

Свойства воды и водяного пара: сетевые, открытые, интерактивные IT-ресурсы

© 2015 г. Очков В.Ф.^{1,2}, Орлов К.А.^{1,2}, Александров А.А.¹, Очков А.В.¹

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”¹ –

Объединенный институт высоких температур РАН²

e-mail: ochkov@twf.mpei.ac.ru

Рассмотрены новые тенденции при публикации данных о теплофизических свойствах веществ на примере воды и водяного пара – основного рабочего тела и теплоносителя тепловой и атомной энергетики. Приведены достоинства и недостатки как традиционного подхода к публикации данных о свойствах веществ в бумажном виде, так и современного – в электронном виде на сайтах в Интернете. Описаны важные требования к публикации в электронном виде: данные должны быть представлены в виде сетевых открытых и интерактивных расчетов с примерами их использования. Дан критический анализ соответствующих интернет-ресурсов. Описаны некоторые аспекты работы Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (International Association on the Properties of Water and Steam – IAPWS). Приведены конкретные примеры возможных путей создания современных IT-ресурсов по расчетам свойств веществ: бумажный справочник, расчетная программа для установки на компьютере, расчетные документы для скачивания с сайта и использование серверных расчетов на основе технологий Mathcad Calculation Server на сайте НИУ МЭИ и SMath на сайте электронного издательства Elsevier.

Ключевые слова: теплофизические свойства веществ, рабочих тел и теплоносителей ТЭС и АЭС, теплотехнические расчеты, Mathcad, SMath, Интернет, IAPWS, Elsevier, Knovel.

DOI: 10.1134/S0040363615050094

В настоящее время в связи с бурным развитием информационных технологий уже недостаточно иметь описание теплофизических свойств веществ в виде “статичных” таблиц, графиков или формул (формуляций – набора формул, таблиц и графиков с инструкциями по их применению), публикуемых в журнальных статьях, бумажных справочниках и на сайтах Интернета. Сейчас необходимо, чтобы эти базы данных были “живыми”: *сетевыми, открытыми и интерактивными*. Что это означает?

Почти все компьютеры специалистов, которым требуются данные по свойствам веществ, подсоединены к Интернету. Это реальность наших дней. И если какому-либо инженерно-техническому или научному работнику нужна справка о свойствах того или иного вещества, включая воду и водяной пар, то его рука тянется не к полке со справочниками и журнальными статьями, а к... мышке компьютера. Да, нужную справку в Интернете можно найти довольно легко и быстро.

¹ 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14. НИУ МЭИ.

² 125412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2. ОИВТ РАН.

Но тут приходится с сожалением иметь в виду то, что у Интернета есть и такая нелестная характеристика: Интернет – это “всемирная свалка”, куда зачастую выбрасывают (выкладывают) все, что нужно и не нужно, мало заботясь о достоверности выкладываемой информации. Но нужно упомянуть и тот факт, что многие археологические раскопки, по которым мы воссоздаем историю нашей цивилизации, велись именно на свалках, возникших вблизи городов и поселений древних людей. Можно предположить, что будущие исследователи станут воссоздавать историю, включая и историю наших ошибок и заблуждений, копаясь именно в архиве Интернета...

Нелишним будет также отметить и тот факт, что термины “бумажный” и электронный (интернетовский) не совсем однозначно связаны с понятием “достоверный”, так как и на бумажных носителях (в журнальных статьях, справочниках и других носителях информации), увы, можно также найти неточную информацию, даже если это строго рецензируемые издания.

Но в Интернете есть много довольно надежных источников, и далее именно о них в данной статье будет идти речь.

В настоящее время исследователь, публикуя свои данные по свойствам веществ, должен заботиться о том, чтобы они появлялись и в “бумажном” и в электронном (сетевом) виде. “Бумажные” издания (журнальные статьи, монографии, справочники, разного рода руководства и нормативные документы) имеют свои неоспоримые преимущества. Дело в том, что при всей оперативности и доступности Интернета традиционная техническая книга еще не скоро сдаст свои позиции. Ее (сшитые бумажные листы в мягком или твердом переплете) можно подарить коллегам, друзьям и близким, представить на творческий конкурс (на конкурс по замещению должности в вузе или НИИ, на получение ученого звания и т.д. и т.п.), что пока нельзя сделать с сайтом Интернета, у которого свои неоспоримые преимущества. Это возможность оперативного исправления ошибок и опечаток и дополнения новыми материалами, цветными иллюстрациями, трехмерными схемами, анимацией и, что очень важно и о чем пойдет речь в данной статье, “живыми” расчетами. Не будем спорить, что лучше – книга или сайт, а будем активно использовать преимущества этих двух медийных продуктов и стараться обходить их недостатки. В пользу бумажной книги (журнала) обычно приводят еще один довод – с такой книгой (журналом) можно валяться на диване, открыть в дороге и т.д. Но в настоящее время появились электронные книги и планшетные компьютеры с хорошей связью с Интернетом, с которыми также можно “валяться на диване, открыть в дороге”, а также дополнительно делать в них электронные закладки, вести оперативный поиск и... расчеты.

Об электронной (интернетовской) форме публикации, как правило, заботится издатель журнала. Но нередко это делает и сам автор, размещая на личном сайте не только свои статьи и книги, но и другие вспомогательные материалы: рецензии, ранние версии статей, ссылки на “живые” расчеты и др. Но часто вход читателей (пользователей) на эти интернет-ресурсы затруднен из-за их небесплатности и/или требований регистрации. Барьером тут зачастую выступает не стоимость допуска на тот или иной интернет-ресурс (она может быть невысокая), а сама процедура входа, требующая регистрации и передачи личных данных или данных места работы (включая данные о банковской карте и др.) на внешние серверы. Это один из аспектов *открытости* публикаций.

Открытость подразумевает под собой тот факт, что если по данным о свойствах веществ ведется *расчет (интерактивность* – см. далее), то должны быть видимы все *формулы* и промежуточные результаты расчетов с оценкой по возможности погрешности (неопределенности).

Промежуточные данные необходимы не только для контроля правильности расчетов. Они важны также и для тех посетителей сайтов, кто хочет по опубликованным формулам создать свою собственную программу для расчета свойств веществ. Промежуточные данные помогут быстро локализовать и исправить в создаваемой программе ошибку, если она имела место.

Интерактивность как характеристика современных баз данных подразумевает возможность не только изменения посетителем сайта исходных параметров вещества (давление, температура, плотность и т.п.), но и *прикрепления* соответствующей функциональной зависимости к своей программной оболочке, а также автономную работу со скачанной с сайта функцией (процедурой, шаблоном), ее модификацию (уточнение, корректировку допустимого диапазона параметров, создание вложенных и обратных функций, дополнение комментариями и др.). Но главное, под интерактивностью следует понимать возможность вставки скачанных функций, процедур и шаблонов в свои прикладные расчеты, где необходимы эти данные о свойствах веществ. А именно для этого такие данные создаются, собираются, анализируются, обрабатываются и публикуются...

Суть триады “сетевой–открытый–интерактивный” будет проиллюстрирована далее на примере одного из самых распространенных веществ – воды и водяного пара.

За сбор и обобщение теплофизических данных такого рода отвечает Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара IAPWS – www.iapws.org, в которой активно работают авторы этой статьи. Эта некоммерческая самоуправляемая организация ежегодно собирается на рабочие встречи³, а раз в 4–5 лет проводит научные конференции.

На этих встречах обсуждаются и утверждаются формуляции по свойствам воды и водяного пара, которые затем становятся национальными и отраслевыми стандартами при проведении тех или иных расчетов процессов, аппаратов и технологий с использованием этой субстанции. И нет такой отрасли промышленности, где вода не применялась бы в качестве теплоносителя, растворителя, рабочего тела и т.д. Чему, например, равна плотность воды при атмосферном давлении и температуре 80°C?! Для ответа на этот вопрос лучше всего обратиться к первоисточнику: взять соответствующую формуляцию IAPWS, утвержден-

³ В 2014 г. такая встреча прошла в Москве (см. <http://iapws.org/news/Press2014.pdf>). В 2015 г. она будет проходить в Стокгольме, а в 2016 г. – в Дрездене (см. <http://iapws.org/meetings.html>). В настоящее время председателем этой авторитетной организации является профессор НИУ МЭИ – Т.И. Петрова.

ную в 1997 г. и уточненную в 2007 г., для промышленного использования IAPWS-IF97 [1], и по приведенным в ней формулам сделать соответствующие расчеты. Или обратиться к таблицам или графикам, созданным по этим расчетам и опубликованным в разнообразных справочниках. Расчеты, представленные в формуляциях, довольно сложны и, как правило, не годятся для ручных вычислений. Так, для расчета плотности воды в зависимости от ее давления и температуры по формуляции IAPWS-IF97 нужно вычислить полином 34-й степени с коэффициентами, имеющими 14 знаков в мантиссе (см. ниже рис. 5). И это далеко не самая сложная и объемная формула формуляции IAPWS-IF97, по которой рассчитываются свойства воды и водяного пара. В околокритической области (Region 3 формуляции IAPWS-IF97), например, расчет плотности воды в зависимости от давления и температуры ведется с разбивкой на 24 подобласти, в каждой из которых плотность вычисляется по своей формуле. По формуляциям IAPWS после их утверждения публикуются справочники, создаются компьютерные программы коммерческого и некоммерческого характера⁴. Традиционные формуляции – это “статичный” документ: он “не реагирует на внешние воздействия” – в нем нельзя изменить исходные данные и получить новый ответ. В формуляциях детально описана методика расчетов и даны таблицы с контрольными цифрами расчетов и погрешностями. Компьютерная программа – это “живой” объект, с помощью которого можно считать, но документом его назвать нельзя, так как в нем детально не расписана сама методика расчетов и возможны компьютерные ошибки (опечатки в программном коде). Это противоречие в настоящее время по инициативе и при активном участии авторов этих строк пытаются устранить Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара.

Раньше формуляции IAPWS печатались на пишущих машинках, затем набирались в типографиях и рассылались всем заинтересованным организациям и лицам, а также поступали в открытую продажу. И сейчас на сайте IAPWS можно найти такие старые формуляции в виде отсканированных желтых машинописных страниц с несколькими размытыми буквами. Тексты и числовые константы с такого документа нельзя скопировать щелчками мышки.

Затем с развитием информационных и компьютерных технологий формуляции стали публиковать в виде текстовых файлов, из которых уже можно было без особых проблем копировать числовые константы для вставки их в выполняемые расчеты и создаваемые компьютерные програм-

мы. Это существенно ускорило процесс создания компьютерных программ, снизило риск ошибок, неизбежных при “ручном” (визуальном) переносе цифр из формуляции в создаваемую программу. Средством публикации таких формуляций стала свободно распространяемая оболочка Adobe Reader (www.adobe.com), а сами формуляции хранились в файлах с расширением pdf, которые несложно сгенерировать с помощью того же Word, установленного практически на каждом компьютере. Но формуляции по-прежнему оставались “статичными”.

В 2007 г. на встрече рабочих групп IAPWS в г. Люцерн (Швейцария) одним из авторов этой статьи впервые была продемонстрирована в Интернете “живая” формуляция новой методики – расчета ионного произведения воды и водяного пара в зависимости от температуры и давления. Этот “живой” расчет был сделан в среде инженерного калькулятора Mathcad и опубликован в Интернете с помощью инструмента Mathcad Calculation Server [2] (рис. 1).

Расчет, показанный на рис. 1, довольно прост. Тем не менее при его оформлении в виде “статичной” формуляции была допущена ошибка, которую исправили в процессе создания “живого” расчета, показанного на рис. 1. Дело в том, что эта формуляция готовилась с опорой на языки программирования, в которых не используется инструментарий физических величин и единиц их измерения. Пакет Mathcad же работает с этим инструментом и не позволяет “складывать сантиметры с градусами”, что очень облегчает создание и отладку расчетов.

Отсюда первый вывод: формуляции по свойствам веществ нужно оформлять в виде “живых” расчетов хотя бы для того, чтобы выявить возможные ошибки, опечатки и вычислительные неточности, незаметные в “статичных” формуляциях. Такие ошибки, увы, нередко встречаются в научно-технических публикациях. Их тексты скрупулезно вычитываются редакторами и корректорами, но формулы обделены таким вниманием.

Этот первый “живой” расчет (см. рис. 1), которым было предложено дополнить традиционную формуляцию, члены IAPWS поначалу восприняли без особого энтузиазма и даже настороженно. Дело в том, что в IAPWS существует негласное правило не выделять и не рекламировать ту или иную коммерческую компьютерную программу для расчетов по формуляциям IAPWS.

Но со временем, после докладов на очередных рабочих встречах и конференциях IAPWS [3, 4], технология “живых” расчетов, дополняющая “статичные” формуляции, была наконец-то воспринята и вошла в арсенал IAPWS. На рис. 2 можно видеть одну из страниц официального сайта IAPWS с формуляцией 1997 г. для расчета термодинамических свойств воды и водяного пара.

⁴ Подобная авторская программа – это программа WaterSteamPro (www.wsp.ru).

<http://twtmass.mpei.ac.ru/mas/Worksheets/wspKwTPo.mcd>
The Ionization Constant of H₂O - IAPWS Formulation
 0 °C ≤ T ≤ 800 °C
 T := °C °C K <http://iapws.org/relguide/Ionization.pdf>

The ideal gas ionization constant
 $\gamma_0 := 6.141500 \cdot 10^{-1}$ $\gamma_1 := 4.825133 \cdot 10^4 \text{ K}$
 $\gamma_2 := -6.770793 \cdot 10^4 \text{ K}^2$ $\gamma_3 := 1.010210 \cdot 10^7 \text{ K}^3$
 $[pK_w^G] := \gamma_0 + \frac{\gamma_1}{T} + \frac{\gamma_2}{T^2} + \frac{\gamma_3}{T^3} = 80.892$ $0 \leq \rho \leq 1.25 \text{ g/cm}^3$
 $\rho :=$ g/cm^3

The ionization constant of water
 $\alpha_0 := -0.864671$ $\alpha_1 := 8659.19 \text{ K}$ $\alpha_2 := -22786.2 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-2/3} \cdot \text{K}^2$
 $Q := \rho \cdot \exp\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T} + \frac{\alpha_2}{T^2} \cdot \rho^{2/3}\right) \cdot \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} = 5.196 \times 10^5$
 $M_w := 18.015268 \cdot \frac{\text{g}}{\text{mole}}$ $m_0 := 1 \frac{\text{mole}}{\text{kg}}$ $n := 6$
 $\beta_0 := 0.642044 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$ $\beta_1 := -56.8534 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \text{ K}$ $\beta_2 := -0.375754 \frac{\text{cm}^6}{\text{g}^2}$
 $pK_w := -2 \cdot n \cdot \left[\log(1 + Q) - \frac{Q}{Q+1} \cdot \rho \cdot \left(\beta_0 + \frac{\beta_1}{T} + \beta_2 \cdot \rho \right) \right] + [pK_w^G] + 2 \cdot \log(m_0 \cdot M_w)$
 T = 600 K = 326.85 °C $\rho = 0.7 \text{ g/cm}^3$ $pK_w = 11.203153$

Рис. 1. “Живой” расчет ионного произведения воды в зависимости от температуры и плотности

На этой странице сайта IAPWS (см. рис. 2) дтыаны ссылка на официальный документ (pdf of document), затем краткое его описание (Description) и ссылки на “живые” расчеты (Online Calculation) по отдельным областям формуляции (Regions):

- Region 1 – вода;
- Region 2 – водяной пар;
- Region 3 – околоскритическая область;
- Region 4 – состояние насыщения;
- Region 5 – водяной пар при высоких температурах и др.

На рис. 3 в качестве примера показаны фрагменты “живого” расчета термодинамических свойств воды (Region 1): вводятся (с выбором нужных единиц измерения) давление и температура, вычисляются значение безразмерной свободной энергии Гиббса (уже упоминавшийся по-

лином 34-й степени) и значения ее частных производных по давлению (показано на рис. 3) и температуре (не показано на рис. 3) при заданных параметрах воды. Затем по известным формулам, содержащим частные производные свободной энергии Гиббса по давлению и/или температуре, рассчитываются термодинамические характеристики воды в данной точке: плотность (ρ), а также (это не показано на рис. 3) удельная внутренняя энергия (u), удельная энтропия (s), удельная энтальпия (h), удельная изохорная теплоемкость (c_v), удельная изобарная теплоемкость (c_p) и скорость звука (w). Весь расчет помещен в Интернете по адресу <http://twt.mpei.ac.ru/mcs/worksheets/iapws/IAPWS-IF97-Region1.xmcd>. Подобные “живые” расчеты авторами данной статьи созданы и для других областей базовой формуляции IAPWS-IF97, а также для других

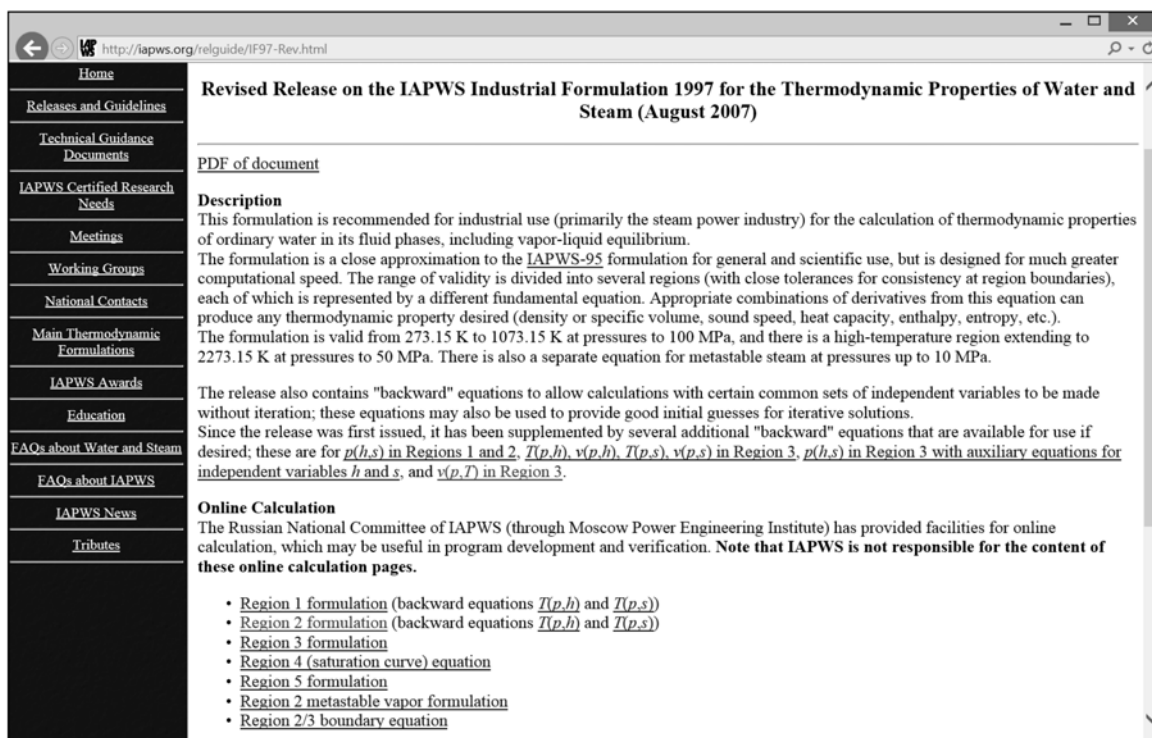


Рис. 2. Страница сайта IAPWS со ссылками на “живые” расчеты по термодинамическим свойствам воды и водяного пара

формуляций, например по транспортным свойствам воды и водяного пара.

По “живым” формуляциям, как уже отмечено, очень удобно, сравнивая промежуточные вычисления, отлаживать создаваемую прикладную программу по расчету свойств воды и водяного пара. Такую формуляцию можно также использовать в качестве справки: интерактивно вводить новые значения давления и температуры и получать характеристики этой субстанции в данной точке, не обращая внимания на промежуточные результаты расчетов. Если же промежуточные данные совсем не нужны, то можно зайти на другие подобные авторские расчетные сайты (см. <http://twf.mpei.ac.ru/gbtp>), где выдается только конечный результат, а заданная точка может дополнительно отображаться на семействе кривых или на поверхности, что позволяет лучше понимать зависимости свойств воды и водяного пара от давления, температуры и/или других параметров.

Потребность скачивания файлов с расчетами по свойствам воды и водяного пара удовлетворяется через сайт авторского справочника по термодинамическим свойствам рабочих тел теплоэнергетики <http://twf.mpei.ac.ru/gbtp> [5], одна из страниц которого приведена на рис. 4.

На сайте, показанном на рис. 4, не только даны ссылки на “статичные” формуляции и “живые” расчеты, подобные тому, какой отображен

на рис. 1, но и предусмотрена дополнительная возможность скачивания файлов для математических программ Mathcad (версии Mathcad 15 и Mathcad Prime) и SMATH Studio (российский клон Mathcad – см. www.smath.info). Главное преимущество последней программы состоит в том, что она во многом повторяет идеологию и интерфейс популярной программы Mathcad, но является бесплатной. Примерно так, как это делается в отношении программы Adobe Reader, о которой упомянуто выше. На рис. 5 показана SMATH-функция с именем `wspD1PT`, возвращающая значение плотности (D) воды (область I) в зависимости от давления (p) и температуры (T). Суффикс `wsp` в имени этой и других подобных функций означает Water/Steam Properties – свойства воды и водяного пара. На рис. 5 показана только часть значений векторов J и n , являющихся коэффициентами полинома 34-й степени, по которому, как уже было отмечено, рассчитываются безразмерная удельная энергия Гиббса и ее частные производные по давлению (π) и температуре (τ).

Подобные свободно распространяемые функции созданы и для других областей формуляции IAPWS-IF97 и иных сочетаний исходных параметров (см. рис. 4). Эти функции можно вставлять в свои расчеты и решать прикладные задачи, одна из которых показана на рис. 6, где отображен расчет термического КПД паротурбинного цикла.

Input parameters

Pressure := 1 atm Temperature := 4 °C

Recalculate

The dimensionless Gibbs free energy

$$\gamma := \sum_{i=1}^{34} \left[n_i \cdot (7.1 - \pi)^{l_i} \cdot (\tau - 1.222)^{j_i} \right] = -1.634103395456 \times 10^{-4}$$

The partial derivatives of the dimensionless Gibbs free energy

$$\gamma_{\pi} := \sum_{i=1}^{34} \left[-n_i \cdot l_i \cdot (7.1 - \pi)^{l_i-1} \cdot (\tau - 1.222)^{j_i} \right] = 0.129232718254$$

Thermodynamic properties

Density: $\rho := \frac{p}{R \cdot T \cdot \pi \cdot \gamma_{\pi}} = 999.975407296488 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Рис. 3. “Живой” расчет по термодинамическим свойствам воды (Region 1 – см. рис. 1)

Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. - М.: Издательский дом МЭИ. 2009

Издательство МЭИ в 2015 году готовит новое издание справочника

Формуляция по области 1 (основное уравнение для жидкости) IAPWS-IF97:

- Описание формуляции в справочнике >>>
- “Живой” расчет в среде Mathcad Application Server 11 >>>
- “Живой” расчет в среде Mathcad Calculation Server 14 вариант 1 вариант 2
- “Живой” расчет в среде Mathcad Calculation Server 14 по обратным функциям $T(p, h)$ и $T(p, s)$
- Скачать Mathcad 14 файл >>>
- Функция $wspH1PT(p, T)$: удельная энтальпия (H) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath (download SMath Studio)
- Функция $wspS1PT(p, T)$: удельная энтропия (S) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspV1PT(p, T)$: удельный объем (V) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspD1PT(p, T)$: плотность (D) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath (пример задачи в среде пакета SMath с функцией $wspD1PT$)
- Функция $wspP1DT(D, T)$: давление (P) как функция плотности (D) и температуры (T) Mathcad 14/15 (пример ссылки на функцию) | Mathcad Prime | SMath
- Плотность воды при $p = 0.1$ МПа: “живой” расчет в среде Mathcad Calculation Server 14 >>> | Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspT1PH(p, h)$: температура (T) как функция давления (P) и удельной энтальпии (H) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspT1PS(p, s)$: температура (T) как функция давления (P) и удельной энтропии (S) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspP1HS(h, s)$: давление (P) как функция удельной энтальпии (H) и удельной энтропии (S) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspU1PT(p, T)$: внутренняя энергия (U) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspCP1PT(p, T)$: удельная изобарная теплоемкость (C_p) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspCV1PT(p, T)$: удельная изохорная теплоемкость (C_v) как функция давления (P) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath
- Функция $wspW1PT(p, T)$: скорость звука (W) как функция давления (p) и температуры (T) Mathcad 14/15 | Mathcad Prime | SMath

Рис. 4. Сайт информационной поддержки расчетов по термодинамическим свойствам воды

```

Function wspD1PT
wspD1PT(p, T) :=
    tau := 1386 K / T
    pi := p / 16.53 MPa
    Y_pi := "The partial derivative with pressure of the dimensionless Gibbs free energy"
    I := (0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 8 8 21 23 29 30 31 32)
    J := (-2 -1 0 1 2 3 4 5 -9 -7 -1 0 1 3 -3 0 1 3 17 -4 0 6 -5 -2 10 -8 -11 -6 -29)
    n := (1.4632971213167 · 10-1 -8.4548187169114 · 10-1 -3.756360367204 3.385516916838)
    sum_{i=1}^{34} (-n_i · I_i · (7.1 - pi)^{I_i - 1} · (tau - 1.222)^{J_i})
    R := 0.461526 kJ / (kg K)
    p / (R · T · pi · Y_pi)
    
```

$p = 20 \text{ MPa}$ $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho = \text{wspD1PT}(p, T) = 967.4333 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Рис. 5. Функция, возвращающая плотность воды, созданная в среде SMath

Цикл простейший – без промежуточного перегрева пара, без отборов пара из турбины на подогрев питательной воды и других мероприятий по повышению КПД. Тем не менее этот расчет потребовал вставки в него (см. свернутые области со знаком плюс; на рис. 5 такая область раскрыта: плюс превратился в минус) одиннадцати функций с суффиксом wsp, по аббревиатуре которых несложно понять их сущность (*H* – энтальпия, *P* – давление, *T* – температура, *S* – энтропия, пар (Steam) или насыщение (Saturation), *W* – вода и *X* – степень сухости):

- 1) *H2PT* – удельная энтальпия водяного пара в зависимости от давления и температуры;
- 2) *S2PT* – удельная энтропия в зависимости от давления и температуры;
- 3) *TSP* – температура на линии насыщения в зависимости от давления;
- 4) *SSWT* – удельная энтропия воды на линии насыщения в зависимости от температуры;
- 5) *SSST* – удельная энтропия сухого насыщенного водяного пара в зависимости от температуры;
- 6) *XTS* – степень сухости влажного пара в зависимости от температуры и удельной энтропии (она создана с опорой на функции *SSWT* и *SSST*);
- 7) *HSWT* – удельная энтальпия воды на линии насыщения в зависимости от температуры;
- 8) *HSST* – удельная энтальпия сухого насыщенного водяного пара в зависимости от температуры;
- 9) *HSTX* – удельная энтальпия влажного водяного пара в зависимости от температуры и степе-

ни сухости (она создана с опорой на функции *HSWT* и *HSST*);

10) *TIPS* – температура воды в зависимости от давления и удельной энтропии;

11) *HIPT* – удельная энтальпия воды в зависимости от давления и температуры.

Еще одно обстоятельство заставляет пристально присматриваться к программе SMath. Дело в том, что на эту математическую программу обратило внимание крупнейшее в мире электронное издательство Elsevier (www.elsevier.com), планирующее использовать пакет SMath в качестве инструмента дополнения технических справочников и научно-технических статей, публикуемых на сайте Elsevier для свободного или платного доступа, *интерактивными расчетами*. Посетители сайта Elsevier могут не только видеть и анализировать “статичные” формулы в электронных версиях книг, справочников и статей, но и считать по этим формулам, переносить их в свои расчеты.

На рис. 7 в качестве примера приведен один такой расчет с сайта Elsevier, созданный одним из авторов этой статьи⁵. Для расчета мощности насоса нужно знать плотность перекачиваемой жидкости (в данном случае воды) для того, чтобы вычислить объемный расход по массовому расходу воды. В расчет, показанный на рис. 7, вставлена функция, отображенная на рис. 5, которая возвращает плотность воды в зависимости от давления и

⁵ Он уже давно сотрудничает с фирмой Knovel, которая в настоящее время стала частью издательства Elsevier.

$p_0 = 13 \text{ MPa}$ $T_0 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

Решение:

— функция $wspH2PT$ Удельная энтальпия водяного пара на входе в турбину:
 $h_0 := wspH2PT(p_0, T_0) = 3471.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

— функция $wspS2PT$ Удельная энтропия водяного пара на входе в турбину:
 $s_0 := wspS2PT(p_0, T_0) = 6.6087 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

— функция $wspTSP$ Температура в конденсаторе:
 $T_{cond} := wspTSP(p_{cond}) = 32.88 \text{ }^\circ\text{C}$

— функция $wspTSP$ Удельная энтропия водяного пара на выходе из турбины (идеальный процесс расширения пара в турбине):
 $s_1 := s_0 = 6.609 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

— функция $wspSSWT$
 — функция $wspSSST$
 — функция $wspXTS$ Степень сухости водяного пара на выходе из турбины:
 $x_1 := wspXTS(T_{cond}, s_1) = 0.7745$

— функция $wspHSST$
 — функция $wspHSWT$
 — функция $wspHSTX$ Удельная энтальпия водяного пара на выходе из турбины Удельная работа турбины:
 $h_1 := wspHSTX(T_{cond}, x_1) = 2014.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $l_{turb} := h_0 - h_1 = 1456.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

— функция $wspHSST$ Удельная энтальпия воды на линии насыщения при температуре в конденсаторе:
 $h_2 := wspHSST(T_{cond}) = 137.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

— функция $wspSSWT$ Удельная энтропия воды на линии насыщения при температуре в конденсаторе:
 $s_2 := wspSSWT(T_{cond}) = 0.4763 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

— функция $wspT1PS$ Давление питательной воды:
 $p_3 := p_0 = 13 \text{ MPa}$

— функция $wspT1PS$ Удельная энтропия питательной воды (идеальный процесс работы насоса):
 $s_3 := s_2 = 0.4763 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

— функция $wspT1PS$ Температура питательной воды:
 $T_3 := wspT1PS(p_3, s_3) = 33.19 \text{ }^\circ\text{C}$

— функция $wspH1PT$ Удельная работа питательного насоса:
 $h_3 := wspH1PT(p_3, T_3) = 150.7799 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

— функция $wspH1PT$ Удельная работа турбины:
 $l_p := h_3 - h_2 = 13.0148 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

— функция $wspH1PT$ Теплота, поступившая в котел:
 $q := h_0 - h_3 = 3320.6098 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

— функция $wspH1PT$ Термический КПД цикла:
 $\eta_t := \frac{l_{turb} - l_p}{q} = 0.4348$

Рис. 6. Расчет термического КПД простейшего паротурбинного цикла на перегретом паре

Power Requirement for a Water Pump

An equation for calculating the power requirement of a water pump as a function of water density. Water density is calculated as a function of its temperature and pressure per IAPWS Formulation for Region 1. This equation can be used for pump selection in a variety of industries, including chemical process and power generation.

Contributed by: Valery Ochkov

References:
http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v?cid:kpASHRAEA2/cid:kt00AFVIV3/viewerType.pdf/root_slug:ashrae-handbook-heating-3?cid:kt00AFVIV3&page=7&b-toc-cid:kpASHRAEA2&b-toc-root_slug:ashrae-handbook-heating-3&b-toc-uri-slug=centrifugal-pumps&b-toc-title=2012%20ASHRAE%20Handbook%20-%20Heating%2C%20Ventilating%2C%20and%20Air-Conditioning%20Systems%20and%20Equipment%20%28SI%20Edition%29

Citations: 1.) 2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (SI Edition). Page 44.7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2012. 2.) International Association for the Properties of Water and Steam, "Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", 2007, Lucerne, Switzerland, <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>

Parameter	Value
Mass flow rate of water	$q_{\text{mass}} = 100 \frac{\text{t}}{\text{hr}}$
Inlet pressure of water	$p_{\text{in}} = 2 \text{ atm}$
Outlet pressure of water	$p_{\text{out}} = 7 \text{ atm}$
Temperature of water	$T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$
Pump efficiency	$\eta_{\text{pump}} = 0.85$

Density of water as a function of p (pressure) and T - oper

Density of water:

$$\rho = \rho_{\text{water}} \left(\frac{p_{\text{in}} + p_{\text{out}}}{2}, T \right) = 965.48 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Flow rate of water:

$$q_{\text{volume}} = \frac{q_{\text{mass}}}{\rho} = 103.5754 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Power requirement for the water pump:

$$N_{\text{pump}} = \frac{q_{\text{mass}} (p_{\text{out}} - p_{\text{in}})}{\rho \cdot \eta_{\text{pump}}} = 17.148 \text{ kW}$$

Рис. 7. Расчет мощности насоса

температуры. На сайте, представленном на рис. 7, есть ссылка на авторитетный справочник по насосам, издаваемый ASHRAE (см. www.ashrae.org), где приведена и подробно описана сама “статичная” формула для расчета мощности насоса. Читатель этого справочника (посетитель сайта Elsevier) может сразу ввести расчет по формулам и перенести эти формулы в свои прикладные расчеты [6–9].

В настоящее время авторы данной статьи предлагают членам IAPWS перейти на описанную новую информационную технологию. В будущем можно надеяться, что появление новой формуляции по свойствам воды и водяного пара будет сопровождаться выкладыванием на сайте IAPWS соответствующих функций, которые тут же можно переносить в свои прикладные и научно-технические расчеты. И площадкой для этой новой информационной технологии может стать сайт издательства Elsevier. Авторы уже передали этой организации 50 функций по свойствам воды и водяного пара и несколько практических расчетов, где эти функции используются. В скором времени они будут протестированы и опубликованы. Пока же эти функции опубликованы только на авторском сайте <http://twf.mpei.ac.ru/rbtp>.

Выводы

1. Современный этап процесса публикации данных о свойствах веществ должен включать в себя процедуру “оживления” всех графиков, таблиц и формул.
2. Авторы данных по свойствам веществ, публикуя статью, монографию или справочник, должны заботиться о том, чтобы все расчеты были “живыми” и дополнялись функциями для скачивания и встраивания их в прикладные программы.
3. Если стандартом публикации “статичных” формуляций по свойствам веществ является текстовый и формульный редактор Adobe Reader, то стандартом публикации “живых” формуляций может стать, например, математическая программа SMath.

Список литературы

1. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. The International Association for the Properties of Water and Steam. Lucerne, Switzerland, Aug. 2007. www.iapws.org.

2. **Очков В.Ф.** Mathcad 14 для студентов и инженеров: рус. версия. БХВ-Петербург, 2009. http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad_14/RusIndex.html
3. **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 // Proc. of the 15th Intern. Conf. of the Properties of Water and Steam. Berlin, Germany, Sept. 7–11, 2008. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Berlin2008.pdf>
4. **Cloud** water and steam functions for industrial applications / V.F. Ochkov, K.A. Orlov, A.V. Ochkov, V.E. Znamensky, G.J. Kondakova // Proc. of the 16th Intern. Conf. of the Properties of Water and Steam. Sept. 1–5, 2013, University of Greenwich, London, UK 2013. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/London-2013.png>
5. **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/rbtp>
6. **Очков В.Ф., Орлов К.А., Чжо Ко Ко.** “Облачные” функции и шаблоны инженерных расчетов для АЭС // Теплоэнергетика. 2014. № 10. С. 68–72. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Thermal-Eng-10-2014-rus.pdf>
7. **Очков В.Ф.** Современные тенденции публикации баз данных по термодинамическим свойствам веществ // Материалы XIV Рос. конф. (с междунар. 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://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Conf-T-Prop-10-2014.pdf>
8. **Очков В.Ф., Чжо Ко Ко.** Облачные функции – новый этап информационной поддержки науки и техники // Cloud of Science. 2014. Т. 1. № 1. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/CloudPE.pdf>
9. **Теплотехнические** этюды с Excel, Mathcad и Интернет / Под общ. ред. В.Ф. Очкова. БХВ-Петербург, 2014. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/ТТМІ>