

إنشاء جداول البخار المحمص ومخطط $i - \log P$ للفريون R410A

م. محمد يمان الصباغ* و د. م. سهيل مرشدة**

الملخص

انتشر في المدة الأخيرة مجموعة من وسائط التبريد R407A-B-C, R507, R410A, R404A صديقة البيئة التي معامل استنفاد طبقة الأوزون لها $ODP = 0$ يقوم هذا البحث على إنشاء جداول الخواص الترموديناميكية لوسيط التبريد R410A (R32/125 50/50) في منطقتي البخار المشبع الرطب والبخار المحمص انطلاقاً من معادلة Martn – Hou، وعلى إمكانيات برنامج الـ MATLAB مع رسم مخطط $(i, \log P)$ لهذا الوسيط، وقد تمكنا من وضع جداول لمنطقة البخار المحمص غير الواردة في أغلب المراجع المتداولة؛ ممّا يساعد في إيجاد البارامترات بدقة أكبر مقارنة بالمخططات. وقد تم توفير نسخة إلكترونية من الجداول والمخططات مع البحث.

الكلمات المفتاحية: وسائط تبريد – R410A - .

*مهندس، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.
**استاذ مساعد، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Developing superheated steam Tables and $i - \log P$ Chart of R410A Refrigerant

Eng. Mohammad Yman.Alsabbagh* and Dr.Suhel Marche**

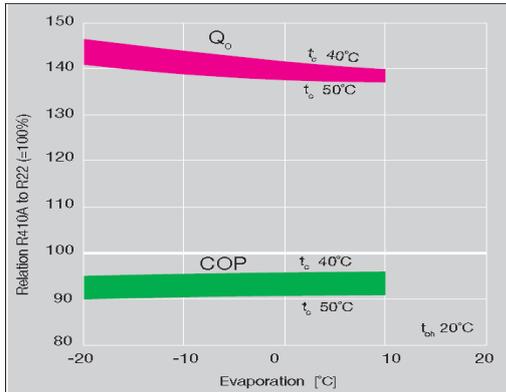
Abstract

Recently a group of refrigerants as R407A-B-C, R507, R410A, R404A friendly environment have spread in which the depletion of the ozone layer coefficient $ODP = 0$. This paper illustrates the establishment of tables for the thermodynamic properties of the refrigerant R410A (R-32/125 50/50) in the regions of saturated liquid steam and superheated steam based on the equation of Martin - Hou and the capabilities of MATLAB program, Also we plot ($i, Lg P$) char for this refrigerants, where we were able to create tables for superheated steam which is not contained in the most Known references, which help in finding the parameters more accurately compared with the available chart. It has been providing an electronic copy of the tables and charts with the research.

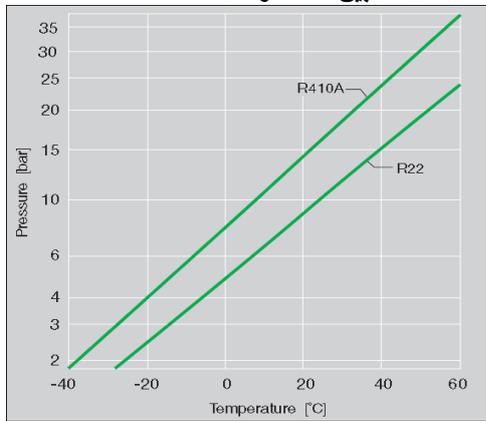
Keywords: Refrigerants – R410A – Tables and Chart.

* Engineer, General Mechanical Dep. – F.M.E.E. Damascus university.

** Assist .Prof. in General Mechanical Dep. F.M.E.E. Damascus university.



الشكل (1) مقارنة نسبية بين الاستطاعة التبريدية ومعامل الأداء بين R22 و R410A.



الشكل (2) مقارنة ضغط العمل بين R22 و R410A

يعرض هذا البحث تطوير جداول جديدة للخواص الترموديناميكية لوسيط التبريد R410A، طُوِّرت معادلات مبنية على معادلة Martin-Hou لحالة الغاز الحقيقي، لتعطي النتائج بدقة على كامل مجال درجات الحرارة، الضغط، والحجم، أمّا إنتالبي وأنتروبي البخار فيحسبان من معادلات Martin-Hou المعروفة. كما طُوِّرت معادلات إضافية لحساب إنتالبي وأنتروبي السائل المشبع والبخار المحمص اعتماداً على المرجع [3,4]. وانطلاقاً من هذه المعادلات أنشأنا جداول تعطي البارامترات لمنطقة البخار المحمص إذ إنّها غير موجودة في المراجع المتداولة؛ ممّا يساعد في إيجاد البارامترات بدقة أكبر من استخدام المخططات. وقد تم توفير نسخة إلكترونية من الجداول والمخططات مع البحث.

1 المقدمة:

إن دراسة خواص الوسائط التبريدية وتأثيرها المهم في المؤشرات الطاقية والاستثمارية وطبيعة آلات التبريد وعناصرها شغلت وتشغل اهتمام العديد من العلماء، وقد أُنجِرت أعمال في بحث الخواص الترموديناميكية لمجموعة من الوسائط، ووضعت لها مخططات ترموديناميكية.

في الوقت الحاضر يستعمل نحو 30 - 40 وسيط تبريد في محطات التبريد، وبالأخص غاز الأمونيا وزمرة الفريونات. إمكانية استخدام وسائط التبريد في آلات التبريد مختلفة الوظائف، وذات الشروط المختلفة في تحقيق الدورة الترموديناميكية محدد بخصائص هذه الوسائط نفسها. إن مثل هذه الخصائص هي السمية، والرائحة، وقابلية الاشتعال والانفجار، ودرجة حرارة التجمد، فضلاً عن الخصائص الترموديناميكية.

تعدّ وسائط التبريد R 404A, R410A, R507, R407A- B -C بدائل عن R22 - المستخدم بكثرة في دارات التبريد - كونها غير ضارة بالبيئة حيث معامل استنفاد طبقة الأوزون ODP=0، وتستخدم في التبريد الصناعي، وآلات التبريد الجديدة، ووسائط النقل [1].

استخدم وسيط التبريد R410A (R-32/125 50/50) في المدة الأخيرة بكثرة، وخاصة في تطبيقات تكييف الهواء. وهو عبارة عن مزيج من R32 و R125 بنسبة 50/50 وزنياً.

إحدى الميزات الأساسية عند استخدام هذا الوسيط أنه يعطي استطاعة تبريدية أكبر مقارنة مع R22 كما يبيّن الشكل (1). ممّا يؤدي إلى تخفيض حجم التجهيزات بشكل كبير. الاختلاف الأساسي مقارنة مع R22 ارتفاع ضغط التشغيل إذ تصل قيمة الضغط إلى 25 bar عند درجة حرارة تكاثف 42°C، في حين لا تصل إلى هذه القيمة عند استخدام R22 إلا حتى درجة حرارة 62°C [2].

(2) الخواص الفيزيائية:

$$P = \frac{RT}{V-b} + \sum_{i=2}^5 (A_i + B_i \cdot T) + C_i \exp\left[-\frac{KT}{T_c}\right] / (v-b)^i$$

6. انتالبي السائل المشبع:

$$h_f = A + B \cdot X + C \cdot X^2 + D \cdot X^3 + E \cdot X^4 + F \cdot X^5$$

$$X = \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/3} - X_o \quad \text{إذ:}$$

7. انتالبي البخار المشبع الجاف والمحمص:

انطلاقاً من المعادلة في المرجع [5] طَوَّرْنَا العلاقة التالية لحساب انتالبي كل من البخار المشبع الجاف، وانتالبي البخار المحمص؛ وهي بالشكل:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_v^o dT + |PV + \frac{A_2 + \left(1 + \frac{5.475T}{T_c}\right) \cdot C_2 e^{-5.475 \frac{T}{T_c}}}{(V-b)} + \frac{A_3 + \left(1 + \frac{5.475T}{T_c}\right) C_3 e^{-5.475 \frac{T}{T_c}}}{2(V-b)^2} + \frac{A_3}{3(V-b)^3} \Big|_{V_1, T_1}^{V_2, T_2}$$

لتصبح بالشكل الآتي:

$$h = h_o + (PV - RT) + \sum_{i=1}^4 \frac{a_i T^i}{i} + \frac{A_{i+1} + \left(1 + K \frac{T}{T_c}\right) \exp\left(-K \frac{T}{T_c}\right) C_{i+1}}{i (V-b)^i}$$

إذ: $h_o = 298.76 \text{ KJ/Kg}$ أما باقي الثوابت فلها قيمها نفسها في معادلة Martin - Hou ومعادلة السعة الحرارية عند ضغط ثابت.

نحسب عندها الحرارة الكامنة لتشكيل البخار:

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

الصيغة الكيميائية	CH2F2/CHF2CF
الوزن الجزيئي	72.58
درجة حرارة الغليان عند الضغط الجوي	-51.58°C
درجة الحرارة الحرجة	72.13°C 342.28K
الضغط الحرج	4926.1 KPa(abs)
الكثافة الحرجة	488.90 Kg/m ³
ثابت الغاز	R=0.11455 KJ/Kg.K

النقطة المرجعية لإيجاد الإنتالبي والإنتروبي:

$$h_f = 200 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \text{ عند } 0^\circ\text{C}$$

$$S_f = 1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}} \text{ عند } 0^\circ\text{C}$$

(3) معادلات الخصائص الترموديناميكية:

الخواص الناتجة هي في الواحدات الدولية، ويمكن تحويلها إلى الواحدات البريطانية باستخدام عوامل التحويل المعروفة.

1. ضغط البخار:

$$\ln\left(\frac{P_{sat}}{P_c}\right) = \frac{T_c}{T} (A + B \cdot X + C \cdot X^2 + D \cdot X^3 + E \cdot X^4 + F \cdot X^5)$$

$$X = \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/3} - X_o \quad \text{إذ:}$$

2. الحرارية النوعية عند ضغط ثابت للغاز المثالي:

$$C_p^o = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^4$$

3. الحرارية النوعية عند حجم ثابت للغاز المثالي:

$$C_v^o = C_p^o - R$$

4. كثافة السائل المشبع:

$$\frac{d_f}{D_c} = A_f + B_f \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{1}{3}} + C_f \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{2}{3}} +$$

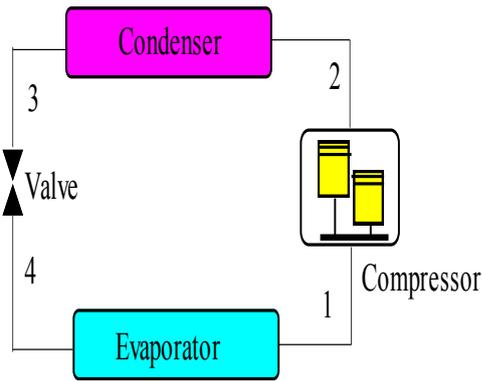
$$D_f \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) + E_f \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{4}{3}}$$

5. معادلة Martin - Hou لحالة الغاز:

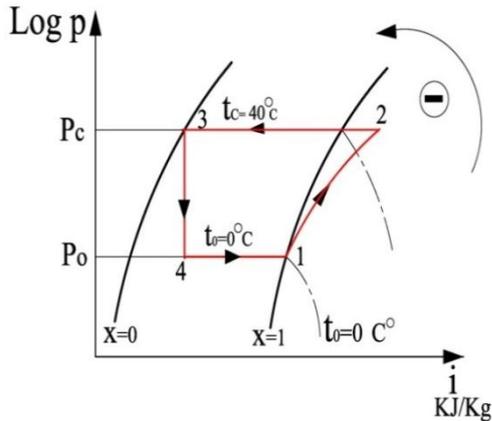
استخدمنا هذه المعادلة لإيجاد كل من الحجم النوعي

وكثافة البخار المشبع:

40°C، ودرجة حرارة تبخر 0°C تستخدم وسيط تبريد R410A الشكل (3)، يسحب الضاغط بخاراً مشبعاً جافاً، ولا توجد زيادة تبريد في المكثف. شرط تطابق الجداول التي أُنتِنت مع القيم في المرجع [8,7] والمرجع [9,10] أن تتساوى قيم: عمل الضاغط، والإنتاجية التبريدية ومعامل التبريد.



الشكل (3) دورة التبريد



الشكل (4) تمثيل الدورة التبريدية لـ R410A على مخطط I - log P

البارامترات في النقاط المميزة في الدورة باستخدام المعادلات المبرمجة في بحثنا مدرجة في الجدول (1).

الجدول (1)

وسيط التبريد HCFC R410A					
	P KPa	T C	h KJ/Kg	S KJ/Kg.K	x
1	798.9	0	422.6	1.814	1
2	2419.1	56.5	452.53	1.814	
3	2419.1	40	267.1	1.224	0
4	798.9	0	267.1	1.244	0.3

8. انتروبي البخار المشبع الجاف والمحمص:

انطلاقاً من المعادلة في المرجع [6] طُوِّرت العلاقة لحساب انتروبي كل من البخار المشبع الجاف، وانتروبي البخار المحمص وهي؛ بالشكل:

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} C_v^o dT + |R \ln(V - b)$$

$$- \frac{B_2}{(V - b)} - \frac{B_3}{2(V - b)^2} + \left(\frac{C_2}{V - b} + \frac{C_3}{2(V - b)^2} \right) \left(\frac{5.475}{T_c} \right) e^{-5.475 \frac{T}{T_c}} \Big|_{V_1, T_1}^{V_2, T_2}$$

لتصبح بالشكل:

$$s = s_o + R \ln \left(\frac{(V - b)P_1}{RT} \right) + a_1 \ln T + \sum_{i=1}^3 \frac{a_{i+1} T^i}{i} + \sum_{i=1}^4 \frac{-B_{i+1} + \frac{K}{T_c} \exp \left(-K \frac{T}{T_c} \right) C_{i+1}}{i (V - b)^i}$$

إذ:

$$s_o = -2.04088 \text{ KJ/KgK}$$

نفسها في معادلة Martin - Hou ومعادلة السعة الحرارية عند ضغط ثابت.

9. انتروبي السائل المشبع:

$$s_f = s_g - \frac{[h_g - h_f]}{T}$$

(4) مقارنة النتائج:

بُرِمِجَت المعادلات السابقة باستخدام برنامج MATLAB للحصول على البارامترات المميزة المذكورة أعلاه، وقورنت بالجدول الموجودة في [7,8]، وكذلك بتلك المأخوذة من برنامج EES حيث يستخدم المرجع [9,10] في حسابها وذلك من أجل وسيط التبريد R410A. افترضنا من أجل المقارنة أن لدينا دورة تبريد ضاغطة بخارية أحادية المرحلة تعمل عند درجة حرارة تكاثف

1.2% و 0.074 لمعامل التبريد، و 0.3 للإنتاجية التبريدية؛ أي 0.2%.

(5) النتائج والتوصيات:

1. تعطي الجداول التي أُنشئت اعتماداً على [3-6] قيماً أدق للضغط، الانتالبي، ولمجال أكبر من درجات الحرارة مقارنة مع [7,8].
2. تعطي الجداول في [7,8] قيم البارامترات بدلالة الضغط، في حين غالباً ما نقوم في دارات التبريد بإيجاد قيم البارامترات بدلالة درجات الحرارة؛ ممّا يضطرنا لاستخدام عمليات تقريب جدولية لإيجاد البارامترات المطلوبة. في حين أن الجداول التي أوجدناها في بحثنا هي بدلالة درجة الحرارة، ولمجال أكبر من القيم.
3. تعطي الجداول في [7,8] الخصائص الترموديناميكية فقط لمنطقة البخار المشبع الرطب، ولا تتوفر جداول لمنطقة البخار المحمص حيث يستخدم مخطط $h - \log P$ لإيجاد تلك القيم، من خلال البحث قمنا بإيجاد الخصائص الترموديناميكية في منطقة البخار المحمص، ولمجال واسع من قيم الضغط ودرجات الحرارة.
4. اعتماداً على المعادلات التجريبية أنشأنا مخطط $h - \log P$ لوسيط التبريد R410A موضح في الشكل (5) في ملحق البحث.
5. قيم عمل الضاغط، ومعامل التبريد التي تم إيجادها اعتماداً على [3-6] تختلف عن القيم الموجودة في ASHRAE بمقدار 8%. في حين تتطابق قيم الإنتاجية التبريدية.
6. قيم عمل الضاغط، ومعامل التبريد التي تم إيجادها اعتماداً على [3-6] تتطابق - إلى حد كبير - مع القيم الناتجة من استخدام برنامج EES[10] والاختلاف بمقدار 1.2%.
7. هذا البحث سوف يضع الأساس لإنشاء قاعدة بيانات لجدول ومخططات وسائط التبريد الحديثة، وللمناطق المختلفة (السائلة - والبخار المشبع الرطب - والبخار المحمص).

البارامترات لنقاط الجورة نفسها، ولكن باستخدام EES مدرجة في الجدول (2).

الجدول (2)

وسيط التبريد HCFC R410A					
	P KPa	T C	h KJ/Kg	S KJ/Kg.K	x
1	798.08	0	421.4	1.811	1
2	2425.64	57.3	451.7	1.811	
3	2425.64	40	266.2	1.221	0
4	798.08	0	266.2	1.242	0.299

البارامترات باستخدام جداول ASHRAE مدرجة في الجدول (3).

الجدول (3)

وسيط التبريد HCFC R410A					
	P KPa	T C	h KJ/Kg	S KJ/Kg.K	x
1	799.28	0	421.321	1.8103	1
2	2426.04	58	454	1.8103	
3	2426.04	40	266.34	1.2210	0
4	799.28	0	266.34	1.2428	0.3

بحسب كل من: عمل الضاغط والإنتاجية التبريدية ومعامل التبريد بالعلاقات التالية:

$$q_o = h_1 - h_4 \varepsilon = q_o / W_c \text{ و } W_c = h_2 - h_1$$

وقيمة مدرجة في الجدول (4).

الجدول (4)

	MATLAB	EES	ASHRAE
W_c [KW]	29.93	30.3	32.679
q_o [KW]	155.5	155.2	154.981
ε	5.195	5.121	4.742

من خلال القيم الواردة في الجدول (4) نلاحظ أن الفرق بين عمل الضاغط المحسوب باستخدام جداول ومخططات ASHRAE والجدول والمخططات التي قمنا بإيجادها هو 8%. وقيمته بلغت (2.75 KJ/Kg)، و (0.453) لمعامل التبريد أمّا الفرق في قيمة الإنتاجية التبريد فهو 0.33%.

في حين نلاحظ أن الفرق بين عمل الضاغط و معامل التبريد، والإنتاجية التبريدية المحسوبة باستخدام برنامج EES، والجدول والمخططات التي قمنا بإيجادها صغير جداً، وقيمته (0.37 kJ/kg) للعمل؛ أي

ملحق البحث

الجدول (1) الثوابت المستخدمة في المعادلة 1.

	2	3	4	5
Ai	1.721781 E - 01	2.381558 E - 04	-4.329207 E - 07	-6.241072 E - 10
Bi	1.646288 E - 04	-1.462803 E - 08	0.000000 E + 00	1.380469 E - 12
Ci	-6.293665E + 00	1.532461 E - 02	0.000000 E + 00	1.604125 E - 07
k	5.750000 E + 00			
b	4.355134 E - 04			

الجدول (2) الثوابت المستخدمة في المعادلة 2.

	1	2	3	4
a	2.676084 E - 01	2.115353E - 03	-9.848184 E - 07	6.493781 E - 11

الجدول (3) الثوابت المستخدمة لحساب الانتالبي

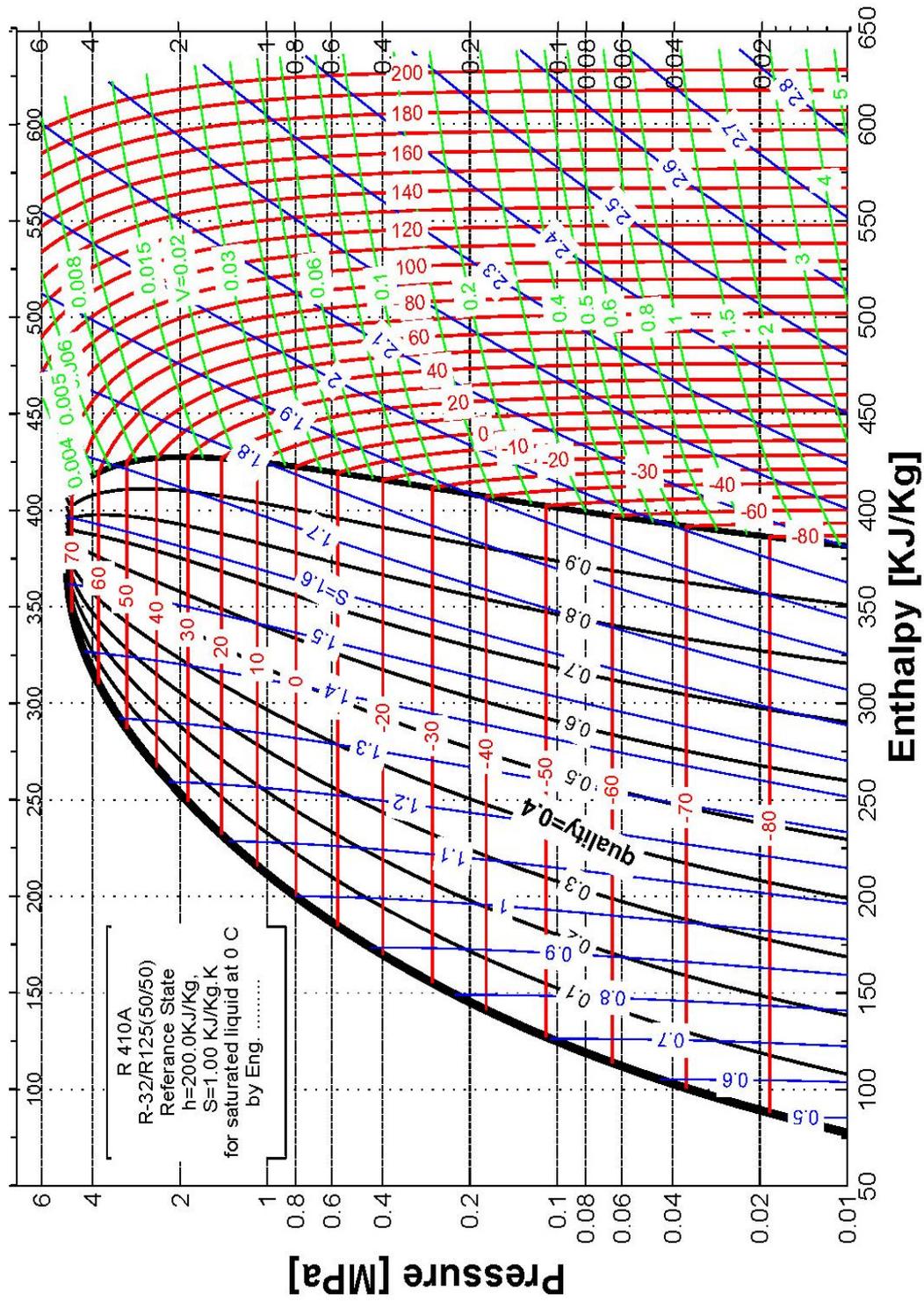
A=2.211749 E+02	B=-5.149668 E+02	C=-6.316250 E+02
D=-2.622749 E+02	E=1.052000E+03	F=1.596000 E+03
Xo=5.541498 E-01		

الجدول (4) الثوابت المستخدمة لحساب ضغط البخار

عند التكاثف			
A=-1.437600 E+00	E= -4.068750 E+00	A= -1.440004 E+00	E= - 3.521484 E+00
B= -6.871500 E+00	F= -1.233300 E+00	B= - 6.865265 E+00	F= -7.750000 E+00
C= -5.362300 E-01	Xo=2.086902 E-01	C= -5.354309 E-01	Xo= 2.086902 E-01
D= -3.826420 E+00		D= - 3.749023 E+00	

الجدول (5) الثوابت المستخدمة لحساب كثافة السائل

Af=1.000000 E+00	Bf=1.984734 E+00	Cf= -1.767593 E-01
Df=1.819972 E+00	Ef=-7.171684E-01	F=1.596000 E+03



الشكل 5. المخطط المنشأ اعتماداً على المعادلات التجريبية

المراجع REFERENCES

- [1] د مخبير، د عيسى، هندسة التبريد - منشورات جامعة دمشق - 2007.
- [2] Refrigerant report, 15ed, www.bitzer.de
- [3] Thermodynamic Properties of Suva® 9100 Refrigerant [Technical Information].
- [4] Solkane 410 Thermodynamics [Information Service].
- [5] Development of an Equation of State for Gases, Joseph J. Martin, Yu-Chun Hou.
- [6] Solkane -Pocket Manual, Refrigeration and Air-Conditioning Technology, Solvay Fluor und Derivate.
- [7] ASHRAE, Fundamentals Handbook (SI), Ch 30, 2009.
- [8] McLinden, M.O., S.A. Klein, E.W. Lemmon, and A.P. Peskin. 2000a. *NIST Standard Reference Database 23: Thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures*, Version 6.10 Standard Reference Data Program, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [9] Lemmon and Jacobsen. 1999. op. cit.
- [10] E. Lemmon "Pseudo-Pure Fluid Equations of State for the Refrigerant Blends R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C" International Journal of Thermophysics, Vol. 24, No. 4, July 2003

الرموز المستخدمة

درجة الحرارة °C	t
الضغط المطلق KPa	P
الحجم النوعي m ³ /Kg	v
كثافة Kg/m ³	d
الانتالبي KJ/Kg	h
ثابت الغازات العام 8.314 KJ/Kg.K	R
	الدليل السفلي
الطور السائل	f
الطور البخاري	g
حرارة التبخر KJ/Kg	hfg
الانتروبي النوعي KJ/Kg.K	s
الحرارة النوعية عند ضغط ثابت KJ/Kg.K	Cp
الحرارة النوعية عند حجم ثابت KJ/Kg.K	Cv

Received	2016/05/17	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/12/08	قبول البحث للنشر