УДК 621.564.2

«Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ холодильных установок

Д-р техн. наук **В. Ф. ОЧКОВ**, *канд. техн. наук* **К. А. ОРЛОВ**, **А. В. ОЧКОВ**, **В. Е. ЗНАМЕНСКИЙ**, **В. Ю. ЧИЖМАКОВА**
Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14
Канд. техн. наук **В. А. ВОЛОЩУК**
Национальный университет водного хозяйства и природопользования
Украина, 33000, г. Ровно, ул. Соборная, 11

The description of the new work technology with the functions of thermophysical properties of refrigerants, fluids and materials is given in the article. It is not based on downloading the program, but on using reference to the functions that are stored on Internet sites — «in the clouds.» Technology is implemented using the engineering calculator Mathcad. As an example the calculation of the refrigeration cycle using internet functions is given (The refrigerant is R407c).

Keywords: refrigerants properties, refrigeration cycle, calculate server, Mathcad computing, internet functions.

Ключевые слова: свойства хладагентов, цикл холодильной машины, расчетный сервер, вычисления в Mathcad, интернет функции.

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 установки этой программы на компьютере, в теплотехнических расчетах становятся видимыми более 300 функций не только по свойствам рабочих веществ, но и по некоторым процессам в термодинамических циклах. Такие расчеты 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 работе мы ограничились рассмотрением только пакета Mathcad.

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 формуляции (наборы формул с их описанием), определяющие порядок расчетов конкретных свойств конкретных веществ.

К примеру, в сентябре 2011 г. Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара утвердила новую форму для расчета теплопроводности воды и/или водяного пара. Пользователи, применяющие новую информационную технологию, описанную в данной статье, сразу начинают работать с программной реализацией новой формуляции по теплопроводности воды и/или водяного пара.

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 поспевают за этими изменениями и работают с устаревшими версиями.

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».

Упоминавшийся справочник по теплофизическим свойствам рабочих веществ теплоэнергетики [1] был дополнен сайтом, который размещен на расчетном сервере Национального исследовательского университета МЭИ (www.mpei.ru) и ООО «Триеру» (www.trie.ru). Этот сайт является частью расчетного сервера МЭИ, на котором можно найти данные и по теплофизическим свойствам хладагентов (рис. 1).

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

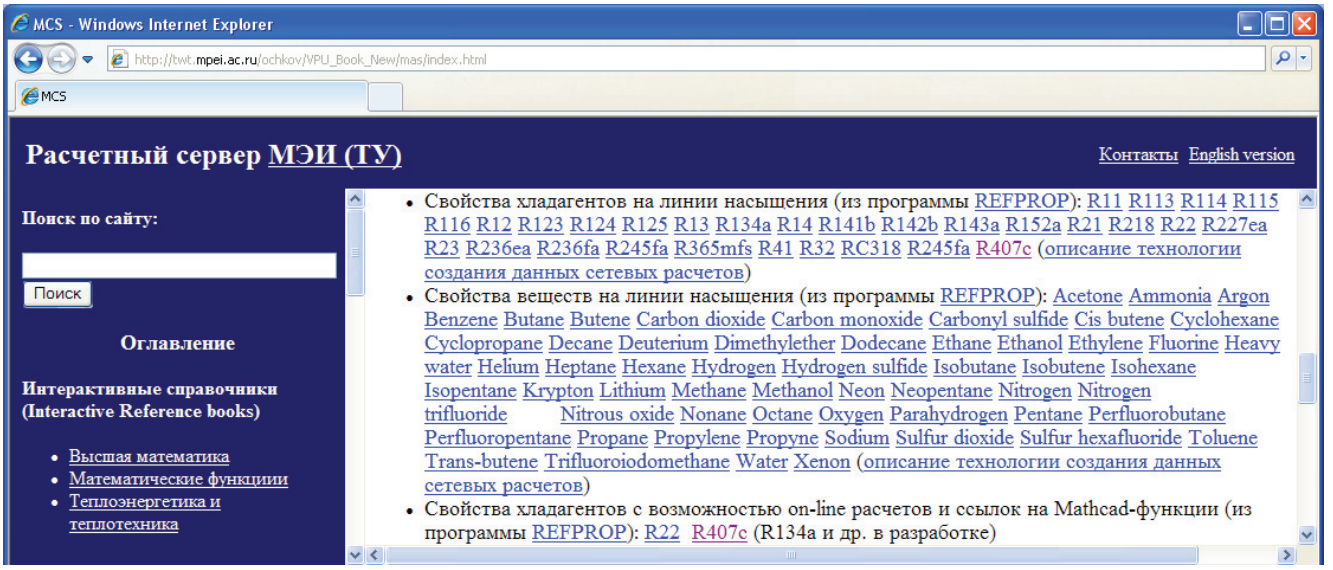


Рис. 1. Фрагмент расчетного сайта НИУ МЭИ и ООО «Триеру»

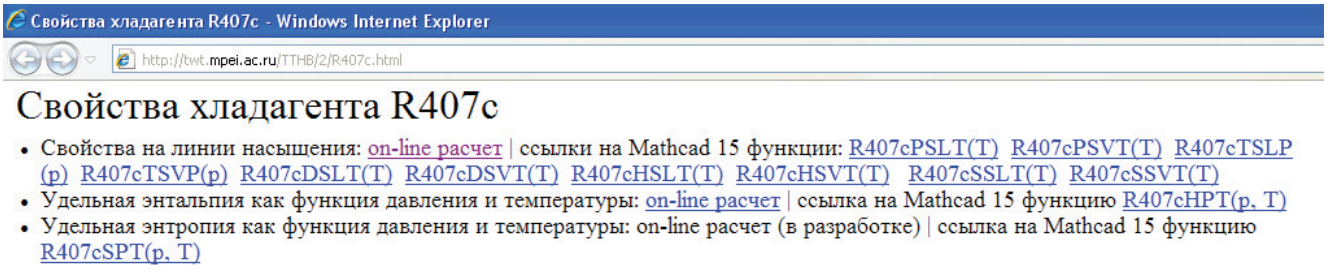


Рис. 2. Сайт, хранящий свойства хладагента R407c

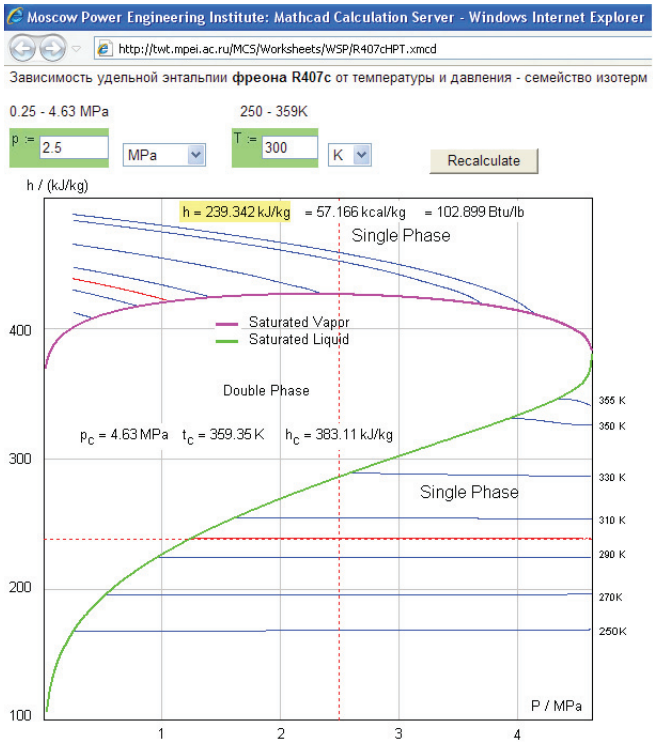


Рис. 3. On-line расчет удельной энтальпии хладагента R407c

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.

Если посетителю сайта нужно уточнить, к примеру, удельную энтальпию хладагента R407c, то он должен перейти по соответствующей ссылке «On-line расчет» (см. рис. 2) к расчетному документу, показанному на рис. 3.

На расчетном сайте, показанном на рис. 3, посетитель может изменить значения давления и температуры хладагента (с возможностью выбора единиц измерений) и «щелкнуть» по кнопке Recalculate (пересчитать). После этого измененные исходные данные (значения давления и температуры) будут переданы на сервер, где будут обработаны, а ответ будет передан посетителю сайта не только в виде конкретного числа с разными единицами удельной энтальпии (кДж/кг, ккал/кг и Btu/lb — «бтушка на фунт»), но и изотермой в семействе других изотерм с фиксацией расчетной точки. Это позволяет посетителю сайта четко видеть, где находится его расчетная точка — в области жидкости (нижняя область диаграммы), в области перегретого пара (верхняя часть диаграммы), вблизи критической точки (правая диаграммы) и т. д.

Инженерный калькулятор Mathcad (расчетная программа, показанная на рис. 3, создана именно с его помощью) — очень удобное средство для решения различных инженерных, в том числе и задач по термодинамическим циклам [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 сказа-

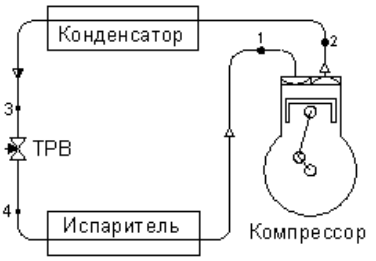
Расчет идеальной холодильной машины (ХМ) с хладагентом (х.а.) R407c

Температура сухого пара х.а.на линии насыщения в испарителе ХМ — $t''_{ev} := -5$ °C

Температура сухого пара х.а.на линии насыщения в конденсаторе ХМ — $t''_{cd} := 25$ °C

Перегрев в испарителе ХМ — $\Delta t_{ev} := 7$ K

Переохлаждение в конденсаторе ХМ — $\Delta t_{cd} := 4$ K



Решение

Ссылка на функцию, возвращающую давление сухого пара х.а.на линии насыщения в зависимости от температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cPSVT.xmcdz

$p_{ev} := R407cPSVT(t''_{ev}) = 0.385\ MPa \qquad p_{cd} := R407cPSVT(t''_{cd}) = 1.02\ MPa$

Ссылка на функцию, возвращающую температуру жидкого х.а.на линии насыщения в зависимости от температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cTSLP.xmcdz

$t'_{ev} := R407cTSLP(p_{ev}) = -11.42\ °C \qquad t'_{cd} := R407cTSLP(p_{cd}) = 19.4\ °C$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтальпию жидкого х.а.на линии насыщения в зависимости от температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cHSLT.xmcdz

$h'_{ev} := R407cHSLT(t'_{ev}) = 184.007\ kJ/kg \qquad h'_{cd} := R407cHSLT(t'_{cd}) = 228.239\ kJ/kg$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтропию жидкого х.а.на линии насыщения в зависимости от температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cSSLT.xmcdz

$s'_{ev} := R407cSSLT(t'_{ev}) = 0.941\ kJ/(kg\ K) \qquad s'_{cd} := R407cSSLT(t'_{cd}) = 1.098\ kJ/(kg\ K)$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтальпию сухого пара х.а.на линии насыщения в зависимости от температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cHSVT.xmcdz

$h''_{ev} := R407cHSVT(t''_{ev}) = 406.916\ kJ/kg \quad h''_{cd} := R407cHSVT(t''_{cd}) = 420.031\ kJ/kg$

Ссылка на функцию, возвращающую удельную энтропию сухого пара х.а.на линии насыщения в зависимости от температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cSSVT.xmcdz

$s''_{ev} := R407cSSVT(t''_{ev}) = 1.782\ kJ/(kg\ K) \qquad s''_{cd} := R407cSSVT(t''_{cd}) = 1.748\ kJ/(kg\ K)$

$p_1 := p_{ev} \quad p_2 := p_{cd}$

При отсутствии потерть давления в конденсаторе и испарителе холодильной машины:

$p_3 := p_2 \qquad p_4 := p_1$

Температуры х.а. на выходе из испарителя/конденсатора с учетом перегрева/переохлаждения.

$t_1 := t''_{ev} + \Delta t_{ev} = 2\ °C$

$t_3 := t'_{cd} - \Delta t_{cd} = 15.396\ °C$

Ссылка на Интернет-функцию, возвращающую удельную энтальпию х.а. в однофазной области зависимости от давления и температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cHPT.xmcdz

$h_1 := R407cHPT(p_1, t_1) = 413.356\ kJ/kg \qquad h_3 := R407cHPT(p_3, t_3) = 222.284\ kJ/kg$

Ссылка на Интернет-функцию, возвращающую удельную энтропию х.а. в однофазной области зависимости от давления и температуры

Ссылка:http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/R407cSPT.xmcdz

$s_1 := R407cSPT(p_1, t_1) = 1.806\ kJ/(kg\ K) \quad s_2 := s_1 = 1.806\ kJ/(kg\ K) \quad s_3 := R407cSPT(p_3, t_3) = 1.078\ kJ/(kg\ K)$

Параметры паров х.а. после сжатия в компрессоре:

$t_2 := t_1 \quad \text{Given} \quad R407cSPT(p_2, t_2) = s_2 \quad t_2 := \text{Find}(t_2) = 41.47\ °C$

$h_2 := R407cHPT(p_2, t_2) = 437.819\ kJ/kg$

Параметры х.а. на входе в испаритель холодильной машины:

$h_4 := h_3 \qquad x_4 := \dfrac{h_4 - h'_{ev}}{h''_{ev} - h'_{ev}} = 17.17\ \% \qquad s_4 := s'_{ev} + x_4 \cdot (s''_{ev} - s'_{ev}) = 1.0853\ kJ/(kg\ K) \qquad t_4 := t'_{ev} + x_4(t''_{ev} - t'_{ev}) = -10.321\ °C$

Удельная массовая холодопроизводительность $q_e = h_1 - h_4 = 191.073\ kJ/kg$

Удельная массовая теплота конденсации $q_c = h_2 - h_3 = 215.536\ kJ/kg$

Удельная адиабатная работа сжатия $l_a = h_2 - h_1 = 24.463\ kJ/kg$

Теоретический коэффициент преобразования ХМ $COP_a = \dfrac{q_e}{l_a} = 7.811$

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

но 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 возможность *ссылки* (*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 инженерных расчетов.

На рис. 4, 5 и 6 в качестве примера «облачного» вызова функций по свойствам хладагента показан расчет в среде Mathcad термодинамического цикла простейшей идеальной холодильной установки. Этот расчет выложен в интернете по адресу: http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/RefrMachine-R407c. xmcd для открытого интерактивного использования без установки на компьютере программы Mathcad. Если же на компьютере пользователя программа Mathcad установлена, то расчет для работы с ним посмотреть можно по адресу http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/ RefrMachine-R407c. xmcdz.

Расчет, как обычно, начинается с ввода исходных данных. Для рассчитываемой холодильной установки (рис. 4) — это температуры пара хладагента в испарителе и конденсаторе холодильной машины, а также перегрев хладагента в испарителе и переохлаждение в конденсаторе. Если пользователь вводит нулевые значения перегрева/переохлаждения, расчет параметров (удельной энтальпии, энтропии) хладагента в однофазной области не производится, а при щелчке левой кнопкой мыши на функции расчета этих параметров выводится информационное окно, где содержится сообщение: «точка находится в области насыщения», т. е. расчет с использованием функций, определяющих свойства рабочего тела в однофазной области, невозможен.

Потерями давления по тракту холодильной установки мы в данном расчете пренебрегли для его упрощения. Эти и другие допущения не сложно учесть в расчете. Не сложно 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://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-27.xmcd расположен открытый интерактивный расчет коэффициента трансформации цикла парокомпрессионного теплового насоса с рабочим, 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 некой 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.

На рис. 2 можно видеть ссылку с именем R407cPSVT (T), следуя которой можно воспользоваться Mathcad-функцией с именем R407cPSVT (T), возвращающую давление сухого насыщенного пара хладагента R407c в зависимости от температуры.

Если к ссылке R407cPSVT (T), показанной на рис. 2, подвести курсор мыши и нажать ее правую кнопку, то появится диалоговое окно, где можно найти, позицию «Свойства». Если щелкнуть по этой позиции, то откроется еще одно диалоговое окно (см. 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.

После такой вставки (см. рис. 4) можно рассчитать нужные давления p_{ev} и p_{cd} хладагента R407a и вывести полученные значения «на печать»: p_{ev}:= R407cPSVT (t''_{ev}) = … (Примечание: давление выводится «на печать» в паскалях, но пользователь волен вывести его с другими единицами давления, например, в MPa, как показано на рис. 4). Давления p_{ev} и p_{cd} рассчитываются по заданным температурам с помощью функций, описывающих свойства сухого пара на линии насыщения. Хладагент R407c — зеотропная смесь (Примечание: зеотропная смесь — это механическая смесь хладагентов с различными температурами насыщения при одном и том же давлении) фреонов R32/R125/R134a (массовые доли составляют соответственно 23/25/52%). Температурный «глайд» (скольжение) для данного рабочего тела достаточно высок и составляет приблизительно 5–7 К, таким

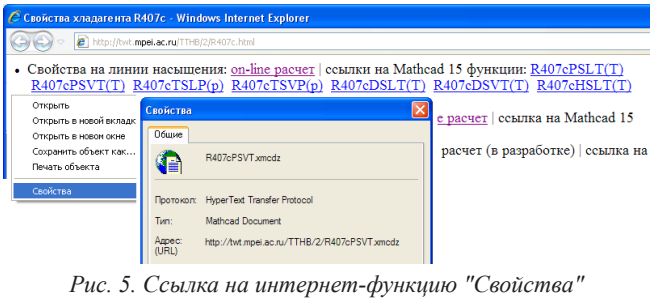


Рис. 5. Ссылка на интернет-функцию "Свойства"

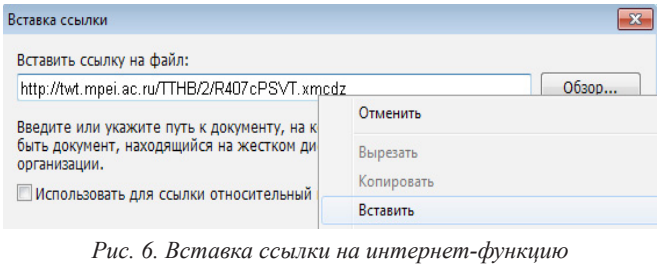


Рис. 6. Вставка ссылки на интернет-функцию в расчет холодильной установки

образом, расчет цикла холодильной машины с использованием данного фреона был бы неверным без его учета. Поэтому температура конденсации (испарения) фреона не принимается постоянной, и с помощью функций, определяющих свойства жидкого хладагента на линии насыщения, температуры t'_{ev} и t'_{cd} рассчитываются по уже известным давлениям p_{ev} и p_{cd}. Далее для определения параметров фреона в характерных точках цикла используются соответствующие функции, которые описывают свойства хладагента в однофазной области.

Таким образом, можно за счет интернет-ссылок сделать видимыми все нужные для расчета функции по термодинамическим свойствам хладагента R407c.

После того, как все нужные функции стали видимы в расчете, несложно рассчитать холодильную установку (см. рис. 4). Для расчета недоставало только функции, возвращающей температуру хладагента в однофазной области в зависимости от давления и удельной энтропии, — одной из двух обратных функций функции R407cSPT (*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 Find, решающей обратную задачу и возвращающей значение t_2, при котором функция R407cSPT (p_2, t_2) вернет значение s_2 (поиск нуля функции).

Когда в расчете есть под рукой все нужные функции по свойствам хладагента, то несложно построить *T, s* и *p, h*-диаграммы цикла холодильной установки (рис. 7). Методика построения таких диаграмм описана в [9].

Таким образом, можно сделать доступными все функции, необходимые для расчета холодильной установки. Данный расчет будет работать на любом компьютере с установленной программой Mathcad и имеющем доступ в интернет. 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.

Технологии, 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».

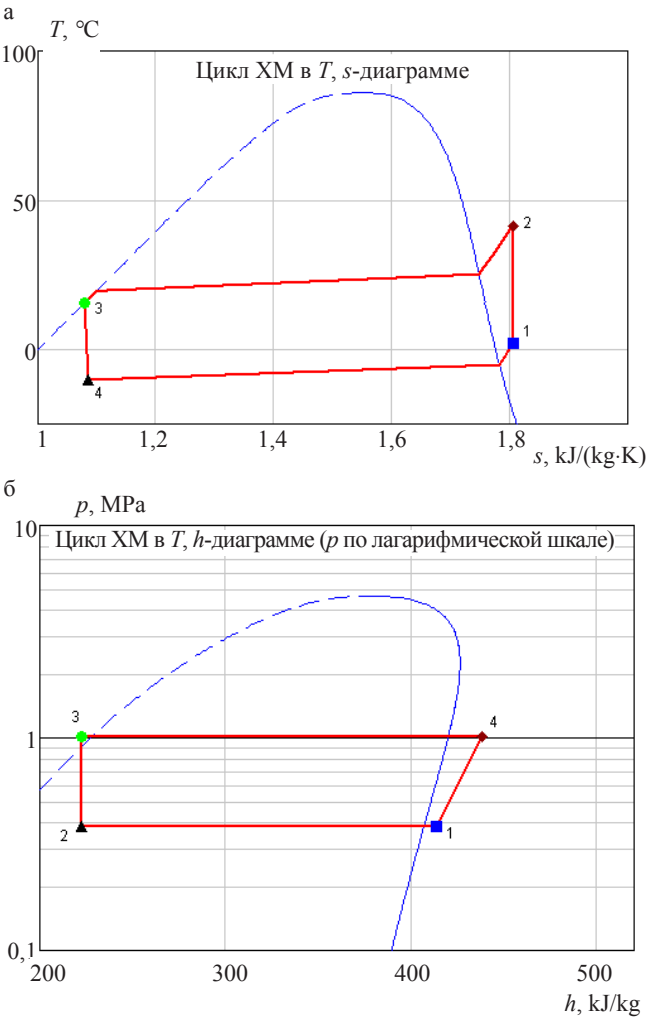


Рис. 7. Диаграммы циклов холодильных машин: а — в T, s-диаграмме; б — в p, h-диаграмме

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) REFPROP (http://www.nist.gov/srd/nist23.htm) [10].

Список литературы

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

2. *Александров А. А., Очков В. Ф., Орлов К. А., Очков А. В.* Теплофизические свойства воды и водяного пара в Интернете // Промышленная энергетика. 2007. №2. (http://twt.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 Междуна-

родной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии» Украина, Одесса, 14–16 сентября 2011 г. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Odessa-2011.pdf).

4. Очков В. Ф. Теплотехнический справочник в Интернете // Новое в российской электроэнергетике. 2005 №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. 2009. №1. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TE-1–2009/P77.png http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TE-1–2009/P78.png http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TE-1–2009/P79.png http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TE-1–2009/P80.png)

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. 2008. №10. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/NREE-2008–2/index. html)

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. 2011. №6. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Ochkov-Znamensky-Web-Rankine. html)

8. *Очков В. Ф., Утенков В. Ф., Орлов К. А.* Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика. 2000. №2.

9. *Очков В. Ф.* Построение диаграмм термодинамических циклов: шаг за шагом // Автоматизация и IT в энергетике. 2009. №2–3.

10. *Очков В. Ф.* Публикация в Интернете теплофизических свойств веществ: проблемы и решения при работе с таблицами // Труды Академэнерго. 2009. №2. (http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TablSite)