

**4 ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

УДК 621.564.2 : 536.71

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХЛАДАГЕНТОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

Э. И. Вайнфельд, П.Н. Монтик

¹ Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса
ORCID: [0000-0001-5158-2125](https://orcid.org/0000-0001-5158-2125)

² Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Copyright © 2014 by author and the journal "Automation technological and business - processes".
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

DOI: [10.15673/2312-3125.21/](https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/)

Аннотация

Рассматривается комплекс уравнений состояния, позволяющих получить термодинамические параметры хладагента по известной температуре и давлению. Показана методика получения коэффициентов уравнений состояния на основе справочных таблиц, в качестве примера используются данные по хладагенту R134a. Для решения этой задачи используется система компьютерной алгебры Mathcad.

Abstract

The set of equations of state, that allow to obtain the refrigerant thermodynamic parameters by known temperature and pressure, are discussed. The technique of obtaining the coefficients of the equations based on reference data. Data on refrigerant R134a are used as an example. A computer algebra system Mathcad used to solve this problem.

Ключевые слова

R134a, свойства веществ, Mathcad.

Холодильные установки (ХУ) потребляют значительную часть производимой электрической энергии. Однако непрерывный контроль качества их функционирования при эксплуатации у конечного потребителя до сих пор практически не реализован. Для непрерывного измерения, оценки энергетической эффективности и диагностики состояния ХУ необходимо располагать сведениями о параметрах хладагента в основных точках. Предлагаемый метод [1] предоставляет возможность оценки качества функционирования холодильной установки с энергетической точки зрения. Для получения текущих данных о работе ХУ используются преобразователи температуры, установленные в точках 1, 2, 5 и 6 (рис. 1), а также преобразователи тока, напряжения и активной мощности, потребляемой электродвигателем компрессора.

Далее приняты следующие условные обозначения:

**4 ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

T – температура абсолютная, K , или $\theta = T/100$;

p – давление абсолютное, $МПа$;

v' – удельный объем жидкости, $м^3 \cdot кг^{-1}$;

v'' – удельный объем пара, $м^3 \cdot кг^{-1}$;

h' – энтальпия жидкости, $кДж \cdot кг^{-1}$;

h'' – энтальпия пара, $кДж \cdot кг^{-1}$;

s' – энтропия жидкости, $кДж \cdot (кг \cdot K)^{-1}$;

s'' – энтропия пара, $кДж \cdot (кг \cdot K)^{-1}$.

Для построения цикла ХУ в координатах « $T-s$ » и « $\lg p - h$ » необходимо получить значения остальных термодинамических параметров по имеющимся значениям температур при необходимых предположениях о агрегатном состоянии хладагента в основных точках ХУ. В литературе приводятся подробные данные о термодинамических свойствах хладагентов, главным образом на пограничных кривых. Для определения параметров в однофазной области необходимо пользоваться специальными таблицами или тепловыми диаграммами давление – энтальпия и температура – энтропия. Также могут быть использованы различные коммерческие программные пакеты, однако алгоритмы их работы отсутствуют в свободном доступе.

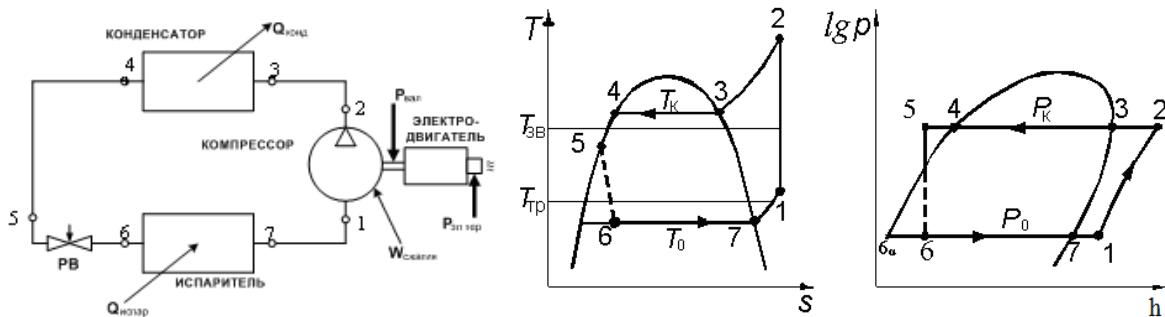


Рис. 1. Упрощенная схема и цикл ХУ в координатах « $T-s$ » и « $\lg p - h$ ».

Использовать имеющиеся в литературе уравнения состояния хладагентов для расчета термодинамических свойств в газовой и жидкой фазах невозможно из-за их громоздкости. Определенные трудности возникают также в связи с тем, что в известных уравнениях состояния независимыми переменными являются температура и плотность, а для расчетов циклов энергетических и холодильных установок требуются данные v , h , s в зависимости от температур и давлений.

Так как измерение и оценка энергетической эффективности ХУ производится в режиме реального времени, предлагается использовать комплекс простых уравнений в удобной для расчетов на ЭВМ форме. Уравнения составлены на основании экспериментальных данных и ранее разработанных подробных таблиц термодинамических свойств рабочих веществ [2].

Эти уравнения обеспечивают достаточную точность расчета v , h , s в зависимости от p и T , но справедливы лишь в интервале параметров, достаточном для работы холодильных установок пароконденсационного типа.

Составленные уравнения состояния приводятся ниже, форма уравнений одинакова для всех рабочих веществ.

Зависимость давление – температура на линиях кипения и конденсации имеет вид

$$\ln p = D_0 + D_1 T + D_2 T^2 \quad (1)$$

При известном давлении температура находится по формуле:

$$T = \frac{(D_0 - \ln p) - \sqrt{(D_0 - \ln p)^2 - 4D_1 D_2}}{-2D_1} \quad (2)$$

Удельный объем, энтальпия и энтропия кипящей жидкости определяются в зависимости от θ по формулам (3) – (5):

$$v' = (b_0 + b_1 \theta + b_2 \theta^5) 10^{-3}; \quad (3)$$

$$h' = a_0 + a_1 \theta + a_2 \theta^5; \quad (4)$$

$$s' = d_0 + d_1 \theta^1 + d_2 \theta^4. \quad (5)$$

**4 ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

Удельный объем хладагента в газовой фазе, включая линию конденсации, определяется в зависимости от p и θ по уравнению состояния:

$$v = \left[\frac{RT}{p} + B(\theta) \right] 10^{-3} \quad (6)$$

$$B(\theta) = B_1\theta + B_2\theta^2 + B_3\theta^{-2}$$

Изобарная теплоемкость, энтальпия и температурная часть энтропии в идеальном газовом состоянии рассчитываются по формулам (7) – (9):

$$c_{p0} = C_0 + C\theta; \quad (7)$$

$$h_0 = C_0T + 50C\theta^2 + C_1; \quad (8)$$

$$s_0 = C_0 \ln T + C\theta + C_2; \quad (9)$$

Энтальпия и энтропия ХА в газовой фазе, включая линию конденсации, определяются в зависимости от p , θ и параметров в идеальном газовом состоянии:

$$h = h_0 + p(-B_2\theta^2 + 3B_3\theta^{-2}); \quad (10)$$

$$s = s_0 - R \ln p + p \cdot 10^{-2}(-B_1 - 2B_2\theta + 2B_3\theta^{-3}) \quad (11)$$

Рассмотрим расчет параметров приведенных уравнений состояния (1) – (11) на примере R134a. Исходные данные для расчета – таблицы термодинамических свойств хладагента – приведены в [3]. Расчет проводился в системе компьютерной алгебры Mathcad.

Для определения коэффициентов D_0 , D_1 , D_2 уравнения (1) использовались таблицы зависимости давление – температура на линиях кипения и конденсации. Форма полинома задавалась соответственно уравнению (1). Коэффициенты рассчитываются при помощи встроенной функции *linfit*, которая в качестве аргументов требует векторы значений по осям x и y – в данном случае значения температуры и логарифма давлений из справочника [3], а также вектор, содержащий полином (в расчете обозначен, как $Lnp(T)$). Вектор значений на выходе K содержит найденные коэффициенты. Таким образом, $D_0 = 11,922$, $D_1 = -5,758 \cdot 10^{-3}$, $D_2 = -3,162 \cdot 10^{-3}$. На рис. 2 показано соответствие между табличными данными, которые обозначены символами «+», и значениями, определенными по уравнению (1) с подстановкой найденных коэффициентов – кривая линия. Расчетные и табличные данные совпадают практически полностью.

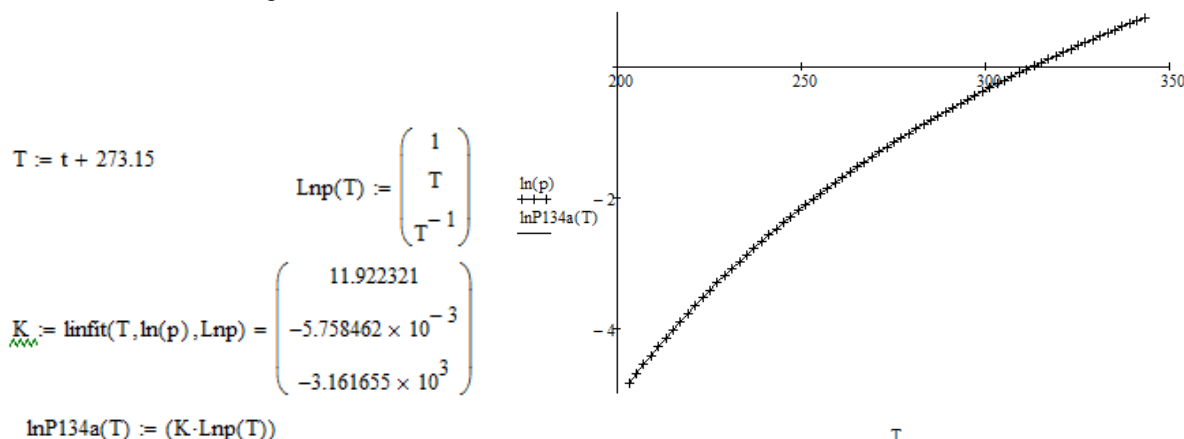
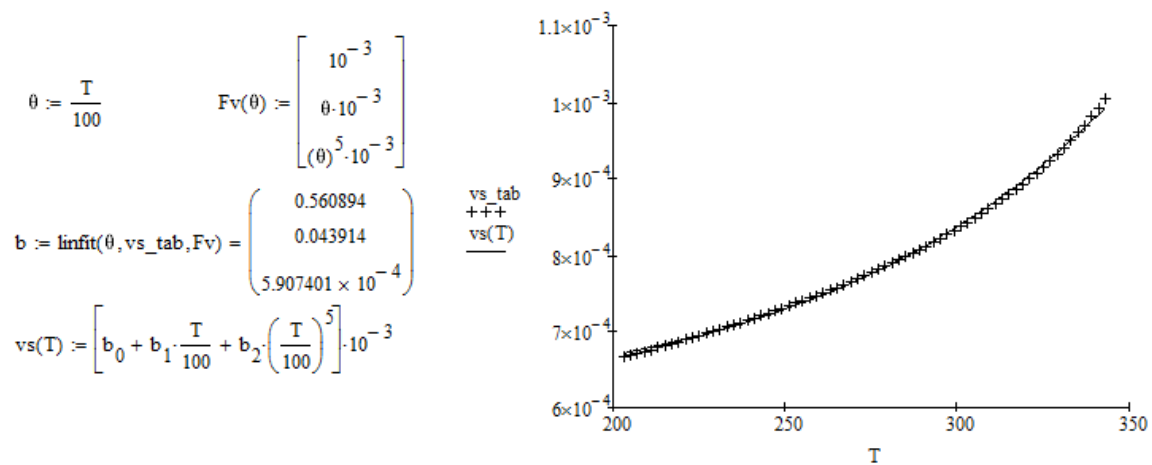
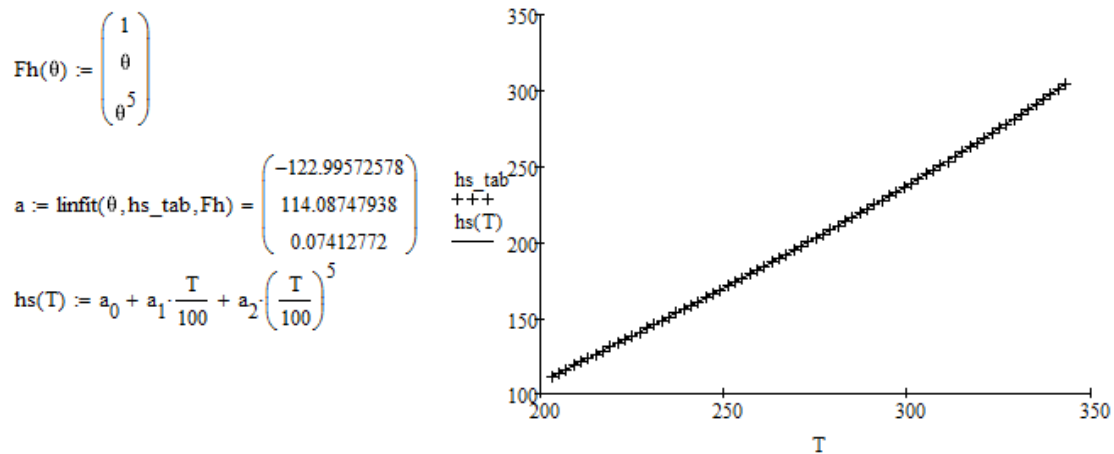
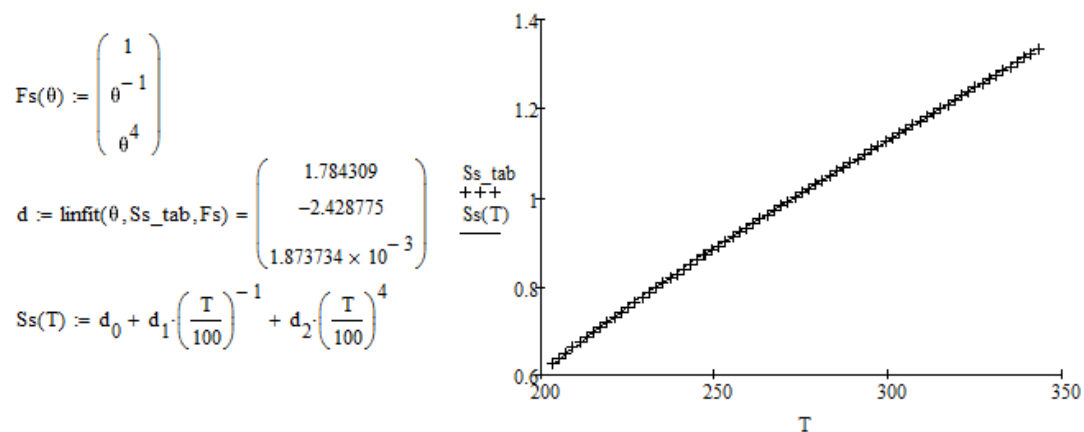


Рис. 2. Расчет коэффициентов D_0 , D_1 , D_2 уравнения (1) и зависимость «lg p – T».

Аналогично определяются коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 в уравнении (3), коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 в уравнении (4) и коэффициенты d_0 , d_1 , d_2 в уравнении (5). Обозначения vs , hs и ss на рисунках соответствуют v' , h' и s' – удельный объем, энтальпия и энтропия жидкости соответственно. Расчетные данные также практически совпадают с табличными (рис. 3 – 5).

**4 ТЕХНИЧНИ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**Рис. 3. Расчет коэффициентов b_0, b_1, b_2 и сравнение табличных данных с полученными при использовании уравнения (3)Рис. 4. Расчет коэффициентов a_0, a_1, a_2 и сравнение табличных данных с полученными при использовании уравнения (4)Рис. 5. Расчет коэффициентов d_0, d_1, d_2 и сравнение табличных данных с полученными при использовании уравнения (5)

**4 ТЕХНИЧНІ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

Уравнение (6) определяет зависимость удельного объема хладагента в газовой фазе, включая линию конденсации, от p и θ . Незвестными коэффициентами в данном уравнении являются коэффициенты B_1, B_2, B_3 . Используя уравнение (6), найдем значение B :

$$B = \nu \cdot 1000 - \frac{RT}{p}$$

Для хладагента R134a газовая постоянная [4, стр. 661]:

$$R = \frac{R_m}{M} = \frac{8,314471 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}}{0,102032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 81,4889 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,0814889 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Используя табличные данные T и p найдены коэффициенты B_1, B_2, B_3 (рис. 6). Из-за ограничения системы Mathcad – не более 16 графиков на одной координатной плоскости – для сравнения табличных и расчетных данных приведено два рисунка, для давлений от 0,01 МПа до 0,4 МПа и от 0,4 МПа до 2,0 МПа.

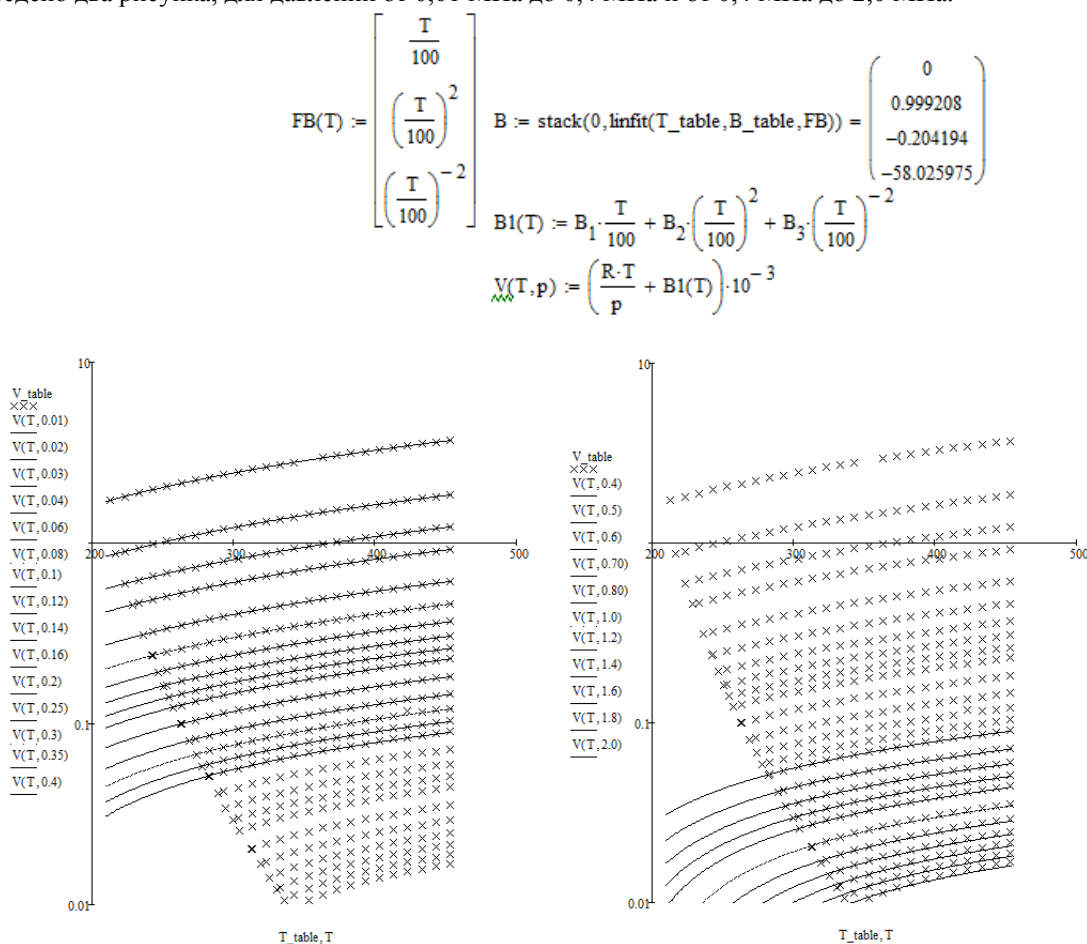


Рис. 6. Расчет коэффициентов B_1, B_2, B_3 и сравнение табличных данных с полученными при использовании уравнения (6). Давление изменяется от 0,01 МПа до 2,0 МПа

Из уравнения (10) по известным табличным значениям определяем h_0 для каждого значения давления при различных температурах:

**4 ТЕХНИЧНИ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

$$h_0 = h - p \cdot (-B_2\theta^2 + 3B_3\theta^{-2}).$$

Также из уравнения (11) по известным значениям определяем s_0 :

$$s_0 = s + R \ln p - p \cdot 10^{-2} (-B_1 - 2B_2\theta + 2B_3\theta^{-3}).$$

Полученные вектора значений энтальпий и энтропий подставляем в уравнения (8) и (9) соответственно. В полученной системе уравнений неизвестными являются параметры C_0, C_1, C_2, C . Система является избыточной, для её решения используем встроенную функцию `minerr` (рис. 7 – 8).

$$C_0 := 0.3 \quad C_1 := 200 \quad C_2 := -1 \quad C := 0.17$$

Given

$$ho_table = C_0 \cdot T_table + 50 \cdot C \cdot \left(\frac{T_table}{100} \right)^2 + C_1$$

$$so_table = C_0 \cdot \ln(T_table) + C \cdot \frac{T_table}{100} + C_2$$

$$\text{Minerr}(C_0, C_1, C_2, C) = \begin{pmatrix} 0.314375 \\ 255.41711 \\ -0.591716 \\ 0.172498 \end{pmatrix}$$

Рис. 7. Определение коэффициентов C_0, C_1, C_2, C .

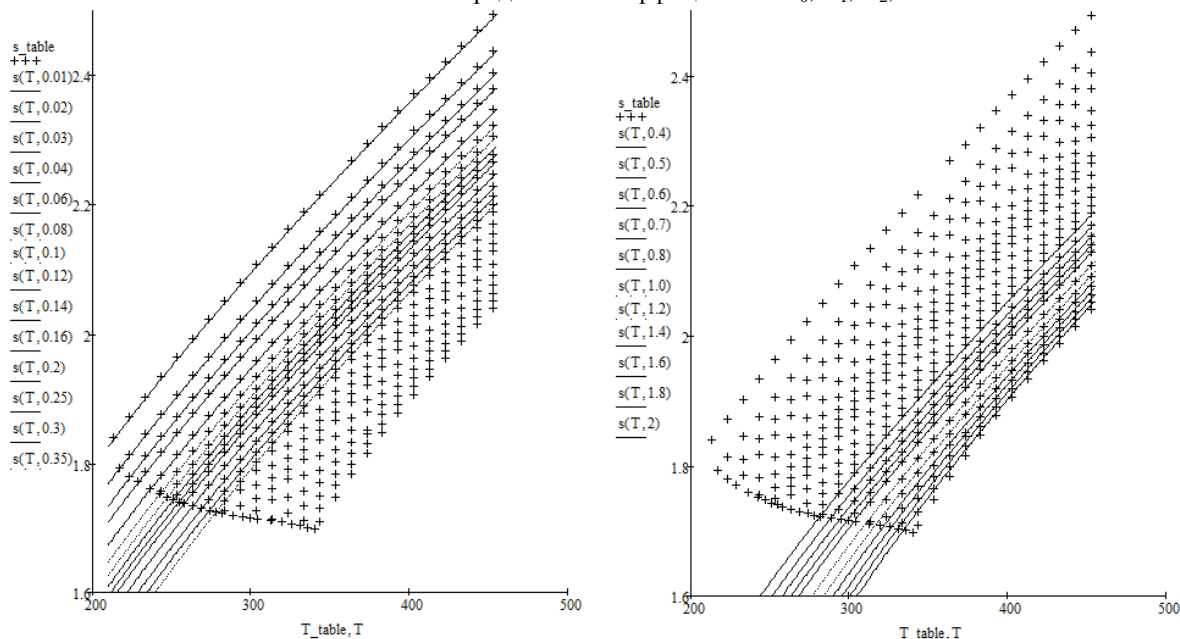


Рис. 8. Сравнение табличных данных с полученными при использовании уравнения (11). Давление изменяется от 0,01 МПа до 2,0 МПа

Полученные таким образом коэффициенты уравнений состояния хладагента R134a сведем в таблицу 1. Для сравнения в таблице представлены коэффициенты для хладагентов R12, R22, R502 [2, стр. 37].

Аналогично могут быть получены коэффициенты для других рабочих веществ. Приведенные уравнения позволяют уменьшить необходимое количество датчиков при измерении энергетической эффективности ХУ, в частности, можно не использовать преобразователи давления, если считать известным агрегатное состояние хладагента. Записанные формулы и данные табл.1 позволяют составить универсальную программу определения необходимых термодинамических свойств основных хладагентов. Такую программу можно распространить на рабочие вещества агрегатов сжижения газов, предварительно составив соответствующие уравнения состояния.

**4 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

Таблиця 1. Коэффициенты уравнений состояния хладагентов

Обо значение	R12	R134a	R22	R502
a_0	-113,54	-122,996	-185,35	-152,28
a_1	74,621	114,087	101,142	89,46
a_2	$638,7 \cdot 10^{-4}$	$741,2 \cdot 10^{-4}$	$597,4 \cdot 10^{-4}$	$520,9 \cdot 10^{-4}$
b_0	0,4742	0,5609	0,5373	0,5622
b_1	0,06926	0,04391	0,05696	0,0285
b_2	$35,348 \cdot 10^{-5}$	$59,074 \cdot 10^{-5}$	$56,367 \cdot 10^{-5}$	$69,433 \cdot 10^{-5}$
B_1	-0,74976	0,99921	0,96552	0,2108
B_2	0,17191	-0,20419	-0,24016	-0,16254
B_3	-30,215	-58,025975	-48,674	-26,872
C_0	0,2929	0,3144	0,28345	0,25571
C	0,0986	0,1725	0,12177	0,10736
C_1	143,15	255,42	190,15	143,97
C_2	-0,4138	-0,5917	-0,2200	-0,2146
D_0	8,18367	11,922	10,204	9,3322
D_1	$-8,03 \cdot 10^{-4}$	$-57,58 \cdot 10^{-4}$	$-36,35 \cdot 10^{-4}$	$-24,44 \cdot 10^{-4}$
D_2	$-24,967 \cdot 10^{-2}$	$-31,617 \cdot 10^{-2}$	$-27,062 \cdot 10^{-2}$	$-25,186 \cdot 10^{-2}$
d_0	1,5349	1,7843	1,7143	1,6385
d_1	-1,6679	-2,4288	-2,18965	-1,9502
d_2	$13,607 \cdot 10^{-4}$	$18,737 \cdot 10^{-4}$	$15,679 \cdot 10^{-4}$	$13,558 \cdot 10^{-4}$
R	0,06876	0,08149	0,09615	0,07446

Литература

1. Живиця В.І., Глазева О.В., Вайнфельд Е.Й., «Непрямий вимір масової витрати холодоагенту у малих холодильних системах» Праці IV всеукраїнського науково-технічного семінару «Удосконалення малої хладотеплотехніки і забезпечуваних нею технологічних процесів» ДонНУЕТ-АТ НОРД, 14–16 травня 2009 р., Донецьк, 2009;
2. Рабочие вещества холодильных машин рефрижераторных транспортов и газозовов: Методические рекомендации. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. – 40 с. (разработаны В. А. Загоруйко и В. А. Загорученко);
3. Богданов С. Н., Бурцев С. И., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ/ Под ред. С. И. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СИ 16ГЛХПТ, 1999. – 320 с;
4. Reiner Tillner-Roth and Hans Dieter Baehr. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures From 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa /J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 23, No. 5, 1994.

References

1. Zhyvytsya V.I., Hlazyeva O.V., Vaynfeld E.Y., «Nepryamyi vymir masovoyi vytraty kholodoahentu u malykh kholodil'nykh systemakh» Pratsi IV vseukrayins'koho naukovo-tekhnichnoho seminaru «Udoskonalennya maloyi khladoteplo tekhniki i zabezpechuvanykh neyu tekhnolohichnykh protsesiv» DonNUET-AT NORD, 14–16 travnya 2009 r., Donetsk, 2009;
2. Rabochie veshhestva xolodilnykh mashin refrizheratornykh transportov i gazozovov: Metodicheskie rekomendacii. – M.: V/O «Mortexinformreklama», 1985. – 40 s. (razrobotany V. A. Zagorujko i V. A. Zagoruchenko);
3. Bogdanov S. N., Burcev S. I., Ivanov O. P., Kupriyanova A. V. Xolodil'naya texnika. Kondicionirovanie vozduxa. Svoystva veshhestv: Sprav/ Pod red. S. I. Bogdanova. 4-e izd., pererab. i dop. –SPb.: SI 16GLXPT, 1999. – 320 s;
4. Reiner Tillner-Roth and Hans Dieter Baehr. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures From 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa /J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 23, No. 5, 1994.