تكييف الهواء في المركبات
باستخدام الأنبوبة الإعصارية كنظام تبريد للهواء

د. غسان مدلل*

الملخص

في هذا البحث واختبر نظام لتكييف الهواء في المركبات باستخدام الأنبوبة الإعصارية التي تعدّ جهازاً بسيطاً يعمل كآلة لتبريد الهواء دون أية أجزاء متحركة ضمنه. إذ يتألف من أنبوبة أساسية يدخل إليها تيار الهواء بشكل مماسي، ويضغط عال حيث ينفصل بداخلها إلى تيارين من الهواء، الأول بارد يخرج بشكل محوري من مركز الأنبوبة بالقرب من فتحة دخول الهواء، والثاني هواء ساخن يخرج بشكل محيطي من الطرف الثاني. يعتبر رانك من أوائل الباحثين الذين وثقوا ظاهرة انفصال الطاقة داخل الأنبوبة الإعصارية.

استخدمنا في بحثنا أنبوبتين إعصاريتين لتكييف حجرة المركبة حيث ثبت النظام داخل الحجرة. أما الهواء المضغوط فيأتي من ضاغط مكبسي يدار بمساعدة محرك المركبة. يغذى الهواء ذو الضغط العالي القادم من الضاغط إلى الأنبوبتين الإعصاريتين فنحصل في كل أنبوبة على تيارين للهواء ساخن وبارد، حيث يخرج البارد من فتحة محورية في الأنبوبة يغذي حجرة المركبة والهواء الساخن يطرد للخارج.

لقد اجرينا التجارب على الأنبوبة الإعصارية لتحديد استجابة درجة الحرارة على طرفي الأنبوبة الإعصارية عند ضغوط مختلفة لدخول الهواء وعند نسب مختلفة لتدفق الهواء البارد y_c . والنتائج مبينة في أخر البحث.

الكلمات المفتاحية: نظام تبريد الهواء بالأنبوبة الإعصارية، تكييف الهواء في المركبات.

* دكتور، قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Air-conditioning system in automobiles by using Vortex Tube as an Air-refrigerating System

Dr. Ghassan Moudallal*

Abstract

In this work a refrigeration system with vortex tube has been studying and testing as an air-conditioning system for cars. Vortex tube is a simple device working as a refigatating machine without any moving parts. It consists of a main tube, which a high-pressure air stream enters tangentially, and splits into two streams. The first is cold air stream leaves the tube through a central orifice near the entrance nozzle, while hot air stream flows circumference toward regulating valve and leaves the tube. Ranque was the earliest one who reported the phenomenon of energy separation in a vortex tube.

We used two vortex tubes as refrigarating system to conditioned the cabin of vehicle. where the system is fitted inside the cabin. The operating high pressure air comes from a reciprocating compressor which is driven by the shaft of engine vehicle. The high pressure air from the compressor was supplied to the two vortex tubes. So we obtain two streams of air hot and cold , the exite gold air from vortex tube is supplied to vehicle and the hot air is exhausted out of cabin.

An experimentals performed over the vortex tube to assest the reponses behaviour of temperature in both side of the vortex tube, with deffernet inlet pressure and with defferent percenet of gold air flow to total air flow (y_c). The experimental results has been showed.

Key words: Vortex tube refrigaration system, Air-conditioning for vehicles.

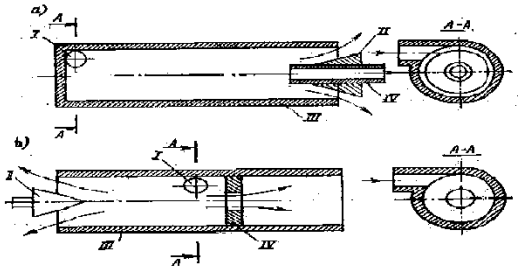
* **Faculty of Mechanical and electrical Engineering, Damascus University**.

المقدمة:

درس في هذا البحث واختبر نظام لتكييف الهواء في المركبات باستخدام الأنبوبة الإعصارية التي تعدّ جهازاً بسيطاً يعمل كآلة لتبريد الهواء دون أية أجزاء متحركة ضمنها. حيث تتألف الأنبوبة الإعصارية من أنبوبة أساسية يدخل إليها الهواء بشكل مماسي، وبضغط عال فينفصل بداخلها إلى تيارين من الهواء، الأول بارد يخرج بشكل محوري من مركز الأنبوبة بالقرب من فتحة دخول الهواء، والثاني هواء ساخن يخرج بشكل محيطي من الطرف الثاني من جهة الصمام التحكم، (الشكل 1).

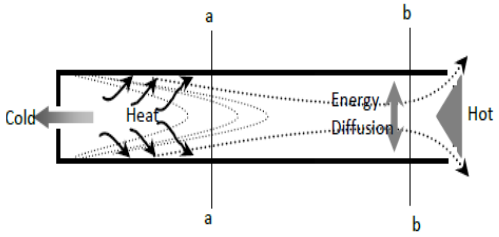
الشكل (1) مقطع في الأنبوبة الإعصارية

في الحقيقة يعدّ الباحث رانك [1] و[2] من أوائل الذين لاحظوا ظاهر انفصال الطاقة ضمن الأنبوبة الإعصارية. يبيّن الشكل (2) كما في المرجع [3] نموذجين للأنبوبة الإعصارية المدروسة من قبل العالم رانك (a– نموذج مباشر و b– نموذج متعاكس) التي أثبت من خلالهما آنذاك وجود اختلاف بين درجتي حرارة تياري الهواء المتحركين وفق محور الأنبوب، ومحيطياً بشكل حلزوني. فعندما يكون ضغط الغاز من (3÷5 bar) فإن درجة حرارة الغاز البارد تكون أخفض بمقدار (30÷70 oC) من درجة الحرارة البدائية للغاز. ومن ثمّ يمكن عدّ الأنبوب الإعصارية أداة تبريد تنتج الهواء البارد من أحد طرفيها والساخن من الطرف الثاني دون التأثير في البيئة.

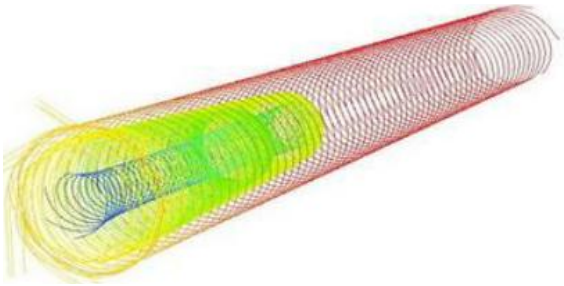


الشكل (2) الأنبوبة الإعصارية [3]

إذ إنّ تيار الهواء المحيطي يدور بسرعة عالية بالمقارنة بتيار الهواء في مركز الأنبوبة، ممّا يسبب انتقال الطاقة من تيار الهواء المحوري باتجاه تيار الهواء المحيطي بشكل عامودي على محور الجريان، حيث يعطي الهواء الذي يدور في محور الأنبوبة الطاقة إلى تيار الذي يدور عند محيطها، ممّا يرفع درجة حرارة الهواء المحيط ويخفض درجة حرارة الهواء في محور الأنبوبة، كما في الشكل (3) أمّا شكل الدوامة داخل الأنبوبة الإعصارية فيوضّحه الشكل (4) [4].



الشكل (3) انتقال الطاقة داخل الأنبوبة الإعصارية



الشكل (4) الدوامة داخل الأنبوبة الإعصارية

تعريف نظام تبريد الهواء بالأنبوبة الإعصارية:

إنّ غازات التكييف المستخدمة في أنظمة التكييف الحالية مكلفة وسامة وتؤثر في طبقة الأوزون. لذا قام العديد من الباحثين بدراسة الأنبوبة الإعصارية ونمذجتها

مثل سعيدي وباليمور [5]، كما قام الباحثان برامو وبورمحمو [6] بدراسة تأثير طول الأنبوبة في انفصال تياري الهواء. أما في هذا البحث سلّط الضوء على نظام تبريد الهواء بواسطة الأنبوبة الإعصارية واستخدامها في تكييف حجرة المركبة المبينة في الشكل (5). يمكن عدّ الأنبوبة الإعصارية واحدة من أنظمة التكييف البديلة التي يمكن أن تستخدم في تكييف المركبات [7]، وفي كثير من تطبيقات التبريد مثل (تبريد كبينة القواطع، والكوندكتورات الكهربائية وغرف حفظ الأدوية).

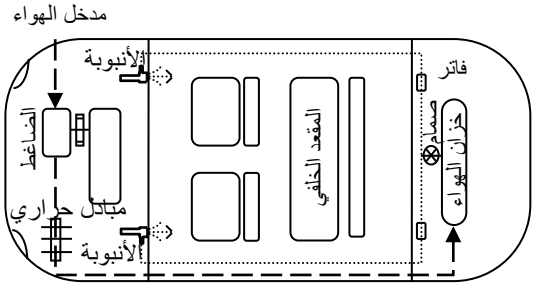
استخدمنا في بحثنا أنبوبتين إعصاريتين لتكييف حجرة السيارة كما في الشكل (5). حيث يرفع ضغط الهواء عبر ضاغط يدار بواسطة محرك المركبة، ومن ثم يبرد ضمن مبادل حراري لخفض حرارته بعد عملية الانضغاط إلى الدرجة K 36ºC ثم ينقل الهواء المضغوط إلى وحدة تخزين الهواء المجهزة في القسم الخلفي من السيارة، بعد ذلك يغذى الهواء بشكل مماسي إلى الأنبوبة الإعصارية بضغط 3bar حيث نحصل على تيارين من الهواء بضغط منخفض، أحدهما ساخن يطرد للخارج، والثاني بارد يستخدم لتكييف المركبة. تزود الأنبوبة بصمام لتعيير الهواء (صمام مخروطي يركب على جهة التيار الساخن) حيث تعتمد نسبة ودرجة حرارة الهواء البارد الخارجة من الأنبوبة على مقدار فتح هذا الصمام أو غلقه، ومن ثمّ الصمام يعمل كأداة للتحكم بدرجة حرارة الهواء المطلوبة.

أجرينا التجارب على الأنبوبة لتحديد استجابتها من حيث درجة حرارة خروج الهواء البارد والساخن بدلالة ضغط دخول الهواء. كما حدّدت استجابة درجة حرارة الهواء البارد كتابع للنسبة y_c (نسبة الهواء البارد إلى الهواء الكلي) والنتائج مبيّنة في أخر البحث.

إن وسيط التبريد في نظام تكييف الهواء باستخدام الأنبوبة الإعصارية هو الهواء المضغوط مّما يعطيه ميزة عدم التأثير في طبقة الأوزون، أو التسبب بالاحتباس الحراري. عندما يحقن الهواء بضغط عال وبشكل مماسي في حجرة الأنبوبة الإعصارية عن طريق فوهة الدخول ينتج تدفق للهواء بشكل إعصاري داخل حجرة الدوامة. حيث يتم دوران الدوامة بشكل حر باتجاه المخرج الساخن حتى يتم عكسها بواسطة صمام التحكم مما يشكل دوامة مجبرة على الحركة تنتقل من المخرج الساخن إلى المخرج البارد. ومن ثمّ جزء من الهواء يخرج من المخرج الساخن، وجزء أخر من المخرج البارد. يزوّد الهواء ذو الضغط المرتفع الوارد من ضاغط الهواء من خلال أنابيب إلى فتحة دخول الأنبوبة الإعصارية، حيث يستخدم الهواء البارد الخارج من الأنبوبة الإعصارية في تكييف حجرة المركبة، في حين يطرد الهواء الساخن إلى الجو الخارجي. يصنّع النظام كلّه ويركّب في المركبة، كما هو موضح بالشكل (5).

الإعداد التجريبي:

يبّين الشكل (5) البناء التجريبي للنظام في المركبة حيث تزوّد حجرة المركبة بأنبوبتين إعصاريتين واحدة جهة اليمين، والثانية جهة الشمال واللتان تزودان حجرة المركبة بالهواء البارد، أمّا الهواء الساخن فيطرد للخارج.

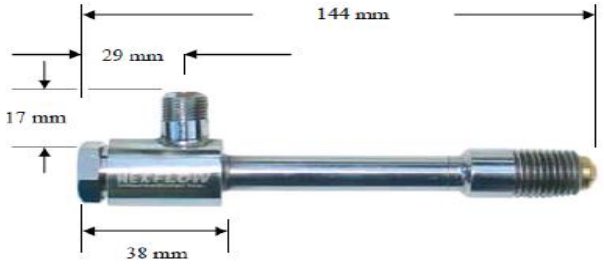


الشكل (5) نظام تكييف مركبة بالأنبوبة الإعصارية.

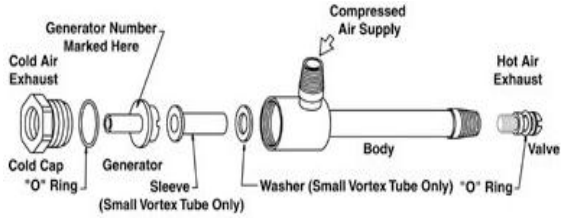
في تجربتنا صنعّت الأنبوبة الإعصارية، كما في الشكل (6) من أنابيب PVC بقطر داخلي مقداره16mm،

وقطر خارجي 2 mm. تحتوي حجرة الدوامة على أربعة ثقوب بقطر 3 mm تسمح بدخول الهواء بشكل مماسي أمّا قطر فوهة دخول الهواء المضغوط إلى الحجرة 10 mm. (الشكل7) يبيّن نموذج تجاري لأنبوبة إعصارية والشكل (8) يبيّن مكونات هذه الأنبوبة.

الشكل(6) يوضح النموذج التجريبي لأنبوبة إعصارية (PVC)



الشكل (7) يوضح نموذج تجاري لأنبوبة إعصارية



الشكل (8) مكونات الأنبوبة إعصارية

التجارب العملية:

أجرينا التجارب على هذه الأنبوبة عند قيم مختلفة للضغط تراوح بين (2–5 bar) مع قيم متغيرة للمتحول y_C . الذي يمثل نسبة الهواء البارد إلى الهواء الكلي، ويعطى بالعلاقة الآتية [8]:

$$y_c = \frac{m_c}{m_o} = \frac{T_i - T_c}{T_h - T_c}$$

إذ:

m_c – كتلة الهواء البارد kg/s

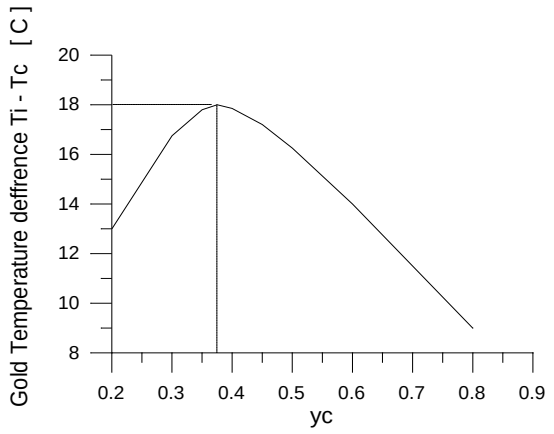
m_o – كتلة الهواء الكلية kg/s

T_c – درجة حرارة خروج الهواء البارد

T_h – درجة حرارة خروج الهواء الساخن

T_i – درجة حرارة دخول الهواء إلى الأنبوبة

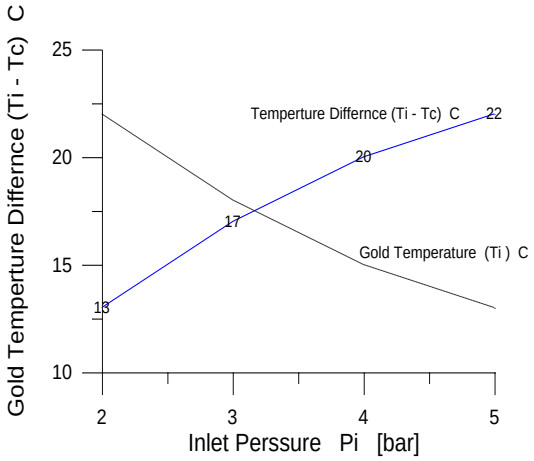
يبيّن الشكل (9) العلاقة بين الانخفاض بدرجة الحرارة ونسبة الهواء البارد y_C ، اذ وجد أنّ أكبر قيمة في انخفاض درجة الحرارة الباردة حصلت عند نسبة هواء بارد تراوح بين $y_c = 0.35 - 0.45$.



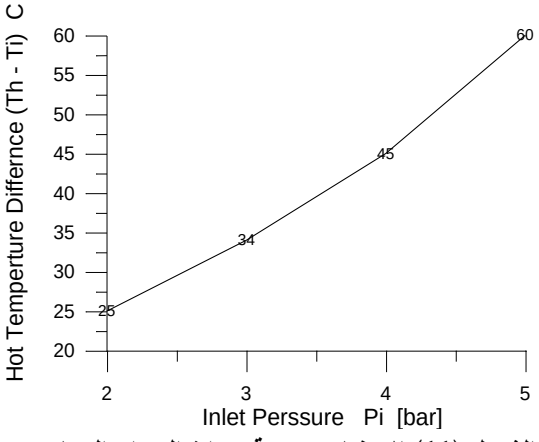
الشكل (9) الانخفاض بدرجة حرارة الهواء البارد بدلالة نسبة الهواء البارد.

كان الفرق بين درجة حرارة دخول الهواء من فوهة الأنبوبة الإعصارية ودرجة حرارة خروج الهواء البارد مساوياً $\Delta T_C = T_i - T_C = 36 - 18 = 18°C$ وذلك عند نسبة هواء بارد $y_C = 0.375$ ، كما يوضّح الشكل(9).

يبيّن الشكل (10) مقدار الفرق بين درجة حرارة دخول الهواء إلى الأنبوبة، ودرجة حرارة خروج الهواء البارد منها بدلالة ضغط الهواء عند فوهة الدخول إليها. اذ نلاحظ أنّ درجة حرارة الهواء البارد تنخفض مع ازدياد الضغط.



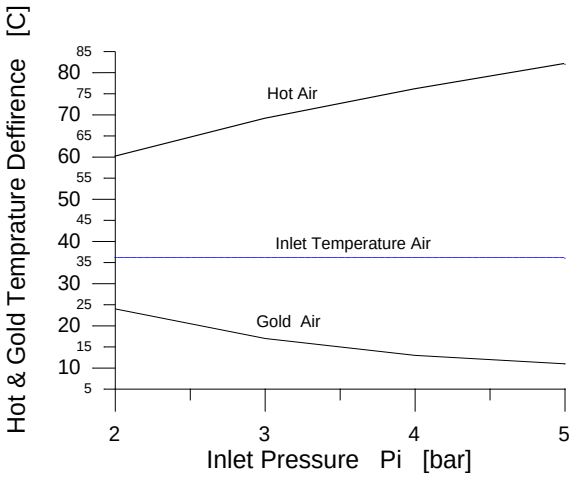
الشكل (10) الانخفاض بدرجة حرارة الهواء البارد بدلالة الضغط



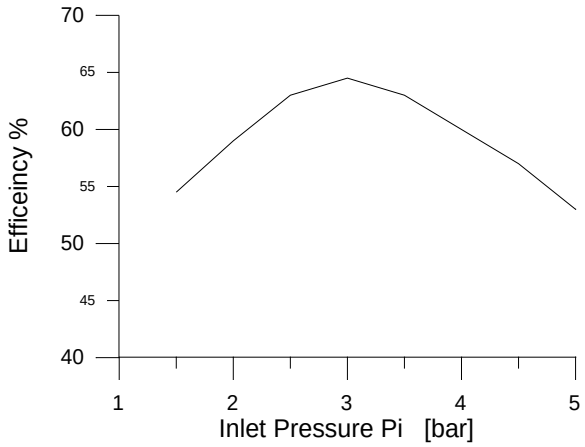
الشكل (11) الارتفاع بدرجة حرارة الهواء الساخن بدلالة الضغط

يتضح في الشكل (11) أنّ الارتفاع بدرجة حرارة الهواء الساخن تزداد كلما ازداد ضغط الهواء عند فوهة دخول الهواء.

يبيّن الشكل (12) تغير درجة حرارة كل من الهواء الساخن والبارد بدلالة الضغط اذ يلاحظ ازدياد الفارق بين درجة الحرارة الهواء الساخن، والهواء البارد مع ارتفاع الضغط. إلاّ أنّ المردود يكون أعظمياً عند الضغط 3 bar كما في الشكل (13) وهو الضغط الذي تم اعتماده في الدراسة.



الشكل (12) تغير درجة حرارة تياري الهواء الساخن والبارد بدلالة الضغط



الشكل (13) علاقة المردود بضغط الهواء عند المدخل

المعطيات التجريبية للأنبوبة الإعصارية:

اختبرت الأنبوبة الإعصارية عند تدفق هواء مقداره $m_o = 0.14\ kg/s$ ، وضغط $P_i = 3bar$ ، وكانت درجة حرارة الهواء الداخل إلى الأنبوبة الإعصارية $T_{in} = 36°C$. أمّا شروط الهواء الخارج من الأنبوبة فقد كانت عند ضغط جوي $P_a = 1bar$ وكانت درجة حرارة الهواء البارد $T_C = 18°C$ ، ودرجة حرارة خروج الهواء الساخن من جهة الصمام العياري $T_h = 68°C$ ، وقد عيّر الصمام على نسبة تدفق للهواء البارد إلى الهواء الكلي تساوي إلى 0.375 .

الحسابات:

استناداً الى المعطيات:

فإنّ مقدار الانخفاض في حرارة الهواء البارد يساوي:

$$\Delta T_C = T_i - T_C = 36 - 18 = 18°C$$

مقدار الزيادة في حرارة الهواء الساخن يساوي:

$$\Delta T_h = T_h - T_i = 68 - 36 = 32°C$$

الفرق بين درجتي حرارة الهواء عند نهايتي الأنبوبة:

$$\Delta T = T_h - T_C = 68 - 18 = 50°C$$

نسبة كتلة الهواء البارد إلى كتلة الهواء الكلية الداخلة في الأنبوبة تساوي:

$$y_C = \frac{m_c}{m_o} = \frac{\Delta T_C}{\Delta T} = \frac{18}{50} = 0.36$$

أي أنّ الهواء الكلي ينقسم إلى تيارين: الأول بارد بنسبة 36%، والثاني ساخن بنسبة 64% .

هبوط درجة الحرارة نتيجة التمدد تعطي بالعلاقة [6]:

$$\Delta T_{Cis} = T_i \times [1 - (\frac{P_a}{P_i})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}]$$

$$\Delta T_{Cis} = 38 \times [1 - (\frac{1}{3})^{\frac{0.4}{1.4}}] \approx 10°C$$

هبوط درجة الحرارة النسبي:

$$\Delta T_{rel} = \frac{\Delta T_C}{\Delta T_{Cis}} = \frac{18}{10} = 1.8$$

مردود الأنبوبة الإعصارية، ويعطى بالعلاقة [6]:

$$\eta = y_C \times \Delta T_{rel} = 0.36 \times 1.8 \approx 0.648$$

حيث:

ΔT_{rel} الانخفاض النسبي لدرجة الحرارة

y_C معامل الكتلة الباردة

الاستطاعة التبريدية للأنبوبة الإعصارية:

الاستطاعة التبريدية تساوي :

$$Q_{C_T} = m_c \times C_p \times (T_i - T_C)$$

إذ:

C_p السعة الحرارية للهواء kJ/kg·°C

Q_{C_T} الاستطاعة التبريدية kW

m_c تدفق الهواء البارد kg /s

نحسب تدفق الهواء البارد من العلاقة:

$$y_C = \frac{m_c}{m_o} = 0.36$$

ومنه:

$$m_c = y_C \times m_o = 0.36 \times 0.14 = 0.0504\ kg/s$$

$$Q_{C_T} = 0.0504 \times 1000 \times (36 - 18) = 907\ W$$

أمّا الحمل التبريدية الذي يمكن التغلب عليه ضمن حجرة المركبة فهو:

$$Q_{C_R} = m_c \times C_p \times (T_R - T_C)$$

$$Q_{C_R} = 0.0504 \times 1000 \times (25 - 18) \approx 353\ W$$

وبتركيب أنبوبتين في السيارة يمكن الحصول على استطاعة تبريدية مقدارها 706 W ضمن حجرة المركبة.

الاستنتاجات:

1- يستخدم الهواء في نظام تبريد الأنبوبة الإعصارية كوسيط تبريد وهو معدوم التأثير في طبقة الأوزون ولا يعدّ ملوثاً أو ساماً إذ أنّه غير قابل للاشتعال وصديق للبيئة.

2- إنّ شروط التكييف المحققة بواسطة نظام التكييف بالأنبوبة الإعصارية صحية، وملائمة للإنسان، وأكثر راحة من تلك المحققة بواسطة أنظمة التكييف المستخدمة في السيارات.

3- لا تحتوي الأنبوبة على أجزاء متحركة، فهي بسيطة التركيب، ولا تحتاج الى صيانة.

4- يمكن استخدام نظام الأنبوبة الإعصارية في الآليات الثقيلة التي تحوي أساسا خزاناً للهواء، وضاغطاً ولكن مع إضافة خزان هواء مستقل خاص بعملية التكييف.

5- إنّ معامل التبريد لدارة الأنبوبة الإعصارية منخفض بالمقارنة بدارة التبريد التقليدية إلاّ أنّ كون الوسيط العامل هو الهواء يجعله مقبولاً ويعطيه ميزة على الدارة التقليدية التي تستخدم وسائط تبريد التقليدية.

REFERENCE

1- **G. J. Ranque, Experimental on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air, Journal Physics Radium (Paris), 4:112-114 S-115, Jun, 1933.**

2- **G. J. Ranque, Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two outputs of fluid at different temperature, US patent, 1:952,281, 1934.**

3- **كتاب هندسة التبريد الجزء الأول نديم مخيبر وعلي عيسى**

4- **Nader Pourmahmoud & Abdol Reza Bramo, " The Effect of L/D Ratio on The temperature Separation in The Counter flow Vortex Tube" www.arpapress.com/Volumes/Vol6Issue1/IJRRAS_6_1_07.pdf**

5- **Saidi M.H. , Valipour M.S. "Experimental modeling of vortex tube refrigerator " Applied Thermal Engineering 23 (2003) 1971–1980**

6- **Bramo, A. R., Pourmahmoud N., "CFD simulation of length to diameter ratio effects on the energy separation in a vortex tube," IJRRAS, 2011, pp.1-16.**

7- **Mahesh Kumar Dhangar et al "Designing aspects of a vortex tube cooling system " Proceedings of IRF International Conference, 22nd March-2015, Jaipur, India, ISBN: 978-93-82702-80-1**

8- **B. Sreenivasa Kumar Reddy and K. Govindarajulu "Air cooling in automobiles using vortex tube refrigeration system " Applied Mechanics and Materials Vols. 592-594 (2014) pp 1408-1412 Submitted: 23.04.2014**

9- **Exair Corporation. Vortex tubes and spot cooling products. Available at [http://www.exair.com]**

Received	2016/04/12	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/12/15	قبول البحث للنشر