

## «Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ холодильных установок

Очков В.Ф.<sup>1</sup>, д.т.н., Орлов К.А.<sup>1</sup>, к.т.н., Очков А.В.<sup>1</sup>, инж., Знаменский В.Е.<sup>1</sup>, Волощук В.А.<sup>2</sup>, к.т.н.

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

Национальный университет водного хозяйства и природопользования<sup>2</sup>

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

Расчеты холодильных установок требуют знания термодинамических свойств рабочих веществ (хладагентов), задействованных в циклах. Когда такие расчеты ведутся *вручную*, то можно пользоваться «бумажными» таблицами по термодинамическим свойствам конкретных рабочих веществ (хладагентов) на линии насыщения и в однофазной области. Расчеты же на *компьютере* требуют специальных программных *функций*, возвращающих значения свойств рабочих веществ в зависимости от параметров цикла – давления, температуры и др.

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 [1-7]. После скачивания (download) этой программы с сайта [www.wsp.ru](http://www.wsp.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, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, НИУ МЭИ – [www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)

<sup>2</sup> 33000, Украина, г. Ровно, ул. Соборная, 11

<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 расчеты и, в частности, расчеты холодильных установок, имеют постоянный скоростной выход в Интернет, авторами данной статьи была предложена новая технология работы с функциями по теплофизическим свойствам рабочих веществ, теплоносителей и материалов, 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)). Этот сайт является частью расчетного сервера МЭИ, на котором можно найти данные и по теплофизическим свойствам хладагентов – 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.

The screenshot shows a web browser window with the address [http://twb.mpei.ac.ru/ochkov/WPU\\_Book\\_New/mas/index.html](http://twb.mpei.ac.ru/ochkov/WPU_Book_New/mas/index.html). The page title is "Расчетный сервер МЭИ (ТУ)". On the left, there is a search bar and a navigation menu with "Оглавление" and "Интерактивные справочники (Interactive Reference books)". The main content area is titled "Книга 2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент" and contains a list of links to various thermodynamic data and references, such as "Рис. 2.3. Фазовая p,t-диаграмма H<sub>2</sub>O (pic)", "Рис. 2.6. Зависимость удельного объема воды от температуры (pic)", and "Таблица 2.10. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения: в зависимости от T, от P".

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].

На рис. 2 можно видеть сайт расчетного сервера, к которому можно перейти по ссылке «Свойства хладагентов с возможностью on-line расчетов и ссылок на Mathcad-функции», показанной на рис. 1.

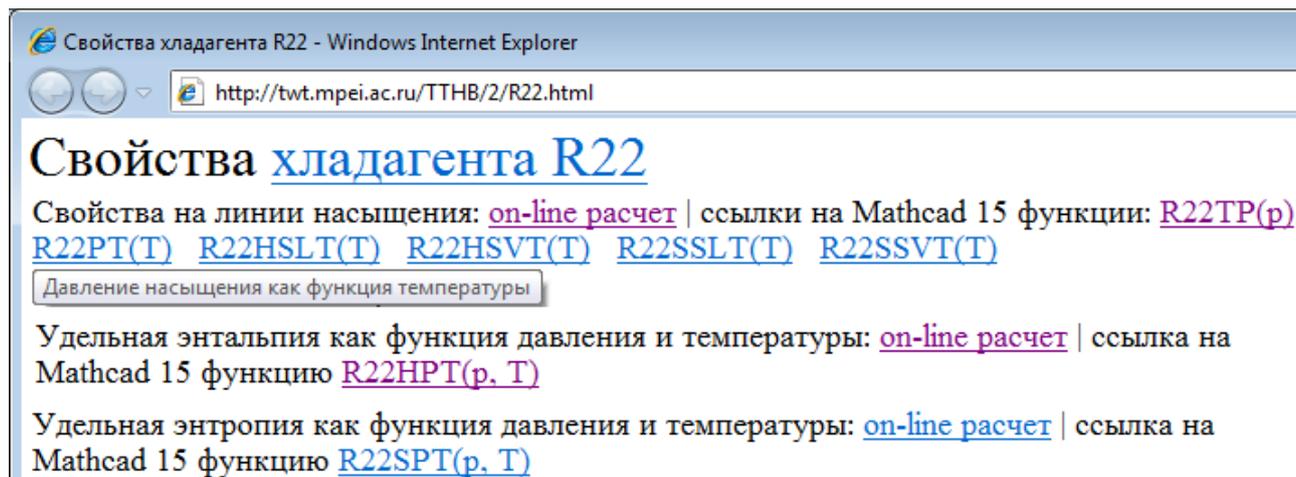


Рис. 2. Сайт, хранящий свойства хладагента R22

Если посетителю сайта нужно уточнить, к примеру, удельную энтальпию хладагента R22, то он должен перейти по соответствующей ссылке «On-line расчет – см. рис. 2» к расчетному документу, показанному на рис. 3.



диаграммы), в области перегретого пара (верхняя часть диаграммы), вблизи критической точки (центр диаграммы) и т.д.

Инженерный калькулятор Mathcad (а расчетная программа, показанная на рис. 3 создана именно с его помощью) – очень удобное средство для решения различных инженерных, в том числе и теплотехнических задач [8]. 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 (см. рис. 3, например). Подробнее об этом будет сказано 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.

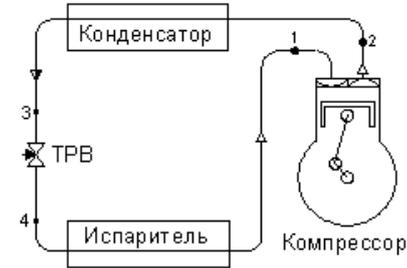
В среде Mathcad есть удобное средство *ссылка (reference)* на другой Mathcad-документ, переменные и функции которого становятся *доступными* (как говорят программисты – *видимыми*) в Mathcad-документе, из которого делается соответствующая ссылка. Пользователю Mathcad не нужно открывать и вставлять в 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, для инженерных расчетов.

На рис. 4, 5 и 6 в качестве примера «облачного» вызова функций по свойствам хладагента показан расчет в среде Mathcad термодинамического цикла – цикла простейшей идеальной холодильной установки. Этот расчет выложен в Интернете для открытого интерактивного использования без Mathcad с помощью Mathcad сервера по адресу: <http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/RefrMachine-R22.xmcd>. Скачать расчет для работы с ним в среде Mathcad 15 можно по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/RefrMachine-R22.xmcdz>.

http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/RefrMachine-R22.xmcd

### Расчет идеальной холодильной машины с хладагентом R22

Температура испарения х.а.  $t_{ev} := -7\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Температура конденсации х.а.  $t_{od} := 25\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Перегрев в испарителе XM  $\Delta t_{ev} := 7\text{ K}$   
Переохлаждение в конденсаторе XM  $\Delta t_{od} := 4\text{ K}$



#### Решение

Ссылка на Интернет-функцию, возвращающую давление х.а. на линии насыщения в зависимости от температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22PT.xmcdz>

Давление кипения х.а.  $p_{ev} := R22PT(t_{ev}) = 0.394\text{ MPa}$       Давление конденсации х.а.  $p_{od} := R22PT(t_{od}) = 1.044\text{ MPa}$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтальпию жидкого х.а. на линии насыщения в зависимости от температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22HSLT.xmcdz>

$h'_{ev} := R22HSLT(t_{ev}) = 191.853\text{ kJ/kg}$        $h'_{od} := R22HSLT(t_{od}) = 230.289\text{ kJ/kg}$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтальпию сухого пара х.а. на линии насыщения в зависимости от температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22HSVt.xmcdz>

$h''_{ev} := R22HSVt(t_{ev}) = 402.39\text{ kJ/kg}$        $h''_{od} := R22HSVt(t_{od}) = 413.029\text{ kJ/kg}$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтропию жидкого х.а. на линии насыщения в зависимости от температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22SSLT.xmcdz>

$s'_{ev} := R22SSLT(t_{ev}) = 0.97\text{ kJ/(kg K)}$        $s'_{od} := R22SSLT(t_{od}) = 1.105\text{ kJ/(kg K)}$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтропию сухого пара х.а. на линии насыщения в зависимости от температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22SSVt.xmcdz>

$s''_{ev} := R22SSVt(t_{ev}) = 1.761\text{ kJ/(kg K)}$        $s''_{od} := R22SSVt(t_{od}) = 1.718\text{ kJ/(kg K)}$

$p_1 := p_{ev}$        $p_2 := p_{od}$

При отсутствии потерь давления в конденсаторе и испарителе холодильной машины:  $p_3 := p_2$        $p_4 := p_1$

Температуры х.а. на выходе из испарителя/конденсатора с учетом перегрева/переохлаждения.  
 $t_1 := t_{ev} + \Delta t_{ev} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_3 := t_{od} - \Delta t_{od} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ссылка на Интернет-функцию, возвращающую удельную энтальпию х.а. в однофазной области зависимости от давления и температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22HPT.xmcdz>

$h_1 := R22HPT(p_1, t_1) = 407.346\text{ kJ/kg}$        $h_3 := R22HPT(p_3, t_3) = 225.303\text{ kJ/kg}$

Ссылка на Интернет-функцию, возвращающую удельную энтропию х.а. в однофазной области зависимости от давления и температуры  Ссылка: <http://twf.mpei.ac.ru/TTNB/2/R22SPT.xmcdz>

$s_1 := R22SPT(p_1, t_1) = 1.78\text{ kJ/(kg K)}$        $s_2 := s_1 = 1.78\text{ kJ/(kg K)}$        $s_3 := R22SPT(p_3, t_3) = 1.087\text{ kJ/(kg K)}$

Параметры паров х.а. после сжатия в компрессоре:  
 $t_2 := \text{root}(R22SPT(p_2, t_2) - s_2, t_2, 0\text{ }^{\circ}\text{C}, 100\text{ }^{\circ}\text{C}) = 48.039\text{ }^{\circ}\text{C}$        $h_2 := R22HPT(p_2, t_2) = 432.248\text{ kJ/kg}$

Параметры х.а. на входе в испаритель холодильной машины:  
 $h_4 := h_3$        $t_4 := t_{ev}$        $x_4 := \frac{h_4 - h'_{ev}}{h''_{ev} - h'_{ev}} = 15.89\%$        $s_4 := s'_{ev} + x_4 \cdot (s''_{ev} - s'_{ev}) = 1.0954\text{ kJ/(kg K)}$

**Удельная массовая холодопроизводительность**       $q_e = h_1 - h_4 = 182.043\text{ kJ/kg}$   
**Удельная массовая теплота конденсации**       $q_c = h_2 - h_3 = 206.945\text{ kJ/kg}$   
**Удельная адиабатная работа сжатия**       $l_a = h_2 - h_1 = 24.902\text{ kJ/kg}$   
**Теоретический коэффициент преобразования XM**       $\text{COP}_a = \frac{q_e}{l_a} = 7.31$

#### Рис. 4. Расчет холодильной установки в среде инженерного калькулятора Mathcad

Расчет, как обычно, начинается с ввода исходных данных. Для рассчитываемой холодильной установки (ее схема показана на рис. 4) – это температура испарения и конденсации хладагента. Потерями давления по тракту холодильной установки мы в данном расчете пренебрегали для его упрощения. Эти и другие упрощения и допущения несложно учесть в расчете. Несложно также отойти от «идеальности» цикла – учесть, что в компрессоре энтропия хладагента увеличивается ( $s_2 > s_1$ ), а энтальпия хладагента при дросселировании в терморегулирующем вентиле (ТРВ) несколько уменьшается ( $h_4 < h_3$ ). В Интернете по адресу <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-27.xmcd> расположен открытый интерактивный расчет коэффициента трансформации цикла пароконденсационного теплового насоса с рабочим телом R22, где эта «неидеальность» учтена.

Чтобы рассчитать давление хладагента в испарителе и конденсаторе холодильной установки, нужно знать соответствующую зависимость давления от температуры на линии насыщения. Как правило, инженеры в этом случае обращаются к таблицам, где данная зависимость «пропечатана» дискретными значениями давления и температуры, делают при необходимости интерполяцию данных и вводят полученный результат (давление) в расчет. Другой сценарий – инженер делает расчет по некоей формуле, описывающей зависимость температуры от давления на линии насыщения. Так или иначе, инженер отвлекается от решения основной задачи и ведет поиск и интеграцию в расчет функций, возвращающей термодинамические свойства хладагента, или на «ручной» расчет и ввод нужного значения. Вот тут-то ему может существенно помочь сайт, описываемый в данной статье.

Вернемся к рис. 2. На нем можно видеть ссылку на надписи R22PT(T), которая подсвечена подсказкой «Давление насыщения как функция температуры». Следуя этой ссылке можно скачать Mathcad-функцию с именем R22PT(T), возвращающую давление насыщения хладагента R22 в зависимости от температуры. Но можно не скачивать эту функцию и не вставлять ее в свой расчет – достаточно сделать Интернет-ссылку на эту функцию.

Если к ссылке R22PT(T), показанной на рис. 2, подвести курсор мыши и нажать ее правую кнопку, то появится диалоговое окно, где можно видеть, позицию «Свойства» (см. левую часть рис. 5). Если щелкнуть по этой позиции, то откроется еще одно диалоговое окно (см. правую часть на рис. 5), где можно видеть и скопировать в буфер обмена

соответствующий адрес, по которому в Интернете хранится нужная для нашего расчета функция. Чтобы эта функция стала видимой в расчете холодильной установки, необходимо в рабочем Mathcad-документе сделать соответствующую ссылку на нее. Эта операция показана на рис. 6: в среде Mathcad из меню Вставка отдается команда Ссылка и в текстовую область появившегося диалогового окна вставляется адрес, скопированный из сайта, показанного на рис. 2 и 5.

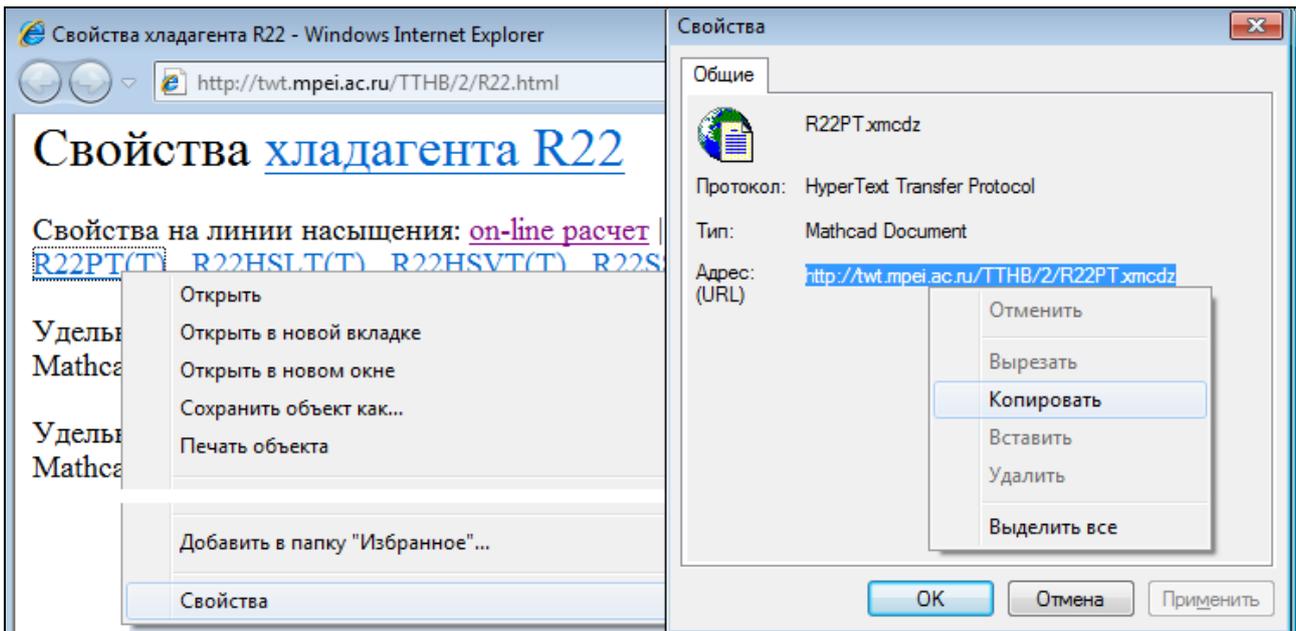


Рис. 5. Свойство ссылки на Интернет-функцию

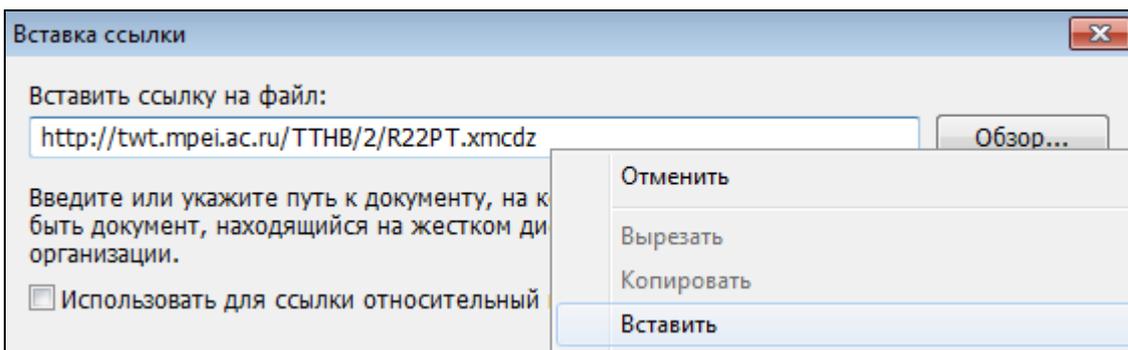


Рис. 6. Вставка ссылки на Интернет-функцию в расчет холодильной установки

После такой вставки (см. рис. 4) можно рассчитать давление кипения  $p_{ev}$  и конденсации  $p_{cd}$  хладагента R22 и вывести полученные значения «на печать»:  $p := R22PT(t) = \dots$  (Примечание: давление выводится «на печать» в паскалях, но

пользователь волен вывести его с другими единицами давления, в МПа, например, как показано на рис. 4).

Таким образом, можно за счет Интернет-ссылок сделать видимыми все нужные для расчета функции по термодинамическим свойствам хладагента R22:

- удельную энтальпию (H) и энтропию (S) жидкой (L) и паровой фазы (V) хладагента на линии насыщения (S) как функции температуры: R22HSLT(T), R22HSVT(T), R22SSLT(T) и R22SSVT(T).
- удельную энтальпию (H – см. также рис. 3) и энтропию (S) хладагента в однофазной области как функции давления и температуры: R22HPT(p, T) и R22SPT(p, T).

После того, как все нужные функции стали видимы в расчете, несложно рассчитать холодильную установку – см. рис. 4. Для расчета не доставало только функции, возвращающей температуру хладагента в однофазной области в зависимости от давления и удельной энтропии, – одной из двух обратных функций функции R22SPT(p, T). Эту обратную функцию можно, конечно, создать и разместить на сайте, показанном на рис. 2 и 5. Но мы поступили иначе – мы воспользовались встроенной в Mathcad функцией root, решающей обратную задачу. Эта функция в виде  $\text{root}(\text{R22SPT}(p_2, t_2) - s_2, t_2, 0^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C})$  вернет значение  $t_2$ , при котором функция R22SPT( $p_2, t_2$ ) вернет значение  $s_2$  (поиск нуля функции). При этом поиск решения ведется в интервале 0 – 100°C.

Когда в расчете есть под рукой все нужные функции по свойствам хладагента, то несложно построить T, s и p, h – диаграммы цикла холодильной установки. Методика построения таких диаграмм описана в [9].

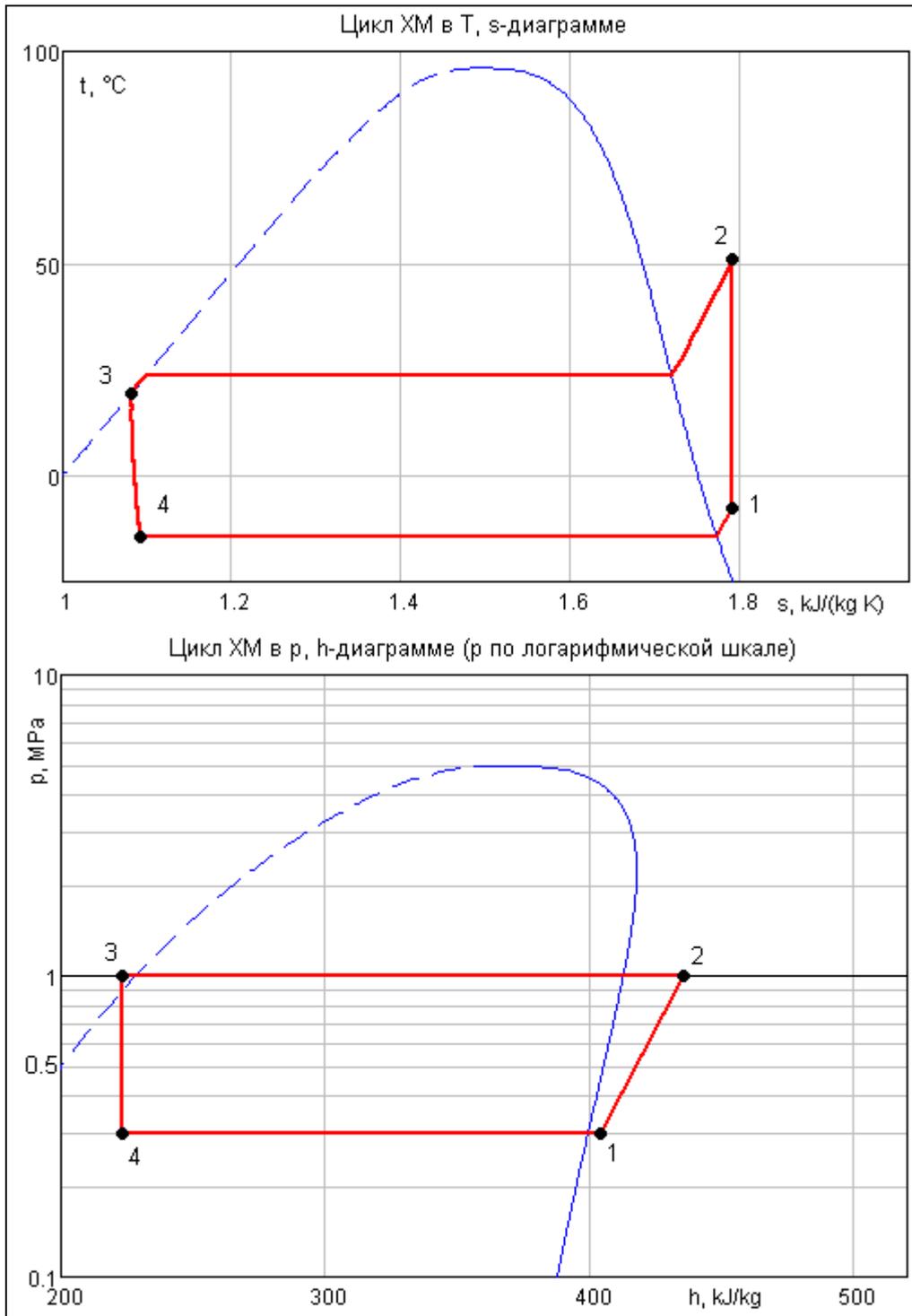


Рис. 7. T, s и p, h – диаграммы цикла холодильной установки

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, повторяем, можно скачать из Интернета по адресу <http://twm.mpei.ac.ru/ТТНБ/2/RefrMachine-R22.xmcdz>.

Пользователь компьютера при желании может щелкнуть левой кнопкой мышки по любой ссылке, показанной на рис. 4, загрузить и открыть 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». Функции по термодинамическим свойствам хладагентов созданы путем сплайн-интерполяции данных, выдаваемой программой NIST ([www.nist.gov](http://www.nist.gov)) REFPROP (<http://www.nist.gov/srd/nist23.htm>) [10].

### ***Литература:***

1. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009 (<http://twm.mpei.ac.ru/rbtpp>)
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://twm.mpei.ac.ru/ochkov/WspIn>).

3. Очков В. Ф., Волощук В.А. Современные информационные технологии для теплоэнергетики: облачные функции по свойствам рабочих тел, расчеты циклов паротурбинных, газотурбинных, парогазовых установок и тепловых насосов // Тезисы докладов 7-й Международной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии» Украина, Одесса, 14-16 сентября 2011 г. С. 27-29 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Odessa-2011.pdf>).
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., Александров А.А., Волощук В.А., Дорохов Е.В., Орлов К.А. Интернет-расчеты термодинамических циклов // Теплоэнергетика, № 1, 2009
6. 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
7. 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
8. Очков В.Ф., Утенков В.Ф., Орлов К.А. Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика, № 2, 2000
9. Очков В.Ф. Построение диаграмм термодинамических циклов: шаг за шагом // Автоматизация и ИТ в энергетике. №2-3, 2009. С. 6-15 (<http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/ThermCycleMCS-Create.html>)
10. Очков В.Ф. Публикация в Интернете теплофизических свойств веществ: проблемы и решения при работе с таблицами // Труды Академэнерго, № 2, 2009 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TablSite>)