая беда наступает тогда, когда пользователи меняют компьютер и/или операционную систему на нем, что часто приводит к тому, что старые программы перестают устанавливаться и запускаться на новых или обновленных компьютерах. Еще одно неудобство, связанное с технологией скачивания, – это накопление на компьютере пользователя ненужных программ и утилит, в которых пользователь начинает путаться.

В связи с этим, а также с учетом того факта, что в настоящее время почти все компьютеры, на которых ведутся инженерные и, в частности, теплотехнические расчеты, имеют постоянный скоростной выход в Интернет, авторами данной статьи была предложена новая технология работы с функциями по теплофизическим свойствам рабочих веществ, теплоносителей и материалов теплоэнергетики, базирующаяся не на *скачивании* программ, а на *ссылках* (reference) на функции, хранящиеся на сайтах Интернета – «в облаках».

Упомянутый справочник по теплофизическим свойствам рабочих веществ теплоэнергетики [1] был дополнен сайтом, который размещен на расчетном сервере Национального исследовательского университета МЭИ ([www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)) и ООО «Триеру» ([www.trie.ru](http://www.trie.ru)) – см. рис. 1.

---

<sup>4</sup> Если говорить о воде и водяном паре (включая и растворы – морскую воду, например) – основном рабочем теле энергетики, то такие формуляции разрабатывает и утверждает Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара IAPWS – см. сайт [www.iapws.org](http://www.iapws.org).

<sup>5</sup> Конкретный пример. В сентябре 2011 г. Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара утвердила новую формуляцию для расчета теплопроводности воды и/или водяного пара. Пользователи, скачавшие программы будут еще долго работать со старыми программами. Пользователи, воспользовавшиеся новой информационной технологией, описанной в данной статье, сразу начнут работать с программной реализацией новой формуляции по теплопроводности воды и/или водяного пара.

Расчетный сервер МЭИ (ТУ)

Поиск по сайту:

Поиск

Оглавление

Интерактивные справочники

- Высшая математика
- Математические функции
- Теплоэнергетика и теплотехника
- Теплофизические свойства воды и водяного пара
- Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики**
- Гидрогазодинамика
- Электронный справочник по свойствам веществ, используемых в теплоэнергетике (ОИВТ РАН)
- Физические величины
- Теплообменные установки и трубопроводы ТЭС
- Термодинамические циклы
- Химическая кинетика
- Химическая термодинамика
- Электротехнические материалы
- Теория автоматического управления
- Энергосбережение

Web-версия справочника

**Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики**

Александров А.А., Орлов К.А., [Очков В.Ф.](#)

Живые формуляции из книги

- структура формуляции IAPWS-IF97: график областей с возможностью смены осей и увеличения
- область 1 IAPWS-IF97 (основное уравнение для жидкости)
- область 2 IAPWS-IF97 (основное уравнение для перегретого пара)
- область 3 IAPWS-IF97 (основное уравнение для околокритической области)
- область 4 IAPWS-IF97 (уравнения линии насыщения)
- область 5 IAPWS-IF97 (основное уравнение для области высоких температур)
- метастабильная область
- Функции определенные на всей области параметров, описываемой формуляцией IAPWS-IF97
- динамическая вязкость
- теплопроводность
- поверхностное натяжение
- статическая диэлектрическая постоянная
- коэффициент преломления
- ионное произведение
- термодинамические свойства газов

Рис. 1. Расчетный сайт НИУ МЭИ и ООО «Триеру»

Кроме отмеченного справочника на расчетном сервере МЭИ-Триеру открыты и другие интерактивные сетевые справочники, полезные для энергетиков и теплотехников [4].

С сайта справочника по теплофизическим свойствам рабочих веществ теплоэнергетики (рис. 1) можно перейти к открытым сетевым интерактивным расчетам по отдельным областям формуляции IAPWS-IF97 (см. сноску 3):

1. Область жидкости (воды) – <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Region1>
2. Область водяного пара – <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Region2>
3. Околокритическая область – <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Region3>
4. Линия насыщения – <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Region4>
5. Область высоких температур (800 – 2000°C) – <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Region5>
6. Метастабильная область – <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/RegionMS>

На указанных сайтах есть интерактивные расчеты, заменяющие таблицы справочника [1], а также ссылки (на рис. 1 они выделены подсветкой), следуя которым («щелкнув по которым мышью»), можно открыть сайты с функциями по термодинамическим свойствам рабочих тел теплоэнергетики. На рис. 2 показан сайт с такими функциями для воды и/или водяного пара, а на рис. 3 по аналогичным функциям для идеальных газов и их смесей.

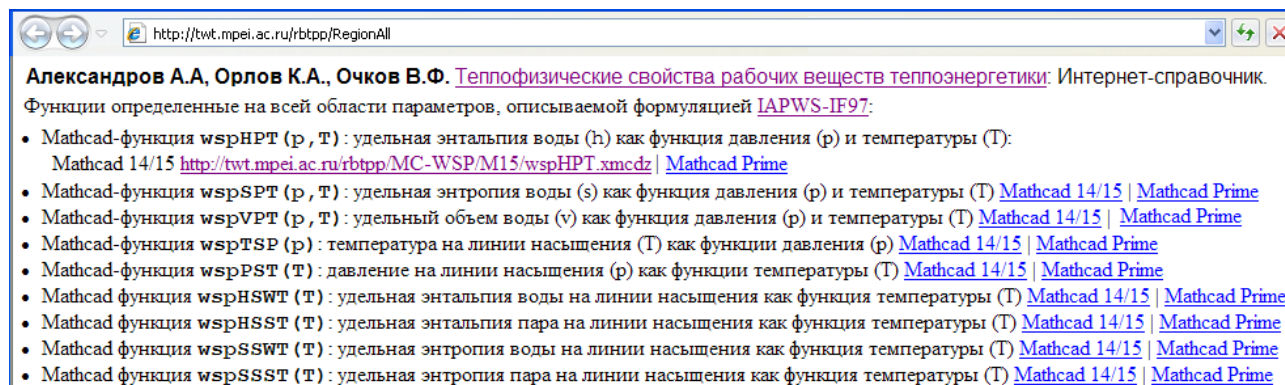


Рис. 2. Сайт со ссылками на функции по термодинамическим свойствам воды и/или водяного пара

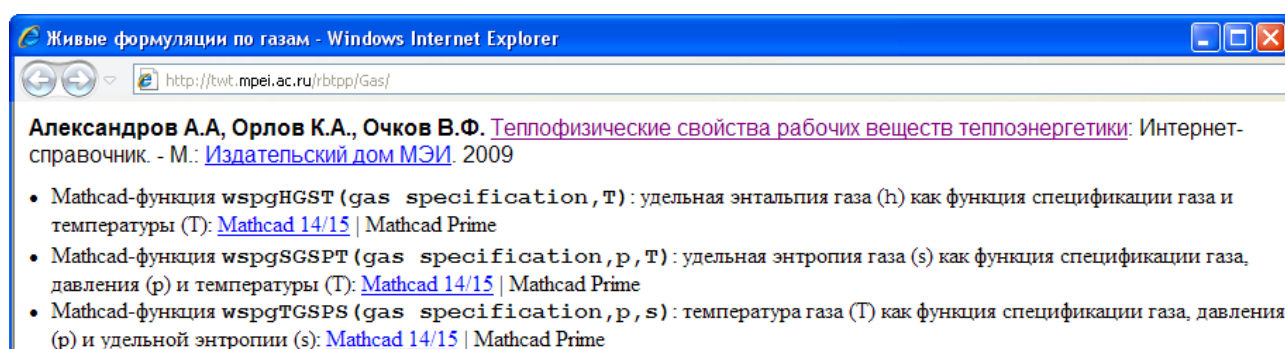


Рис. 3. Сайт со ссылками на функции по термодинамическим свойствам идеальных газов и их смесей

Инженерный калькулятор Mathcad – очень удобное средство для решения различных инженерных, в том числе и теплотехнических задач [5]. В среде Mathcad запись формул ведется в естественной нотации, что выгодно отличает его от традиционных языков программирования и электронных таблиц. В среде Mathcad есть возможность использовать единицы измерения для контроля правильности вычислений и для более удобного отображения результатов. Подробнее об этом будет сказано об этом ниже. Результаты расчетов в среде Mathcad иллюстрируются графиками, диаграммами и анимациями. Эти и другие полезные качества пакета Mathcad сделали его одним из самых популярных средств решения инженерно-технических задач на компьютере.

В среде Mathcad есть удобное средство *ссылка (reference)* на другой Mathcad-документ, переменные и функции которого становятся *доступными* (как говорят программисты – *видимыми*) в Mathcad-документе, из которого делается соответствующая ссылка. Пользователю Mathcad не нужно открывать и вставлять в свой расчет другой расчетный документ – достаточно сделать ссылку на интересующий его файл. После этого пользователь может использовать функции, запрограммированные в нем, так, как если бы

они уже были созданы в его собственном документе. Такую ссылку можно делать не только на Mathcad-документы (файлы с расширением \*.mcd, \*.mcdz, \*.xmcd, \*.xmcdz, \*.mcdx и \*.mcdxz), хранящиеся на рабочей станции или в локальной компьютерной сети, но и на сайтах Интернета. Это открывает широкие возможности для реализации новой технологии использования функций, хранящихся на сайтах Интернета без их закачивания на компьютер пользователя.

На рис. 4, 5 и 6 в качестве примера «облачного» вызова функций по свойствам рабочих тел теплоэнергетических установок показан расчет в среде Mathcad термического КПД простейшего идеального парогазового (бинарного) термодинамического цикла – цикла Ренкина на перегретом водяном паре, горелка котельной установки (котла-утилизатора – ку) которого заменена на газотурбинную установку (цикл Брайтона) с воздушным компрессором (к), камерой сгорания (кс), газовой турбиной (гт) и электрическим генератором (г).

### Расчет термического КПД парогазовой установки

Параметры ГТУ:

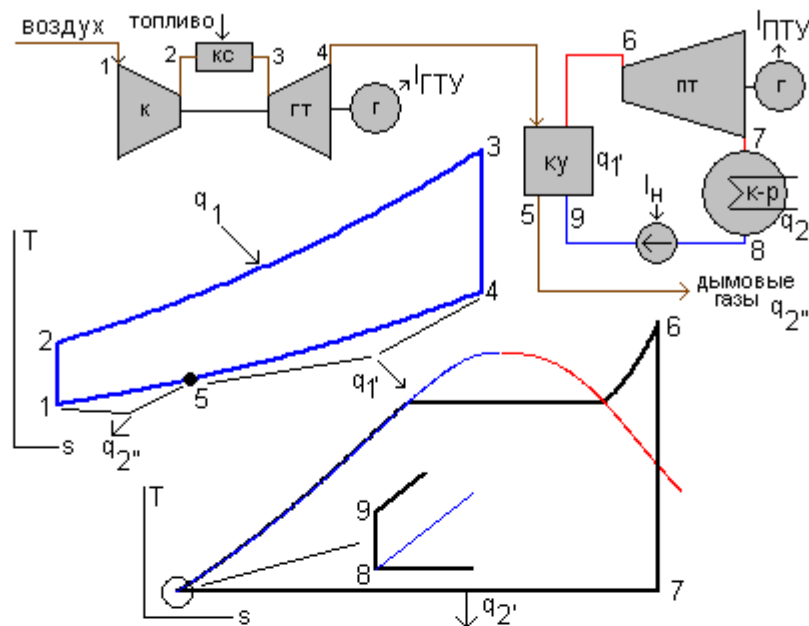
$$p_1 := 0.1 \text{ МПа}$$

$$T_1 := 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_2 := 1 \text{ МПа}$$

$$T_3 := 1100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_5 := 130 \text{ }^\circ\text{C}$$



Параметры ПТУ:

$$T_6 := 480 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_6 := 9 \text{ МПа}$$

$$p_7 := 4.76 \text{ кПа}$$

Расчет ПТУ с обращением к функциям, хранящимся на сайте <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/RegionAll>

Удельная энтальпия водяного пара на входе в турбину:

➔ Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/MC-WSP/M15/wspHPT.xmcdz>  $h_6 := \text{wspHPT}(p_6, T_6) = 3336.3 \text{ кДж/кг пара}$

Удельная энтропия водяного пара на входе в турбину:

➔ Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/MC-WSP/M15/wspSPT.xmcdz>  $s_6 := \text{wspSPT}(p_6, T_6) = 6.593 \text{ кДж/(кг пара} \cdot \text{К)}$

Температура воды на входе в котел:

➔ Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/wspT1PS.xmcdz>  $T_9 := \text{wspT1PS}(p_6, s_9) = 32.21 \text{ }^\circ\text{C}$

Удельная энтальпия воды на входе в котел:

$$h_9 := \text{wspH1PT}(p_6, T_9) = 143.13 \text{ кДж/кг воды}$$

Удельная теплота, подводимая к котлу:  $q_1 := h_6 - h_9 = 3193.2 \text{ кДж/кг}$

Удельная работа турбины:  $l_T := h_6 - h_7 = 1331.95 \text{ кДж/кг пара}$

Удельная работа насоса:  $l_H := h_9 - h_8 = 9.011 \text{ кДж/кг воды}$

Термический КПД цикла:  $\eta_t := \frac{l_T - l_H}{q_1} = 41.43 \%$

Рис. 4. Расчет паротурбинной части парогазового цикла

Расчет ГТУ Рабочее тело af := "Air"

Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор:

☛ Ссылка: <http://tw.t.mpei.ac.ru/rbtp/Gas/M15/wspgHGST.xmcdz>  $h_1 := \text{wspgHGST}(af, T_1) = 288.56 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная энтропия воздуха на входе в компрессор:

☛ Ссылка: <http://tw.t.mpei.ac.ru/rbtp/Gas/M15/wspgSGSPT.xmcdz>  $s_1 := \text{wspgSGSPT}(af, p_1, T_1) = 6.83 \text{ кДж/(кг газа} \cdot \text{K)}$

Удельная энтропия воздуха на выходе из компрессора:  $s_2 := s_1 = 6.83 \text{ кДж/(кг газа} \cdot \text{K)}$

Температура воздуха на выходе из компрессора:

☛ Ссылка: <http://tw.t.mpei.ac.ru/rbtp/Gas/M15/wspgTGSPS.xmcdz>  $T_2 := \text{wspgTGSPS}(af, p_2, s_2) = 279.02 \text{ }^\circ\text{C}$

Удельная энтальпия воздуха на выходе из компрессора:  $h_2 := \text{wspgHGST}(af, T_2) = 557.39 \text{ кДж/кг газа}$

Давление газа на входе в ГТУ:  $p_3 := p_2 = 1 \text{ MPa}$

Удельная энтропия газа на входе в ГТУ:  $s_3 := \text{wspgSGSPT}(af, p_3, T_3) = 7.847 \text{ кДж/(кг газа} \cdot \text{K)}$

Удельная энтальпия газа на входе в ГТУ:  $h_3 := \text{wspgHGST}(af, T_3) = 1483.61 \text{ кДж/кг газа}$

Давление газа на выходе из ГТУ:  $p_4 := p_1 = 0.1 \text{ MPa}$

Удельная энтропия газа на выходе из ГТУ:  $s_4 := s_3 = 7.85 \text{ кДж/(кг газа} \cdot \text{K)}$

Температура газа на выходе из ГТУ:  $T_4 := \text{wspgTGSPS}(af, p_4, s_4) = 498.08 \text{ }^\circ\text{C}$

Удельная энтальпия газа на выходе из ГТУ:  $h_4 := \text{if}(T_4 > T_6, \text{wspgHGST}(af, T_4), \text{"Error"}) = 790.87 \text{ кДж/кг газа}$

Теплота, подводимая в камере сгорания:  $q_1 := h_3 - h_2 = 926.22 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная работа газовой турбины:  $l_{\text{ГТ}} := h_3 - h_4 = 692.74 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная работа компрессора:  $l_{\text{к}} := h_2 - h_1 = 268.83 \text{ кДж/кг газа}$

Термический КПД цикла ГТУ:  $\eta_{\text{ГТУ}} := \frac{l_{\text{ГТ}} - l_{\text{к}}}{q_1} = 45.77 \%$

Рис. 5. Расчет газотурбинной части парогазового цикла

Расчет ПГУ (бинарного цикла)

Удельная энтальпия газа на выходе из котла-утилизатора:  $h_5 := \text{wsprgHGST}(af, T_5) = 404.51 \text{ кДж/кг газа}$

Часть теплоты выхлопа газовой турбины тратится на выработку пара в котле-утилизаторе (ку)  $m \cdot (h_4 - h_5) = h_6 - h_9$   $m := \frac{h_6 - h_9}{h_4 - h_5} = 8.265 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг пара}}$

Удельная теплота, подводимая к ПГУ:  $q_1 := m \cdot (h_3 - h_2) = 7655.13 \text{ кДж/кг воды}$

Удельная полезная работа газовой части ПГУ:  $l_{\text{ГТУ}} := (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) = 423.91 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная полезная работа пароводяной части ПГУ:  $l_{\text{ПТУ}} := (h_6 - h_7) - (h_9 - h_8) = 1322.94 \text{ кДж/кг воды}$

Термический КПД парогазового энергетического блока:  $\eta_{\text{ПГУ}} := \frac{m \cdot l_{\text{ГТУ}} + l_{\text{ПТУ}}}{q_1} = 63.05 \%$

где  $m = 8.265 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг пара}}$  (отношение расхода газа к расходу воды и водяного пара),

$l_{\text{ГТУ}} = 423.913 \text{ кДж/кг газа}$  (удельная работа газовой турбины),

$m \cdot l_{\text{ГТУ}} = 3503.62 \text{ кДж/кг воды}$  (удельная работа газовой турбины на кг воды и водяного пара),

$l_{\text{ПТУ}} = 1322.94 \text{ кДж/кг воды}$  (удельная работа паровой турбины),

$m \cdot l_{\text{ГТУ}} + l_{\text{ПТУ}} = 4826.55 \text{ кДж/кг воды}$  (удельная работа газовой и паровой турбины) и

$q_1 = 7655.13 \text{ кДж/кг воды}$  (удельная теплота, подведенная к ПГУ).

Рис. 6. Расчет термического КПД парогазового цикла

На рис. 4 в начале расчета приведена схема парогазовой установки и T, s – диаграммы термодинамических циклов (газотурбинного и пароводяного), в нем задействованных. Эти диаграммы «мертвые» в том смысле, что изменение исходных параметров установки (см. операторы присваивания справа и слева от схемы цикла на рис. 4) не приводит к соответствующим изменениям на диаграммах. Но на сайтах <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd> (цикл Ренкина) и <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/GTU.xmcd> (цикл Брайтона) приведены «живые» диаграммы, меняющие свой вид при изменении исходных параметров циклов. Более того, на сайте цикла Ренкина на перегретом паре можно выбирать оси диаграмм и строить не только двухмерные, но и трехмерные диаграммы, прибавляя к температуре и удельной энтропии давление, например. Но отобразить на одной «живой» диаграмме два цикла – пароводяной и газовый сложно из-за того, что у рабочих тел этих циклов (водяной пар и смеси газов) базовые точки по давлению и температуре при подсчете энтальпии и энтропии разные.

Как уже подчеркивалось в начале статьи, расчет термодинамических циклов невозможен без знания свойств рабочих тел, задействованных в этих циклах. Все функции,



возвращающие термодинамические свойства воды и водяного пара, необходимые для расчета цикла Ренкина на перегретом паре, как уже отмечено выше, собраны на сайте, показанном на рис. 2. Эти функции можно скачать с сайта и задействовать их в расчете копированием и вставкой. Эти функции также можно разместить на рабочем компьютере или в локальной компьютерной сети, а затем делать *ссылки* на соответствующие Mathcad-файлы, чтобы эти функции стали *видимыми* в расчетах. Но можно, повторяем, поступить и так: сделать ссылку не на свой компьютер и не на свою локальную сеть, а на сайт, показанный на рис. 2.

Так и было сделано в расчете, показанном на рис. 4. Перед расчетом удельной энтальпии ( $h_6$ ) и удельной энтропии ( $s_6$ ) перегретого водяного пара были сделаны ссылки на файлы с именами `wspHPT.xmdz` и `wspSPT.xmdz`, хранящиеся на сайте, показанном на рис. 2. После этого в расчете функции с такими именами стали видимыми и стали возвращать удельную энтальпию ( $H$ ) и удельную энтропию ( $S$ ) водяного пара в зависимости от давления (первый аргумент функций –  $P$ ) и температуры (второй аргумент –  $T$ ). Таким же образом были сделаны соответствующие ссылки на все файлы-функции, необходимые в расчете (на рис. 4 это не показано), что позволило рассчитать термический КПД паровой части нашего бинарного цикла – см. окончание расчета, показанного на рис. 4. Файлы и имена функций по свойствам воды и водяного пара имеют префикс `wsp`.

Аналогичным образом были сделаны «облачные» ссылки на файлы-функции, возвращающие термодинамические свойства второго рабочего тела нашего бинарного цикла – см. рис. 5. Здесь расчет должен быть более сложным. Дело в том, что первое рабочее тело (вода и водяной пар) в процессе своего обращения в цикле меняет только свои параметры и фазовое состояние. Рабочее же тело второго цикла бинарной установки меняет дополнительно свой состав: воздух – смесь воздуха с топливом – дымовые газы. На сайте авторов есть расчеты газотурбинных циклов различной степени сложности, учитывающие изменение состава рабочего тела, степень влажности исходного воздуха и другие нюансы. Один из таких расчетов читатель может увидеть на сайте по адресу [http://twomas.mpei.ac.ru/mas/Worksheets/orlov/gases/simple\\_gtu.mcd](http://twomas.mpei.ac.ru/mas/Worksheets/orlov/gases/simple_gtu.mcd). В расчете же, показанном на рис. 5, рабочим телом является воздух стандартного состава – см. первый оператор присваивания на рисунке: `af:="Air"`. В данную строковую константу можно записывать обозначения и других газов ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  и т.д.), а также газовых смесей. Файлы и имена функций по свойствам отдельных газов и газовых смесей имеют префикс `wspg`.

На рис. 4 и 5 показаны расчеты термических КПД цикла Ренкина на перегретом водяном паре и газотурбинного цикла (цикла Брайтона) в случае, если бы они работали сепаратно с исходными параметрами, показанными в начале рис. 4.

На рис. 6 показан расчет термического КПД бинарного цикла (см. его схему на рис. 4), где часть тепла выхлопа газовой турбины ( $Q_{1'}$ ) тратится в котле-утилизаторе на генерацию из питательной воды (точка 9) острого перегретого пара (точка 6). Контроль за теоретической возможностью этого процесса ведет оператор `if` (если), вставленный в расчет газовой турбины – см. четвертую строку снизу на рис. 6: температура уходящих газов из газовой турбины ( $T_4$ ) должна быть выше температуры острого водяного пара, поступающего в паровую турбину ( $T_6$ ). В противном случае переменной  $h_4$  (удельная энтальпия газа, выходящего из газовой турбины) присваивается не численное, а строковое ("Error") значение, что прерывает дальнейший расчет, сообщением об ошибке.

Три момента, на которые следует обратить внимание при рассмотрении расчетов, показанных на рис. 4, 5 и 6.

1. Все функции по термодинамическим свойствам рабочих тел в вышеотмеченных расчетах *размерные*. Это означает, что аргументы функции имеют размерности давления, температуры и т.д. и возвращают размерные величины: удельная энтальпия, удельная энтропия и т.д. Механизм размерностей поддерживается в среде инженерного калькулятора Mathcad, что существенно повышает эффективность расчетов и предохраняет от возможных ошибок, когда в расчет подставляется величина с ошибочной единицей измерения (атмосферы технические вместо атмосфер физических, например) или даже с другой размерностью (температура вместо давления, например).

2. Вышеприведенные расчеты оперируют не только размерностями (масса, длина и др.) и единицами измерений (килограмм, метр и др.), но и *физическими величинами*, имеющими одинаковую размерность и, следовательно, одинаковые единицы их измерения. При расчетах бинарных циклов удельные термодинамические величины, в частности, энтальпию и энтропию относят к единице массы рабочего тела, измеряемого килограммами. Но килограмм воды и/или водяного пара и килограмм воздуха или дымового газа это разные килограммы, относящиеся к разным физическим величинам. С учетом этого, а также в целях предотвращения возможных ошибок в расчете и повышения его «читабельности» в расчет введены разные единицы измерения удельной энтальпии и удельной энтропии воды и/или

водяного пара – кДж/кг пара, кДж/(кг пара·К) и воздуха – кДж/кг газа, кДж/(кг газа·К). Благодаря этому, например, сложение удельной работы паровой турбины ( $I_{пгу}$ ) и удельной работы газовой турбины ( $I_{гту}$ ) даст не ошибочный числовой результат, а сообщение об ошибке: «Складываются разные физические величины». Вследствие этого, в частности, такая важная в расчетах бинарных циклов величина  $m$  (отношение массового расхода рабочего тела первого цикла к массовому расходу рабочего тела второго цикла) перестает быть безразмерной величиной – см. рис. 6.

3. В теплотехнических расчетах под значение температуры обычно резервируют две переменные –  $T$  и  $t$ . Считается, что переменная  $T$  хранит значение температуры по абсолютной шкале Кельвина, а  $t$  – по шкале Цельсия. У нас же в расчетах, показанных на рис. 4 и 5, под температуру зарезервирована одна переменная  $T$  с индексом, отмечающим точку бинарного цикла, где эта температура задается или рассчитывается. При этом значение температур отображается только по шкале Цельсия. Эта особенность (отказ от обозначения одной величины двумя разными переменными в зависимости от единицы измерения) связана с тем, что инженерный калькулятор Mathcad при расчете по формулам с размерными величинами по умолчанию автоматически переводит их к базовым единицам международной системы СИ: мегапаскаля к паскалям, шкалу Цельсия к шкале Кельвина, килоджоули или калории к джоулям и т.д., оставляя пользователю возможность вводить и выводить величины на экране дисплея и на бумаге принтера с удобными для него единицами.

Чтобы описанные в статье функции, стали доступны в расчетном документе, следует выполнить следующие действия:

1. Зайти на портал расчетного сервера НИУ МЭИ ([www.vpu.ru/mas](http://www.vpu.ru/mas)) и в оглавлении среди интерактивных справочников выбрать позицию «Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики»<sup>6</sup>. Затем в открывшемся справочнике выбрать пункт «Показать структуру справочника согласно его оглавлению».
2. В открывшемся окне (см. рис. 2) выбрать нужную для расчетов функцию.
3. Щелкнуть правой кнопкой мыши по выбранной функции.
4. Во всплывающем окне выбрать пункт «Свойства» («Properties»), выделить и скопировать соответствующий интернет-адрес (URL).

<sup>6</sup> К моменту выхода этой статьи в свет появится комплекс бумажный справочник плюс портал в Интернете «Свойства и процессы рабочих тел и материалов атомной энергетики», в котором по технологии, описанной в статье, будут размещены соответствующие функции.

5. В Mathcad-документе, где необходимо использовать данную функцию, нужно выбрать пункты меню «Вставка» («Insert») и затем «Ссылка» («Reference»). В появившемся окне необходимо вставить скопированный ранее адрес.
6. Теперь для того чтобы использовать нужную функцию достаточно написать ее имя и имеющиеся исходные данные в качестве аргументов функции, например  $wsp_{НРТ}(13 \text{ МПа}, 800 \text{ К})$ . Данная функция при ее вызове вернет значение удельной энтальпии водяного пара при указанных параметрах.

Таким образом, можно сделать доступными все функции, необходимые для конкретного теплотехнического расчета. Данный расчет будет работать на любом компьютере с установленной программой Mathcad и имеющем доступ в Интернет. Сам Mathcad-файл задачи, описанной в статье, можно скачать из Интернета по адресу <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/Web-Function-PGU.xmcdz>.

Пользователь компьютера при желании может щелкнуть левой кнопкой мышки по любой ссылке, показанной на рис. 2 и 3, загрузить и открыть данный Mathcad-документ, хранящий соответствующую функцию, для автономной работы с ней. Этот документ можно сохранить на рабочей станции (на своем компьютере) или в локальной компьютерной сети своей организации и ссылаться уже на него в новом месте хранения – не в Интернете (в «облаках»), а в локальном («приземленном») месте. Это делается в том случае, если связь с Интернетом не вполне надежна или ограничена. Но в этом случае лучше сразу «загрузить» на свой компьютер *все* функции по свойствам рабочих веществ теплоэнергетики, запросив диск у разработчиков или обратившись один раз к сайту WaterSteamPro (о ней упоминалось в начале статьи).

Технологии *ссылок* и *скачивания*, описанные в данной статье, имеют свои плюсы и минусы. Компромиссная (промежуточная) информационная технология – это установка на своем компьютере программы WaterSteamPro и регулярное ее обновление. Если же теплотехнические расчеты ведутся на компьютерах с надежной связью с Интернетом, то можно применять технологию ссылок, описанную в данной статье. Технология ссылок на Интернет-функции открывает пользователям доступ к богатому набору других полезных теплоэнергетикам функций, размещенных на расчетном сервере НИУ МЭИ – ООО «Триеру».

Данная работа выполняется в рамках проекта Национальный исследовательский университет МЭИ: «Информационная поддержка энергетики, энергоэффективности и

энергосбережения – создание центра по теплофизическим свойствам веществ и решений для энергетики».

### ***Литература:***

1. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009 (<http://twt.mpei.ac.ru/gbtp>)
2. Александров А.А., Очков В.Ф., Орлов К.А., Очков А.В. Теплофизические свойства воды и водяного пара в Интернете // Промышленная энергетика № 2, 2007 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WspIn>).
3. Александров А.А., Очков В.Ф., Орлов К.А. Уравнения и программы для расчета свойств газов и продуктов сгорания // Теплоэнергетика, № 3, 2005
4. Очков В.Ф. Теплотехнический справочник в Интернете // Новое в российской электроэнергетике, № 5, 2005 ([http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/VPU\\_Book\\_New/mas/NRE\\_5\\_5](http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_Book_New/mas/NRE_5_5))
5. Очков В.Ф., Утенков В.Ф., Орлов К.А. Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика, № 2, 2000
6. Волощук В.А., Очков В.Ф., Орлов К.А. Термодинамическая оптимизация простого бинарного цикла ПГУ с котлом-утилизатором с помощью современных информационных технологий // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический университет", №2, 2010 г. С. 102-106.
7. Орлов К.А., Волощук В.А., Очков В.Ф. Сетевой, интерактивный, открытый расчет газотурбинной энергетической установки // Автоматизация и ИТ в энергетике, №2, 2010
8. Очков В.Ф., Александров А.А., Волощук В.А., Дорохов Е.В., Орлов К.А. Интернет-расчеты термодинамических циклов // Теплоэнергетика, № 1, 2009
9. Очков В.Ф., Александров А.А., Орлов К.А., Волощук В.А., Очков А.В. Сетевые расчеты процессов и циклов теплоэнергетических установок // Новое в российской электроэнергетике, №10, 2008
10. Очков В.Ф., Орлов К.А., Знаменский В.Е. Теплотехнические расчеты с опорой на Интернет-функции по свойствам рабочих веществ теплоэнергетики // Новое в российской электроэнергетике, № 6, 2011