

«ОБЛАЧНЫЙ» СЕРВИС ПО СВОЙСТВАМ РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**В.Ф. ОЧКОВ (Национальный исследовательский университет “МЭИ”),
Г.Г. ЯНЬКОВ (ЗАО “Издательский дом МЭИ”)**

Обсуждается проблема работы со справочниками в современных условиях Интернет-сообщества. Описана технология Интернет-доступа к научно-технической информации, в частности, к функциям по свойствам рабочих тел и материалов атомной энергетики на удаленном сервере (“в облаках”). Даны примеры решения практических задач.

Национальный исследовательский университет МЭИ, Объединенный институт высоких температур РАН, фирма “Триеру” и Издательский дом МЭИ реализуют комплексный проект – “Справочник + сайт Интернета” по теплофизическим свойствам рабочих тел и материалов атомной энергетики.

Справочник, который выйдет в свет в традиционном “бумажном” виде, будет содержать также информацию о структуре сайта и о принципах работы с ним. Сам же сайт будет кардинально отличаться от подобных сайтов тем, что на нем будут храниться не просто таблицы, графики и наборы формул, отображающие те или иные свойства веществ (такие иллюстрации, как правило, приводятся и в “бумажных” справочниках), а “живые” расчетные документы, позволяющие в on-line режиме менять параметры рабочих тел и веществ (температуру, давление и пр.) и рассчитывать их свойства с отображением при необходимости промежуточных результатов расчета. Создаваемый сайт отличается от подобных сайтов еще и тем, что он хранит набор функций и процедур для расчета теплофизических свойств в популярных программных средствах инженерных и научно-технических расчетов: Excel, Mathcad, Matlab и др. Такое использование может вестись либо через скачивание соответствующих файлов с сайта и встраивания их в то или иное рабочее программное средство для инженерных и научно-технических расчетов, либо через механизм *ссылок* на функции, хранящихся на сайте. На сайте предусмотрены инструментальные средства, позволяющие посетителю сайта самостоятельно генерировать нужные функции и процедуры, учитывая

при этом требуемый диапазон параметров – температур, давлений и пр. Посетитель сайта может познакомиться также с примерами расчетов реальных технологических процессов на АЭС с использованием функциональных зависимостей и процедур, хранящихся в “живой” базе данных.

При создании комплекса использовались данные ведущих мировых научных центров, связанных с проблемой генерирования и хранения баз данных по свойствам материалов и веществ. На страницах сайта приведены соответствующие ссылки на литературу.

Выход “бумажной” версии любого научно-технического издания в настоящее время становится проблематичным как в финансовом, так и в “техническом” плане. В финансовом потому, что после выхода справочника в свет он мгновенно оказывается в Интернете в отсканированном виде для платного, условно платного¹ или даже полностью бесплатного²

¹ Посетитель такого сайта заодно просматривает рекламу и тем самым «оплачивает» услугу по доступу к справочнику. Владелец же сайта компенсирует свои затраты на его создание и поддержку из средств, поступающих от рекламодателя. Тут важно, чтобы реклама была контекстно-зависимой (рекламировались, например, фирмы, связанные с энергетикой) и не очень раздражала посетителей сайта.

² Создатели таких сайтов задались вроде бы благой целью. Они стараются помочь преподавателям, инженерам и студентам, которые не в состоянии купить современную научно-техническую литературу — справочники, учебники и монографии. Их просто нет ни в книжных магазинах, ни в библиотеках провинциальных да и не только провинциальных городов. Если же такие книжные новинки и поступают в продажу, то их цена оказывается неподъемной для многих потенциальных читателей. Цель создания бесплатных сайтов со сканами книг, повторяем, благая. Но с другой стороны, такие сайты подрывают традиционное книгоиздательство. Недаром такие сайты называют пиратскими! Мы не приводим здесь их адреса, во-первых,

доступа. Библиотеки же при учебных заведениях, которые всегда были основными потребителями научно-технической литературы, в настоящее время по многим причинам³ существенно сократили закупки учебной и справочной литературы. Все это приводит к тому, что средства, потраченные на выпуск новой книги, далеко не всегда окупаются. Сейчас выпуск научно-технического издания может быть рентабельным только при некоей спонсорской поддержке⁴. А такая поддержка, как известно, очень ограничена. Из-за этого многие нужные справочники, монографии и учебники не выходят в свет и постепенно устаревают в рукописях или в “головах” потенциальных авторов.

В старое (советское) время автор (преподаватель вуза) мог написать учебник, а потом переиздать его массовыми тиражами и тем самым иметь хороший стабильный доход, нередко превышавший доход по основной работе. В настоящее время написание научно-технической литературы, не может являться каким-либо материальным подспорьем для преподавателей вузов и работников НИИ. Сейчас такие книги пишутся либо из соображений престижа и карьерного роста (звание, профессора, например, нельзя получить, не издав, помимо прочего, учебника), либо с вышеупомянутой спонсорской поддержкой, а то и просто за счет автора. Спонсорская поддержка, кстати, имеет одну негативную сторону. Будущий автор, добившись ее “правдами и неправдами”, и полностью уверенный в том, что книгу опубликует в любом случае, зачастую пишет ее спустя рукава. Из-за этого в свет нередко выходит некачественная литература, а зачастую просто “халтура”. Решением этой проблемы могут быть конкурсы на написание научно-технической литературы и жесткий отбор рукописей экспертным сообществом. Таким путем, кстати, идет Издательский Дом МЭИ, опираясь на спонсорскую поддержку энергетических компаний – Росатом, ФСК, МРСК, различные ОГК и ТГК и др. Подробно эта проблема освещена в [1].

чтобы не делать им рекламу, а во-вторых, чтобы не прослыть, пардон, стукачами. В настоящее время основная борьба идет с сайтами, хранящими нелегальные фильмы, музыкальные произведения и беллетристику. Научно-технической литературы этот процесс пока не коснулся [4]. Но это временное явление.

³ Одна из таких «многих» причин затрагивается в этой статье — это все тот же Интернет.

⁴ Издание [2], например, было выпущено в свет по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (www.rffi.ru).

Проблематичность выпуска “бумажных” справочников в “техническом” смысле, если так можно выразиться, заключается в том, что подобные издания содержат множество формул, графиков и таблиц, которые предназначены не просто для прочтения на бумажном листе, но и для реальной инженерной работы (проектирование, эксплуатация, ремонт технических устройств и др.). Новый плодотворный импульс этому процессу придали современные информационные технологии.

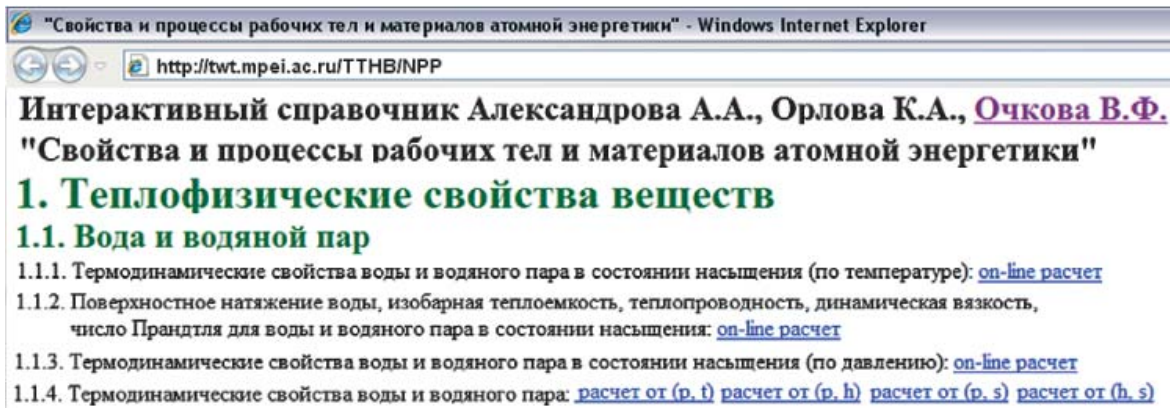
Формулу Интернет-справочника можно сделать “живой” — позволить читателю менять исходные данные и видеть результат [2]. На графике, размещенном в Интернете, можно отметить точку и получать ее координаты, а также построить дополнительные изолинии и т.д. Таблицу в Интернете можно отсортировать по любому полю (столбцу), отфильтровать (убрать лишние строки) и многое другое⁵. Справочник в Интернете с “живыми” формулами, таблицами и графиками практически невозможно скопировать и разместить на другом (“пиратском”) сайте. Он полностью остается в распоряжении владельца, который вправе открыть его для “платного, условно платного или полностью бесплатного доступа”. Но главное заключается в том, что владелец такого сайта является и его создателем, что позволяет ему непрерывно исправлять и дополнять сайт. Кроме того, создатель сайта отвечает за его содержание и может дать определенные гарантии, что генерируемые сайтом данные отвечают стандартам.

С другой стороны, в настоящее время почти все инженерно-технические работники и многие студенты вузов имеют под рукой компьютер с выходом в Интернет, и эта “рука”, в случае чего, тянется за научно-технической справкой и даже за знаниями не к полке с книгами, а к клавишам и мышке компьютера.

Все эти тенденции нашли свое отражение в создаваемом справочнике, который уже “родился” в Интернете (<http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/НРР>)⁶. Авторы надеются, что это “дитя”,

⁵ В электронной версии справочника можно все иллюстрации раскрасить и при необходимости анимировать. Электронную версию справочника можно снабдить гиперссылками, отсылающими читателя не только к нужным фрагментам самого справочника, но и на другие сайты, где данная тема освещена более подробно. Все термины и аббревиатуры электронной версии справочника можно раскрывать и получать исчерпывающее определение и т.д. и т.п.

⁶ Описываемый справочник уже существует в виде “бумажной” рукописи и готовится к изданию. Тут учитывается такой нюанс: “бумажную” книгу можно держать в руках, “нюхать ни с чем не сравнимый запах только что



▲ Рис. 1. Заголовок сайта по свойствам рабочих веществ и материалов атомной энергетики

активно развиваясь, может завоевать общественное признание.

Ниже будут показаны типичные страницы описываемого сайта. На рис. 1 показан его заголовок.

На 17 января 2012 г. на сайте, показанном на рис. 1, размещена следующая информация:

1. Теплофизические свойства веществ.

1.1. Вода и водяной пар.

1.1.1. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре).

1.1.2. Поверхностное натяжение воды, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля для воды и водяного пара в состоянии насыщения.

1.1.3. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению).

отпечатанной книги”, дарить коллегам, а главное, отмечать в списках трудов, подаваемых на различные творческие конкурсы, выборы на должность или при представлении на ученое звание и т.д. С сайтом же, каким бы он ни был прекрасным, пока этого делать нельзя. Дарить точно нельзя, а подавать на конкурс пока нельзя. Возникает очень интересная коллизия — читателям “бумажные” справочники вроде бы уже и не нужны, а нужны они только авторам, издателям и книготорговцам. Тут, правда, некоторые читатели могут возразить, что без “бумажной” книги никак не обойтись. Ее, например, можно читать лежа на диване, в дороге и т.д. На это возражение можно ответить так. Во-первых, появились специальные устройства (ридеры, “читалки”), позволяющие “валяться на диване” и с электронной версией книги. Во-вторых, на сайте справочника можно предусмотреть возможность скачивания и последующего распечатывания и брошюрования “бумажной” версии книги для “дивана”. “Бумажная” книга в эпоху Интернета и ридеров, конечно, не умрет, как не умер театр после появления кинематографа и не умер кинематограф после появления телевидения.

1.1.4. Термодинамические свойства воды и водяного пара: расчет по давлению и температуре, давлению и удельной энтальпии, давлению и удельной энтропии.

1.1.5. Термодинамические свойства метастабильного переохлажденного водяного пара: расчет по давлению и температуре, давлению и удельной энтальпии, давлению и удельной энтропии.

1.1.6. Термодинамические свойства влажного водяного пара.

1.1.7. Динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля, ионное произведение и статическая диэлектрическая проницаемость воды и водяного пара.

1.2. Теплофизические свойства тяжелой воды.

1.2.1. Термодинамические свойства тяжелой воды в состоянии насыщения (по температуре).

1.2.2. Поверхностное натяжение, изобарная теплоемкость, динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля тяжелой воды в состоянии насыщения.

1.2.3. Термодинамические свойства тяжелой воды в состоянии насыщения (по давлению).

1.2.4. Термодинамические свойства тяжелой воды: расчет по давлению и температуре, по плотности и температуре.

1.2.5. Динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля тяжелой воды: расчет по давлению и температуре, по плотности и тем-

- пературе; пакет функций для расчета теплофизических свойств тяжелой воды в Mathcad 14/15.
- 1.3. Теплофизические свойства водорода.
 - 1.3.1. Термодинамические свойства водорода: расчет по давлению и температуре, по плотности и температуре.
 - 1.3.2. Динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля водорода: расчет по давлению и температуре, по плотности и температуре, пакет функций для расчета теплофизических свойств водорода в Mathcad 14/15.
 - 1.4. Теплофизические свойства гелия.
 - 1.4.1. Термодинамические свойства гелия: расчет от давления и температуры, расчет по плотности и температуре.
 - 1.4.2. Динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля гелия: расчет по давлению и температуре, по плотности и температуре. Пакет функций для расчета теплофизических свойств гелия в Mathcad 14/15.
 - 1.5. Теплофизические свойства аргона (планируется добавить ксенон и криптон).
 - 1.5.1. Термодинамические свойства аргона: расчет по давлению и температуре, по плотности и температуре.
 - 1.5.2. Динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля аргона: по давлению и температуре, по плотности и температуре. Пакет функций для расчета теплофизических свойств аргона в Mathcad 14/15.
 - 1.6. Теплофизические свойства воздуха.
 - 1.6.1. Термодинамические свойства воздуха: расчет по давлению и температуре, по плотности и температуре.
 - 1.6.2. Динамическая вязкость, теплопроводность, число Прандтля воздуха: по давлению и температуре, по плотности и температуре. Пакет функций для расчета теплофизических свойств воздуха в Mathcad 14/15.
 - 1.7. Теплофизические свойства свинца.
 - 1.7.2. Термодинамические свойства свинца, пакет функций для расчета теплофизических свойств свинца в Mathcad 14/15.
 - 1.8. Теплофизические свойства висмута.
 - 1.8.1. Термодинамические свойства висмута, пакет функций для расчета теплофизических свойств висмута в Mathcad 14/15.
 - 1.9. Теплофизические свойства галлия.
 - 1.9.1. Термодинамические свойства галлия, пакет функций для расчета теплофизических свойств галлия в Mathcad 14/15.
 - 1.10. Теплофизические свойства эвтектического сплава Pb-Bi.
 - 1.10.1. Термодинамические свойства сплава Pb-Bi, пакет функций для расчета теплофизических свойств эвтектического сплава Pb-Bi в Mathcad 14/15.
 - 1.11. Теплофизические свойства лития.
 - 1.11.2. Термодинамические свойства лития в состоянии насыщения.
 - 1.11.3. Изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение лития в состоянии насыщения, пакет функций для расчета теплофизических свойств лития в Mathcad 14/15.
 - 1.12. Теплофизические свойства натрия.
 - 1.12.1. Термодинамические свойства натрия в состоянии насыщения.
 - 1.12.2. Изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение натрия в состоянии насыщения, пакет функций для расчета теплофизических свойств натрия в Mathcad 14/15.
 - 1.13. Теплофизические свойства калия.
 - 1.13.1. Термодинамические свойства калия в состоянии насыщения.
 - 1.13.2. Изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение калия в состоянии насыщения, пакет функций для расчета теплофизических свойств калия в Mathcad 14/15.
 - 1.14. Теплофизические свойства цезия.
 - 1.14.1. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение цезия, пакет функций для расчета теплофизических свойств цезия в Mathcad 14/15.

- 1.15. Теплофизические свойства урана.
 - 1.15.2. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение урана, пакет функций для расчета теплофизических свойств урана в Mathcad 14/15.
- 1.16. Теплофизические свойства плутония.
 - 1.16.1. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение плутония, пакет функций для расчета теплофизических свойств плутония в Mathcad 14/15.
- 1.17. Теплофизические свойства тория.
 - 1.17.1. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение тория, пакет функций для расчета теплофизических свойств тория в Mathcad 14/15.
- 1.18. Теплофизические свойства диоксида урана.
 - 1.18.1. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение диоксида урана, пакет функций для расчета теплофизических свойств диоксида урана в Mathcad 14/15.
- 1.19. Теплофизические свойства графита.
 - 1.19.1. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение графита, пакет функций для расчета теплофизических свойств графита в Mathcad 14/15.
- 1.20. Теплофизические свойства циркония.
 - 1.20.1. Плотность, изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля и поверхностное натяжение циркония, пакет функций для расчета теплофизических свойств циркония в Mathcad 14/15.
2. Рабочие процессы и циклы атомных установок.
 - 2.1. Расчет суживающего сопла при истечении различных веществ.
 - 2.1.1. Расчет истечения водяного пара из суживающего сопла.
 - 2.1.2. Расчет истечения влажного водяного пара из суживающего сопла.
 - 2.1.3. Расчет истечения метастабильного переохлажденного водяного пара из суживающего сопла.
 - 2.1.4. Расчет истечения воздуха из суживающего сопла.
 - 2.1.5. Расчет истечения гелия из суживающего сопла.
 - 2.1.6. Расчет истечения водорода из суживающего сопла.
 - 2.2. Расчет течения водяного пара через сопло Лавала.
 - 2.2.1. Расчет истечения водяного пара через сопло Лавала.
 - 2.3. Расширение водяного пара в турбине.
 - 2.3.1. Расчет расширения водяного пара в турбине.
 - 2.4. Сжатие обычной и тяжелой воды в насосе.
 - 2.4.1. Расчет сжатия воды в насосе.
 - 2.4.2. Расчет сжатия тяжелой воды в насосе.
 - 2.5. Температура в конденсаторе паровой турбины.
 - 2.5.1. Расчет температуры в конденсаторе паровой турбины.
 - 2.6. Цикл Ренкина на перегретом паре.
 - 2.6.1. Расчет цикла Ренкина на перегретом паре.
 - 2.7. Цикл Ренкина с регенеративными отборами.
 - 2.7.1. Расчет цикла Ренкина с одним регенеративным отбором.
 - 2.7.2. Расчет цикла Ренкина с двумя регенеративными отборами.
 - 2.7.3. Расчет цикла Ренкина с оптимизацией давления в регенеративном отборе.
 - 2.8. Цикл паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР.
 - 2.8.1. Расчет цикла паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР.
 - 2.9. Цикл паротурбинной установки АЭС с реактором РБМК.
 - 2.9.1. Расчет цикла паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР.
 - 2.10. Расходы теплоносителей реактора БН-600.
 - 2.10.1. Расчет расхода теплоносителя I-го контура БН-600.
 - 2.11. Соотношения расходов теплоносителей реактора БРЕСТ-1200.
 - 2.11.1. Расчет соотношения расходов теплоносителей I-го и II-го контуров БРЕСТ-1200.

На рис. 2 в качестве примера показан on-line расчет термодинамических свойств воды и водяного пара в однофазной области (п. 1.1.4 списка, приведенного выше). Во всех “бумажных” справочниках по свойствам воды и водяного пара такие зависимости отображаются в виде таблиц, где независимыми параметрами (значениями боковика и “шапки” таблицы) являются давление и температура. Причем шаг изменения давления и температуры задается, как правило, довольно большим, что часто вынуждает пользователя такого справочника прибегать к интерполяции. Если же в таблице шаг изменения значений давления и температуры делать небольшим, то это увеличивает объем справочника, что делает неудобным не только его использование, но и хранение. Интернет-версия описываемого справочника позволяет определять термодинамические свойства воды и водяного пара в однофазной области в зависимости от давления и температуры, давления и удельной энтальпии, давления и удельной энтропии (рис. 2), а также удельной энтальпии и удельной энтропии. Если же посетитель сайтов задаст⁷ значения двух отмеченных независимых параметров, выходящими из допустимой области или попадающими в двухфазную область, то будет выдано соответствующее сообщение об ошибке. При этом посетитель сайта видит свою рабочую точку на диаграммах состояния воды и водяного пара. Одна из таких диаграмм показана на рис. 3.

⁷ Пользователь сайтов может использовать в качестве десятичного разделителя либо запятую (русская традиция), либо точку (западная традиция).

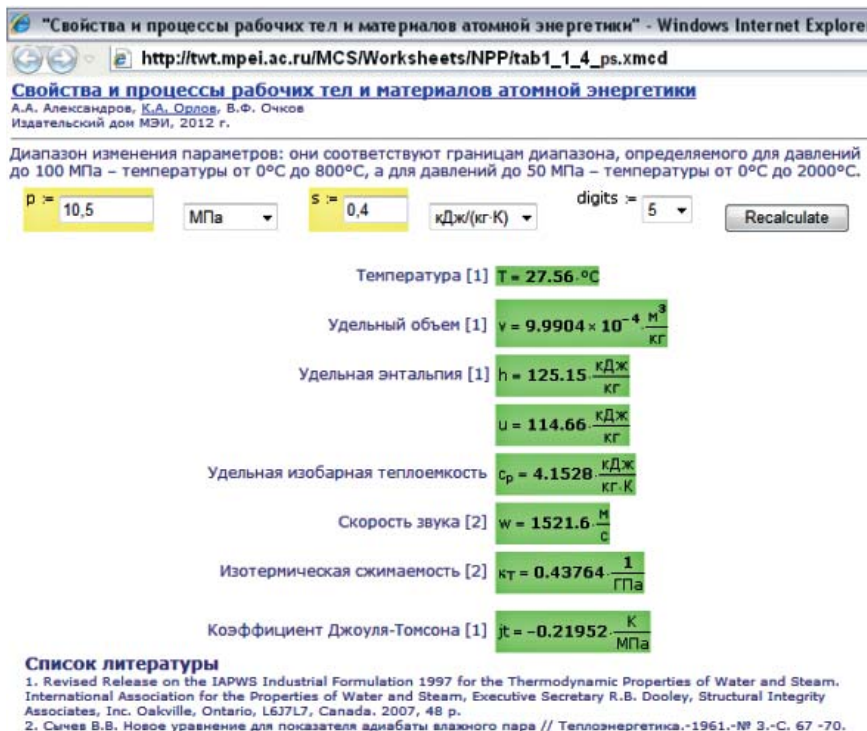


Рис. 2. On-line расчет термодинамических параметров воды и водяного пара

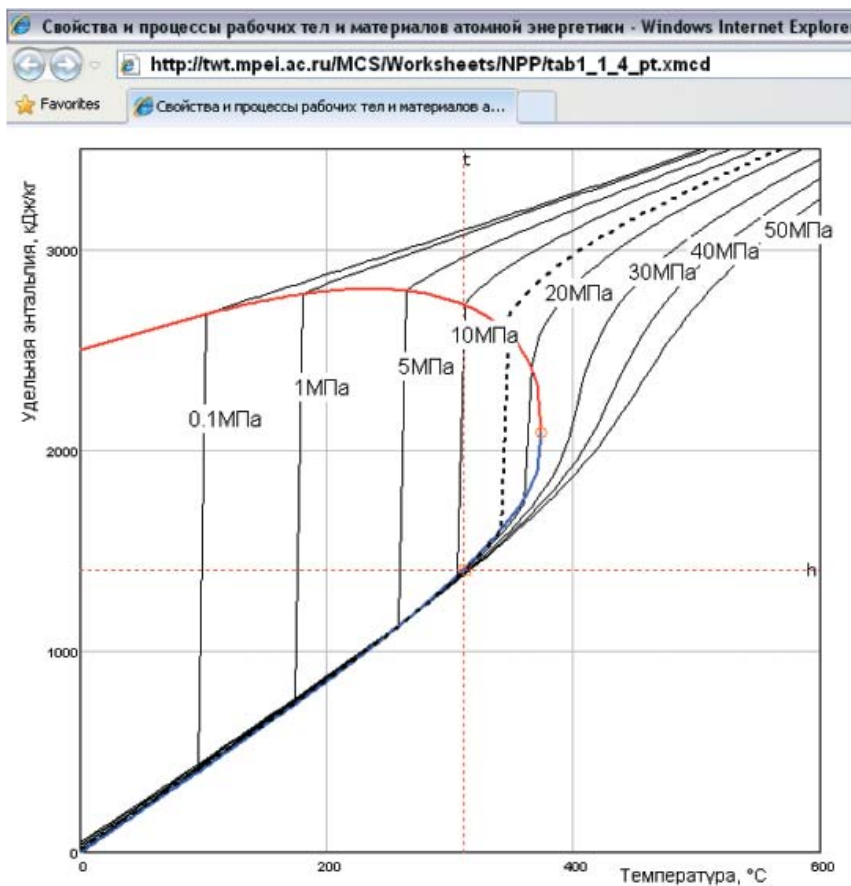


Рис. 3. h, T – диаграмма состояния воды и водяного пара

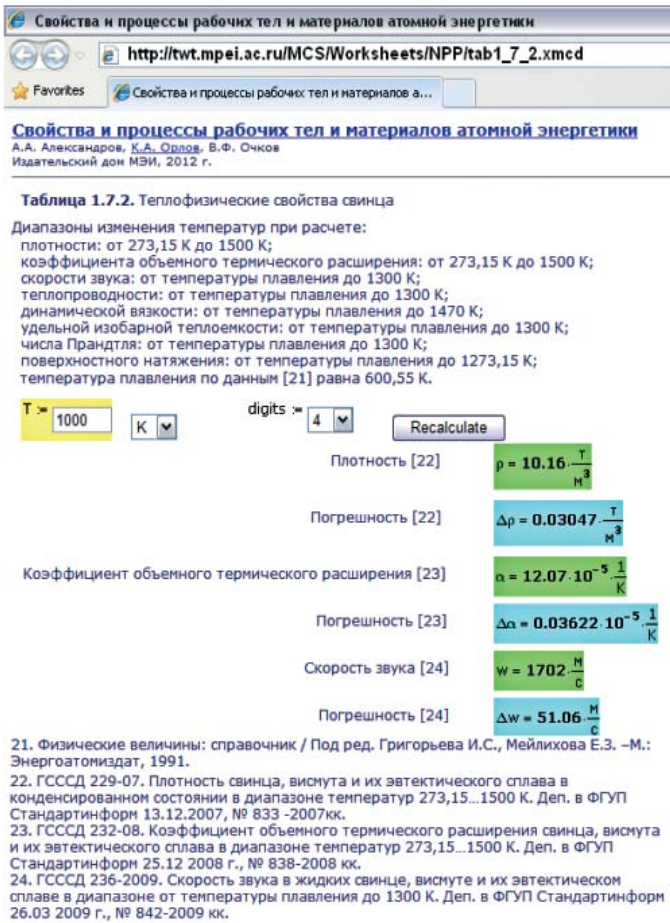


Рис. 4. On-line расчет теплофизических свойств свинца

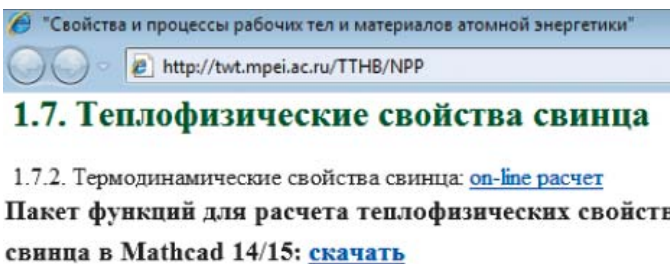
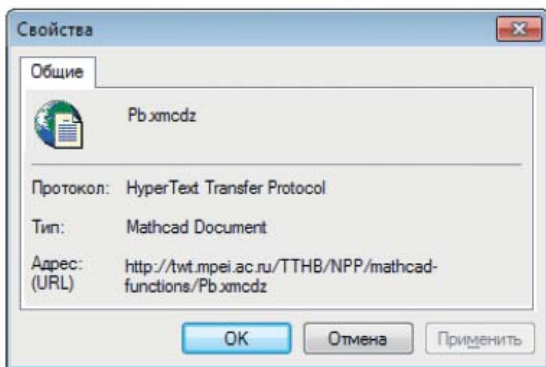


Рис. 5. Страница сайта по термодинамическим свойствам свинца



На рис. 4 в качестве примера показан on-line расчет теплофизических свойств свинца.

Существенным отличием описываемого интернет-справочника от подобных является то, что он предоставляет своим пользователям возможность не только сделать одиночный on-line расчет, но и внедрить соответствующие функции в свои собственные расчеты, проводимые в средах популярных инженерных и научно-технических программ. Для более подробного объяснения этой особенности вернемся к расчету свойств свинца (рис. 4).

Если посетитель нашего сайта работает, например, в среде инженерного калькулятора Mathcad [3], то он имеет возможность скачать со страницы сайта, показанной на рис. 5, функции, возвращающие термодинамические свойства этого металла в зависимости от температуры, и вставить их в свой расчет.

Можно не скачивать функции с сайта, а поступать другим образом – сделать в рабочем документе ссылку на место хранения в Интернете данных функций. Эта операция зафиксирована на рис. 6.

В среде Mathcad есть команда вставки в рабочий документ ссылки на другой Mathcad-документ, переменные и функции которого после такой ссылки будут видимы в документе, из которого была сделана ссылка. Документ, на который делается ссылка, может храниться на рабочей станции, в локальной компьютерной сети и на серверах интернета. В расчете, показанном на рис. 6, была сделана ссылка на документ, адрес которого показан на рис. 5. После такой ссылки в расчете, показанном на рис. 6, стала видима функция с именем ρ_{Pb_t} , возвращающая результат расчета плотности свинца в зависимости от температуры. Процедура

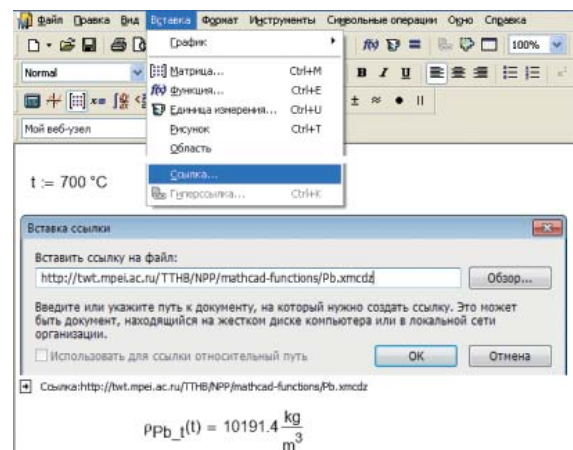


Рис. 6. Расчет плотности свинца в среде Mathcad со ссылкой на "облачную" функцию

ссылок на “облачные” функции по свойствам материалов и рабочих тел атомной энергетики позволяет проводить и более сложные расчеты. Так на рис. 7 можно видеть расчет в среде Mathcad термического КПД цикла Ренкина на влажном паре.

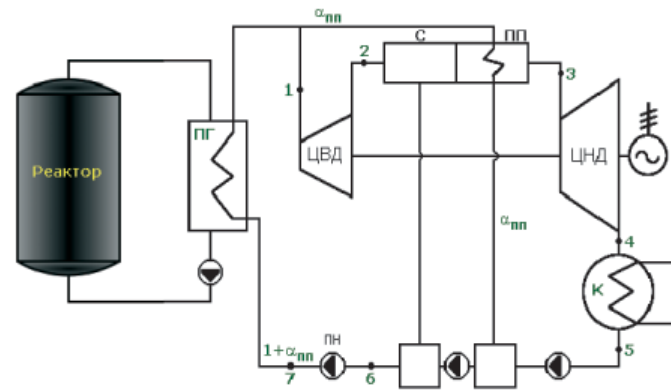
На рис. 7 сразу после схемы паротурбинного блока АЭС с водо-водяным реактором расположена ссылка на Mathcad-документ, хранящий функции, необходимые в расчете, а именно:

- $wspHSST$ – удельная энтальпия сухого насыщенного водяного пара как функция температуры;
- $wspSSST$ – удельная энтропия сухого насыщенного водяного пара как функция температуры;
- $wspHSWT$ – удельная энтальпия воды на линии насыщения как функция температуры;
- $wspHEXPANSIONPTXPEFF$ – удельная энтальпия водяного пара в конце процесса расширения в турбине как функция начального давления, температуры и степени сухости пара, конечного давления и внутреннего относительного КПД турбины;
- $wspHPT$ – удельная энтальпия воды или водяного пара как функция давления и температуры;
- $wspSPT$ – удельная энтропия воды или водяного пара как функция давления и температуры;
- $wspTSP$ – температура насыщения воды или водяного пара как функция давления;
- $wspHEXPANSIONPTPEFF$ – удельная энтальпия водяного пара в конце процесса расширения в турбине как функция начального давления и температуры, конечного давления и внутреннего относительного КПД турбины;
- $wspSSWT$ – удельная энтропия воды на линии насыщения как функция температуры.

Имена перечисленных функций имеют префикс *wsp*. Это аббревиатура пакета программ WaterSteamPro, доступных на сайте www.wsp.ru. На рис. 7 показали, как вышеперечисленные функции становятся доступными в среде инженерного калькулятора Mathcad. Эти и многие другие функции по свойствам рабочих тел энергетики, включая атомную, становятся доступными практически во всех компьютерных программах, используемых в инженерных и научно-технических расчетах: Excel, MatLab, язык C, Pascal, fortran и др.

Термический КПД паротурбинного блока АЭС с реактором ВВЭР

Давление насыщенного водяного пара на входе в ЦВД $p_1 := 6.2 \text{ MPa}$
 Давление влажного водяного пара на входе в сепаратор $p_2 := 0.5 \text{ MPa}$
 Температура водяного пара на входе в ЦНД $T_3 := 250 \text{ }^\circ\text{C}$
 Давление в конденсаторе $p_4 := 4 \text{ kPa}$
 Внутренние относительные КПД ЦВД, ЦНД и питательного насоса $\eta_{oi \text{ ЦВД}} := 89\%$ $\eta_{oi \text{ ЦНД}} := 86\%$ $\eta_{oi \text{ ПН}} := 80\%$



Ссылка на интернет-функции по свойствам воды и водяного пара

Reference: <http://fwk.mpei.ac.ru/TFB/NFP/mathcad-functions/H2O.xmcd>

1. Параметры на входе в ЦВД

$$T_1 := wspTSP(p_1) = 277.7 \text{ }^\circ\text{C} \quad h_1 := wspHSST(T_1) = 2782.3 \text{ kJ/kg} \quad s_1 := wspSSST(T_1) = 5.87 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$h'_1 := wspHSWT(T_1) = 1224.9 \text{ kJ/kg}$$

2. Параметры на входе в сепаратор

$$T_2 := wspTSP(p_2) = 151.8 \text{ }^\circ\text{C} \quad h_2 := wspHSWT(T_2) = 640.2 \text{ kJ/kg} \quad s_2 := s_1 = 5.8744 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$h'_2 := wspHSST(T_2) = 2748.1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 := wspHEXPANSIONPTXPEFF(p_1, T_1, p_2, \eta_{oi \text{ ЦВД}}) = 2394.0 \text{ kJ/kg}$$

$$x_2 := wspHEXPANSIONPTPEFF(p_1, T_1, p_2, \eta_{oi \text{ ЦВД}}) = 83.2\%$$

3. Параметры на входе в ЦНД

$$p_3 := p_2 = 0.5 \text{ MPa} \quad h_3 := wspHPT(p_3, T_3) = 2961.1 \text{ kJ/kg} \quad s_3 := wspSPT(p_3, T_3) = 7.27 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$h_2 := wspHEXPANSIONPTPEFF(p_1, T_1, p_2, \eta_{oi \text{ ЦВД}}) = 2394.0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 := wspHEXPANSIONPTPEFF(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi \text{ ЦНД}}) = 2298.7 \text{ kJ/kg}$$

$$x_4 := wspHEXPANSIONPTPEFF(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi \text{ ЦНД}}) = 89.52\%$$

4. Параметры в конце процесса расширения водяного пара в ЦНД

$$T_4 := wspTSP(p_4) = 29 \text{ }^\circ\text{C} \quad s_4 := s_3 = 7.27 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$h_4 := wspHEXPANSIONPTPEFF(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi \text{ ЦНД}}) = 2298.7 \text{ kJ/kg}$$

$$x_4 := wspHEXPANSIONPTPEFF(p_3, T_3, p_4, \eta_{oi \text{ ЦНД}}) = 89.52\%$$

5. Параметры на выходе из конденсатора

$$h_5 := wspHSWT(T_4) = 121.4 \text{ kJ/kg} \quad s_5 := wspSSWT(T_4) = 0.42 \text{ kJ/(kg K)}$$

6. Доля сепарации

$$\alpha_{nn} := x_2 \cdot \frac{h_3 - h'_2}{h_1 - h'_1} = 11.38\%$$

7. Параметры на входе в питательный насос

$$h_6 := \frac{x_2 \cdot h_5 + \alpha_{nn} \cdot h'_1 + (1 - x_2) \cdot h'_2}{1 + \alpha_{nn}} = 312.39 \text{ kJ/kg}$$

9. Работа насоса

$$l_N := 1.1107 \cdot \frac{p_1}{\text{MPa}} \cdot \frac{\text{kJ/kg}}{\eta_{oi \text{ ПН}}} = 8.61 \text{ kJ/kg}$$

10. Параметры на выходе из питательного насоса

$$h_7 := h_6 + l_N = 321 \text{ kJ/kg}$$

11. Работа ЦВД

$$l_{\text{ЦВД}} := h_1 - h_2 = 388.3 \text{ kJ/kg}$$

12. Работа ЦНД

$$l_{\text{ЦНД}} := x_4 \cdot (h_3 - h_4) = 551.1 \text{ kJ/kg}$$

11. Внутренний относительный КПД цикла

$$\eta_{oi} := \frac{l_{\text{ЦВД}} + l_{\text{ЦНД}} - l_N}{(1 + \alpha_{nn}) \cdot (h_1 - h_7)} = 33.96\%$$

Рис. 7. Расчет термического КПД цикла Ренкина на влажном паре со ссылками на облачные функции

ВЫВОДЫ

Описанный в статье сайт дает возможность инженерно-техническим и научным работникам, занятым в сфере атомной энергетики и промышленности, оперативно получать и включать в свои расчеты данные по свойствам материалов и рабочих тел.

Список литературы

(В скобках указаны адреса Интернет-версий)

1. *Яньков Г.Г.* Техническая книга в современной России: шанс на выживание // журнал “Университетская книга”, №6, 2011, С.67-70. (<http://www.unkniga.ru/vuz/101-tehnoga.html>)
2. *Кондакова Г.Ю., Копылов А.С., Орлов К.А., Очков А.В., Очков В.Ф., Чудова Ю.В.* Справочное издание “Интернет-версия справочника Теплоэнергетика и теплотехника. Инструментальные средства создания и развития”. Издательский дом МЭИ, 2007 (<http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ>).
3. *Очков В.Ф.* Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия БХВ-Петербург, 2009 (http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad_14/RusIndex.html).
4. *Очков В.Ф.* Открытое письмо пирата в адрес компьютерных изданий // Глава из книги Mathcad 8 Pro для студентов и инженеров. М.: КомпьютерПресс, 1999 (http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/mc8Pro.book/6_text.htm#_Toc525449695).

Очков Валерий Федорович – д.т.н., профессор Национального исследовательского университета “МЭИ”, заслуженный работник ЕЭС России.

Яньков Георгий Глебович – д.т.н., генеральный директор ЗАО “Издательский дом МЭИ”.