

# Облачные функции по теплофизическим свойствам воды и водяного пара

---

В. Очков

В настоящее время бурно развиваются так называемые “облачные” информационные технологии. Пользователи компьютеров благодаря данной технологии теперь могут держать прикладные программы и файлы с данными не только на индивидуальных носителях (рабочих станциях, планшетах, смартфонах, переносных дисках, флешках и т.д.), на сервере локальной сети своей организации, но и в “облаках” – на внешних серверах. Если раньше при создании новой фирмы (в том числе с научно-технической направленностью) необходимо было арендовать помещение, устанавливать в нем сервер и рабочие станции сотрудников, соединять компьютеры в локальную сеть, обеспечивать сервер проводным выходом в интернет и т.д., то сейчас достаточно снабдить сотрудников мобильными устройствами (ноутбуками или планшетами) с беспроводным выходом в интернет – в том числе и на “облачный” сервер, на котором абонируются дисковое пространство и необходимые программные средства для осуществления профессиональной деятельности. Сотрудники такой современной фирмы (НИИ, инженерное бюро, КБ и т.д.) могут работать на дому, собираясь периодические встречи в бизнес-центрах<sup>1</sup> или даже в обычных кафе.

Такие кардинальные изменения в использовании компьютеров в производстве, научной и инженерной деятельности коснулись и баз данных по теплофизическим и прочим свойствам веществ, без знания которых невозможно вести научно-технические расчеты.

Специалисты НИУ МЭИ и ОИВТ РАН разработали и внедрили в научно-техническую практику “облачную” технологию работы с базами данных по теплофизическим свойствам веществ, в частности, воды и водяного пара – основного рабочего тела и теплоносителя энергетики [1].

Как эта технология реализуется?

На “облачном” сервере по адресу <http://twf.mpei.ru/tthb><sup>2</sup> хранится файл с именем H2O и расширением xmc dz (xmc d и mcd). Этот файл создан с помощью инженерного калькулятора

---

<sup>1</sup> Автор наблюдал такую трансформацию фирмы true#, которую основал изобретатель Mathcad Аллан Раздоу (Allan Razdow). Сначала фирма арендовала помещение под офис, где мы встречались первый раз. Вторая же встреча автора статьи и изобретателя Mathcad проходила в бизнес-центре города Кебриджа, созданного для поддержки тех, кто перестал снимать помещения под офисы и перешел на «облачные» технологии общения с сотрудниками.

<sup>2</sup> Этот адрес запомнить несложно: twf – аббревиатура кафедры технологии воды и топлива МЭИ (mpei), ru – Россия, tthb – справочник (hb – handbook) по теплотехнике и теплоэнергетике (tt). Даниил Хармс в такой ситуации говорил, что его телефон запомнить несложно – 32-08 – тридцать два зуба и восемь пальцев.

Mathcad [2] и хранит порядка  $60^3$  функций, возвращающих теплофизические свойства воды и водяного пара. Эти функции имеют суффикс wsp (Water and Steam Properties) и корень, состоящий из сочетания заглавных латинских букв, фиксирующих следующие входные и выходные параметры:

D (Density) – плотность;

V (Volume) – удельный объем (величина, обратная плотности);

T (Temperature) – температура;

P (Pressure) – давление;

$C_p$  – удельная изобарная теплоемкость;

$C_v$  – удельная изохорная теплоемкость;

H – удельная энтальпия;

S – удельная энтропия или (Steam) водяной пар или (Saturation) состояние насыщения;

W – (Water) – вода и т.д.

Кроме того, в именах могут присутствовать и сокращения: Sat (saturation, насыщение) и другие, которые легко понять в контексте рассматриваемой функции.

Подсоединяются эти “облачные” функции к рабочему документу Mathcad командой **Ссылка** из меню Mathcad **Вставка** – см. рис. 1.

---

<sup>3</sup> На конец февраля 2015 года. Число этих функций непрерывно увеличивается.

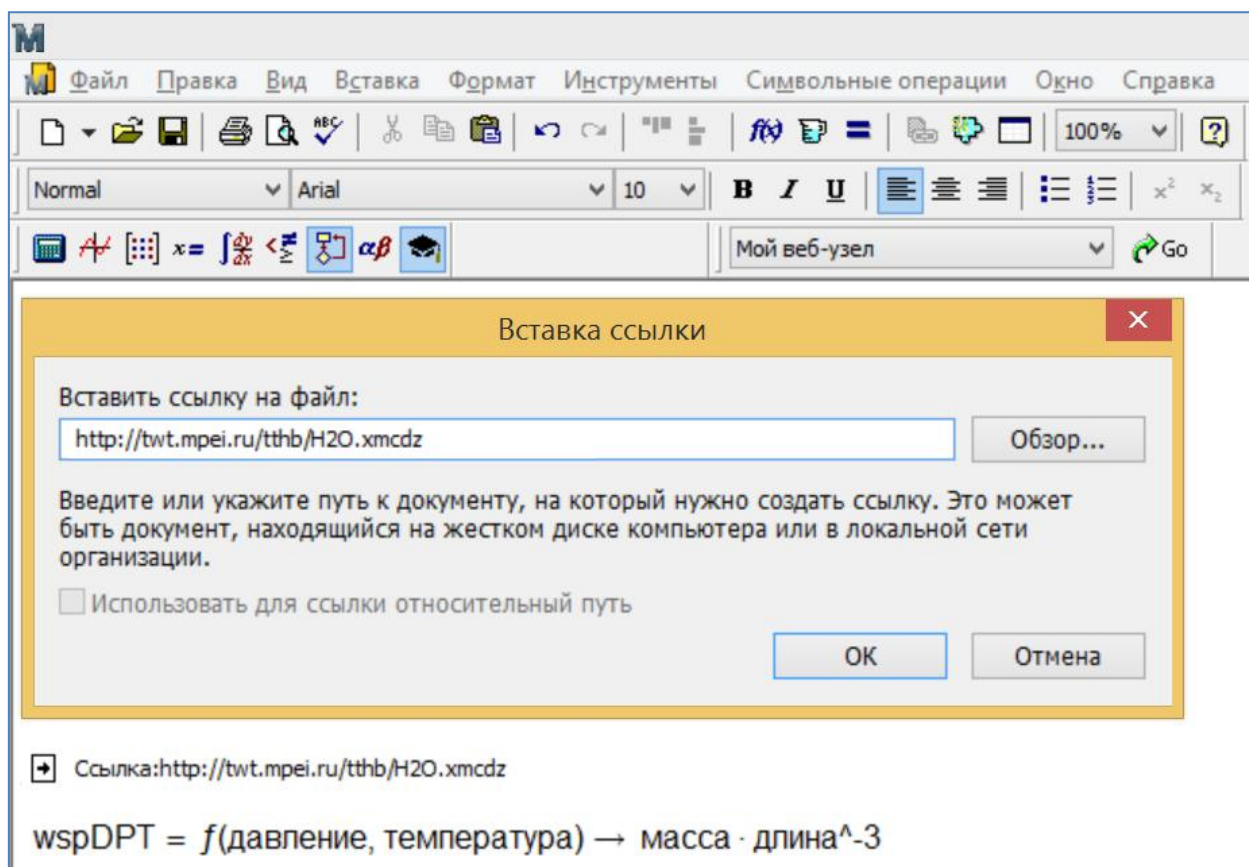


Рис. 1. Вставка “облачных” функций по теплофизическим свойствам воды и водяного пара в рабочий документ Mathcad.

После такой ссылки в рабочем документе становятся видимыми функции с суффиксом *wsp* и сочетанием вышеотмеченных букв в корне. Если, например, пользователю компьютера нужна функция, возвращающая плотность воды и водяного пара (*D*) в зависимости от давления (*P*) и температуры (*T*), то он сначала должен убедиться, что соответствующая функция есть в файле *H2O*. Для этого достаточно в среде Mathcad набирать сочетание букв *wspDPT* (или *wspDTP*), нажать клавишу “=” (вывод численного ответа – см. нижнюю строку на рис. 1). Пакет Mathcad после этого выдаст либо сообщение об ошибке (такой функции нет), либо (как на рис. 1) отметит, что эта функция есть в облачном файле *H2O*, имеет два аргумента с размерностями давления и температуры и возвращает величину с размерностью массы, деленной на длину в кубе (объем). Можно получить весь список функций, собранных в файле *H2O*. Для этого достаточно щелкнуть курсором мыши по ссылке, показанной на рис. 1. После этого файл с именем *H2O* будет скачан с внешнего сервера (“опустится с неба на землю”) и открыт на рабочей станции пользователя.

После того, как пользователь убедился в наличии нужной функции, он может передавать в нее конкретные значения давления и температуры и получать требуемое значение плотности воды и водяного пара. При этом ведется контроль за тем, находятся ли аргументы функции в допустимой области, определяемой формуляцией IAPWS-IF97 [3], по которой данная и другие

функции создавались. Данная формуляция предназначена для промышленного использования. Но в файле H2O есть и функции, основанные на формуляции IAPWS-95, ориентированную на применение в научных целях [4].

Если щелкнуть мышью по ссылке, показанной на рис. 1, то, повторяем, файл с именем H2O будет скачан с “облачного” сервера и открыт на рабочей станции пользователя. Фрагмент этого файла (документа Mathcad) показан на рис. 2.

The image shows a screenshot of a Mathcad document with two main sections, each starting with a lock icon and a title. The first section is titled "Specific entropy of saturated steam (Region 4) as function of temperature". It contains two rows: "Test with SI units" with the equation  $wspSSST(300\text{ }^{\circ}\text{C}) = 5.70576 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$  and "Test with US units" with the equation  $wspSSatST(300\text{ }^{\circ}\text{F}) = 1.63539 \frac{\text{BTU}}{\text{lb }^{\circ}\text{R}}$ . The second section is titled "Specific entropy of saturated water (Region 4) as function of temperature". It contains two rows: "Test with SI units" with the equation  $wspSSWT(120\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1.52782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$  and "Test with US units" with the equation  $wspSSatWT(300\text{ }^{\circ}\text{F}) = 0.43724 \frac{\text{BTU}}{\text{lb }^{\circ}\text{R}}$ . All equations are highlighted in green.

Рис. 2. Фрагмент файла H2O

Файл H2O состоит из заголовка (на рис. 1 он не показан) и свернутых именованных областей, в которых хранятся функции с суффиксом wsp. Сразу за областями помещены примеры вызова этих функций с разными значениями аргументов и различными единицами измерений. Сами же области закрыты паролем от доступа. Доступ к ним может быть только по разрешению владельца файла. Файл H2O можно разместить на рабочей станции или в локальной компьютерной сети организации пользователя. Так поступают в том случае, когда нет постоянного выхода в интернет или он ограничен по соображениям кибербезопасности. Но ссылка на "облачный" файл предпочтительней по следующей важной причине. Дело в том, что файл H2O непрерывно совершенствуется – в нем исправляются ошибки, он оптимизируется, в нем появляются новые функции и т.д.

Что можно делать с функциями файла H2O?

Во-первых и главных, их можно вызывать в своих Mathcad-расчетах конкретных процессов, аппаратов и технологий, где требуются знания теплофизических свойств воды и

водяного пара. Так на рис. 3 можно видеть расчет термического КПД паротурбинной установки с опорой на облачные функции H2O.

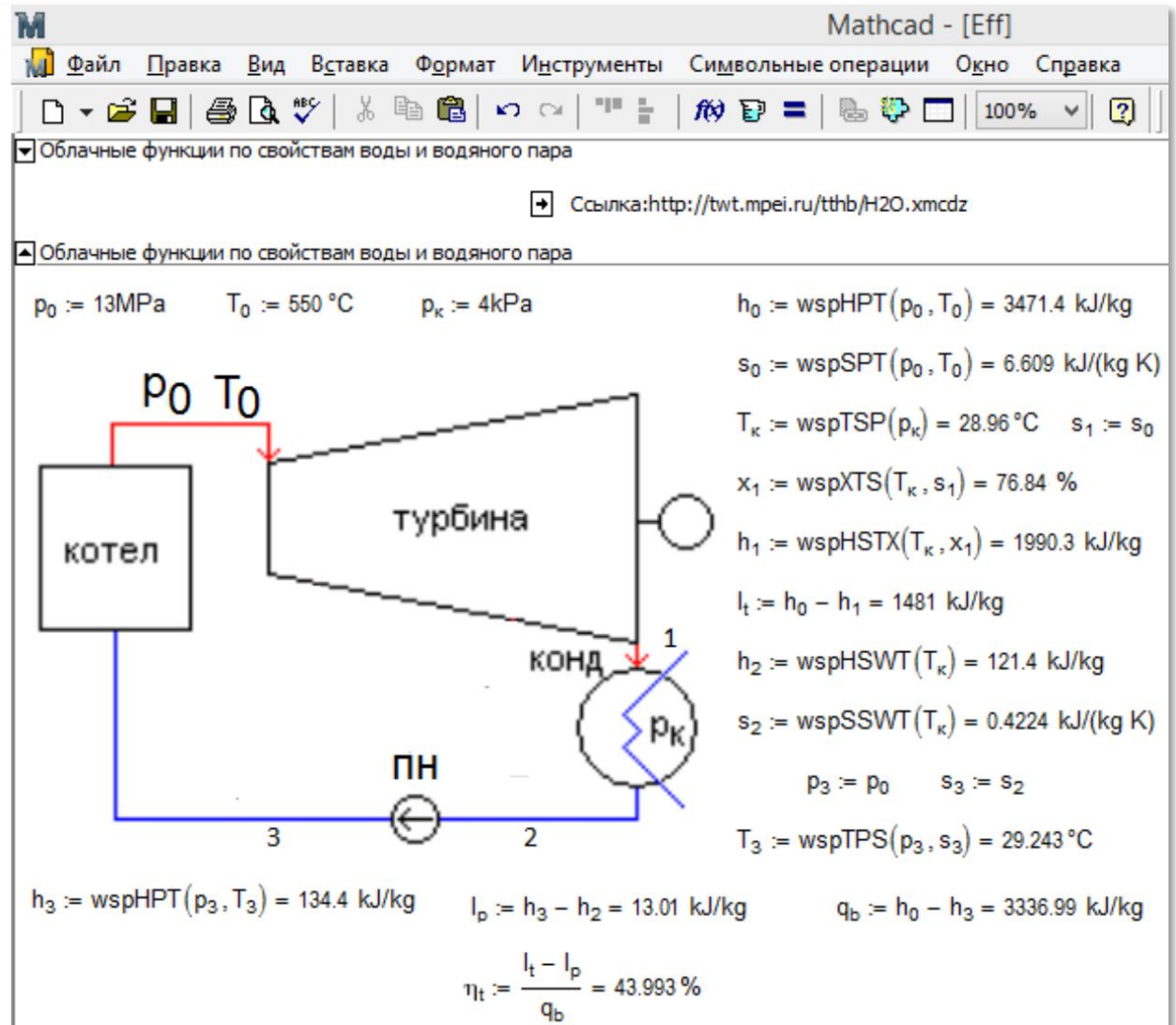


Рис. 3. Расчет паротурбинного энергетического блока с использованием облачных функций H2O

Расчет несложный, тем не менее для его реализации [5] потребовались восемь функций из файла H2O, возвращающими термодинамические свойства воды, влажного и сухого (однофазного) водяного пара:

1.  $\text{wspHPT}$  — удельная энтальпия (h) воды и водяного пара в зависимости от давления (P) и температуры (T);
2.  $\text{wspSPT}$  — удельная энтропия (s) воды и водяного пара в зависимости от давления (P) и температуры (T);
3.  $\text{wspTSP}$  или  $\text{wspTSatP}$  — температура (T) воды на линии насыщения в зависимости от давления (P);
4.  $\text{wspXTS}$  — степень сухости (x) влажного пара в зависимости от температуры (T) и удельной энтропии (s);
5.  $\text{wspHSTX}$  или  $\text{wspHSatTX}$  — удельная энтальпия (h) влажного пара в зависимости от температуры (T) и степени сухости (x);

6.  $wsp_{HSWT}$  или  $wsp_{HSatWT}$  — удельная энтальпия (h) на линии насыщения (s) воды (w) в зависимости от температуры;
7.  $wsp_{SSWT}$  или  $wsp_{SSatWT}$  — удельная энтропия (s) на линии насыщения (s) воды (w) в зависимости от температуры;
8.  $wsp_{TPS}$  — температура (T) в зависимости от давления (P) и удельной энтропии (s).

Во-вторых, на базе функций H2O можно создавать новые собственные пользовательские функции. Пример: в файле H2O есть функция  $wsp_{HPT}$  (или  $wsp_{HTP}$ ), возвращающая удельную энтальпию в зависимости от давления и температуры, но нет функции  $wsp_{HPS}$ , возвращающей удельную энтальпию в зависимости от давления и удельной энтропии. Создать эту недостающую функцию несложно, имея под рукой дополнительную функцию  $wsp_{TPS}$  (температура, как функция давления и удельной энтропии) и “основную” функцию  $wsp_{HPT}$ . На рис. 4 показано, как недостающая функция  $wsp_{HPS}$  создается через инструмент *вложения* одной  $wsp$ -функции как аргумента другой.

Specific enthalpy as function of pressure and specific entropy

$$wsp_{HPS}(p, s) := wsp_{HPT}(p, wsp_{TPS}(p, s))$$

Test with SI units     $wsp_{HPS}(20\text{atm}, 2.3300495 \text{ kJ}/(\text{kg K})) = 852.563 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Рис. 4. Вложение, как инструмент создания новых  $wsp$ -функций

Другой способ создания недостающих  $wsp$ -функций опирается на механизм обратных функций.

Пример. В файле H2O есть базовая (прямая<sup>4</sup>) функция  $wsp_{HPT}$  (удельная энтальпия; как функция давления и температуры), но нет обратной функции  $wsp_{PTH}$  (давление, как функция температуры и удельной энтальпии). Аналитическими методами такую задачу решить практически невозможно, т.к. “прямые” функции, созданные по формуляциям IAPWS-IF 97, представляют собой полиномы высокой степени. Обратную функцию  $wsp_{PTH}$  можно создать численно, используя инструменты поиска нулей функций, встроенный в пакет Mathcad.

На рис. 5 показано создание функции  $wsp_{PTH}$  с опорой на встроенную в Mathcad функцию  $root$ , возвращающую значение второго своего аргумента (p – давление), при котором функция ( $wsp_{HPT}(p, T) - h$ : разность заданного и вычисленного значений энтальпии) станет равна нулю с точностью 0.001 Дж/кг (умолчание, которое можно нарушить, задав другое значение точности численного поиска нуля функции).

<sup>4</sup> Прямая в том смысле, что в формуляции IAPWS-IF97 входными параметрами являются давление и температура. Альтернативная же формуляция IAPWS-95, опирается на плотность и температуру.

Ссылка: <http://twf.mpei.ru/tthb/H2O.xmcdz>

### Функция: удельная энтальпия воды и водяного пара

$$\text{wspHPT} = f(\text{давление, температура}) \rightarrow \text{время}^2 \cdot \text{длина}^2$$

Первая обратная функция существует

$$\text{wspPTH} = f(\text{давление, время}^2 \cdot \text{длина}^2) \rightarrow \text{температура}$$

Вторая обратная функция не существует

$$\text{wspPTH} = \dots \quad \text{wspPHT} =$$

Эта переменная не определена.

Создание второй обратной функции

$$\text{wspPTH}(T, h) := \begin{cases} p \leftarrow 1 \text{ MPa} \\ \text{root}(\text{wspHPT}(p, T) - h, p) \end{cases}$$

Вызов созданной второй обратной функции

$$T := 555 \text{ }^\circ\text{C} \quad h := 3355 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p := \text{wspPTH}(T, h) = 25.033 \text{ MPa}$$

Проверка правильности расчета  
(с максимальным числом значащих цифр)

$$h_1 := \text{wspHPT}(p, T) = 3355.0000000000000000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Рис. 5. Создание обратной wsp-функции

Примечание. На рис. 5 размерность удельной энтальпии пакетом Mathcad интерпретируется не как кДж/кг, а в упрощенном виде – квадрат времени, деленный на квадрат длины. Так иногда поступает и человек, неоправданно упрощая составные единицы измерения. Пример. Теплопроводность мы измеряем в  $\text{W}/(\text{m K})$ , а не более правильными  $\text{W m}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Созданную функцию  $\text{wspPTH}$  (рис. 5), как и функцию  $\text{wspHPS}$  (рис. 4) можно, конечно внести в файл  $\text{H}_2\text{O}$ , но тут возникает один важный нюанс.

Дело в том, что многие обратные функции могут иметь (возвращать) не одно, а несколько значений, зависящих от первого приближения при численном ее определении. Это связано, не только со спецификой численных методов задания обратных, но и самой их физической сутью. Так из рис. 5 видно, что поиск обратного значения функции  $\text{wspHPT}$  велся при первом значении

давления равном 1 МПа. При других начальных значениях давления функция  $wsp_{PTH}$  может возвращать другие значения, связанные, повторяем, не только со спецификой численного метода, заложенного в функцию  $root$ , но и с самими свойствами воды и водяного пара, который может иметь одинаковые параметры при однофазном и двухфазном состояниях. Поэтому пользователю “облачного” файла H<sub>2</sub>O предоставляется возможность самому определять область задания некоторых обратных функций через первое приближение к решению.

#### Литература:

1. Очков В.Ф. Современные тенденции публикации баз данных по термодинамическим свойствам веществ // Материалы XIV РОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ) ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВЕЩЕСТВ (РКТС-14): в 2 т. – Казань: Изд-во "Отечество", 2014 (Т.1: Пленарные и устные доклады.) С. 15-16 (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Conf-T-Prop-10-2014.pdf>)
2. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. БХВ-Петербург, 2009. - 512 с. ([http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad\\_14/RusIndex.html](http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad_14/RusIndex.html))
3. Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, J. Eng. Gas Turbines & Power 122, 150-182 (2000) (<http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html>).
4. Wagner, W., and Pruß, A., The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, J. Phys. Chem. Ref. Data 31, 387-535 (2002) (<http://www.iapws.org/relguide/IAPWS-95.html>)
5. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / Под общ. ред. В.Ф. Очкова. Издательство БХВ-Петербург. 2014. – 336 с. (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html>)