

## دراسة الفعالية الحرارية للمبادل الحراري الأنبوبي

الدكتور أيوب عيسى حسن\*

(تاريخ الإيداع 22 / 1 / 2009. قُبِلَ للنشر في 12/5/2009)

### □ الملخص □

يمكن القول إن الهدف من تطوير صناعة المبادلات الحرارية هو زيادة فعاليتها الطاقية وتحسين معامل انتقال الحرارة لها، إضافة إلى الحصول على أصغر وزن كتلي يلبي العملية الموكلة إلى هذه المبادلات، إلا أن ذلك يترافق بزيادة المقاومات الهيدروليكية وتغير في حالة الجريان، الأمر الذي يتطلب اختيار أفضل شروط لجريان الوسائط الناقلة للحرارة، وبالتالي تحسين عملية التبادل الحراري من وإلى سطوح المبادل.

يتضمن هذا البحث دراسة تحليلية للتبادل الحراري على سطوح المبادلات الحرارية الأنبوبية وتوزع التيارات الحرارية عليها، وحساب الفعالية الطاقية فيها، بهدف الحصول على أفضل معامل للفعالية الحرارية، مما ينعكس على اقتصادية المنشأة المستخدمة لهذه الأنواع من المبادلات، عن طريق ترشيد استهلاك الطاقة اللازمة لإنجاز عملية التبادل الحراري، والتوفير في مواد التصنيع وزمنه.

**الكلمات المفتاحية:** المبادل الحراري، كثافة التيار الحراري، الفعالية الطاقية، المقاومة الأيروديناميكية، مساحة سطح التبادل الحراري، الاستطاعة المصروفة.

\* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## A Study of the Thermal Activity for Shell and Tube Heat Exchangers

Dr. Ayuob Hasan \*

(Received 22 / 1 / 2009. Accepted 12 / 5 / 2009)

### □ ABSTRACT □

The aim of developing thermal exchangers' production, it is fair to say, is to improve their energetic activity and heat transfer coefficient, as well as obtaining minimum mass weight suitable to carrying out the process linked to such exchanges. This requires choosing optimal conditions for heat conductors' stream. Therefore, the heat-exchange process from and into exchanging surfaces can be improved.

This paper contains an analytical study of heat transfer from surfaces of Shell and tube heat exchangers, distribution of heating streams on them and an estimate of their energetic activity, in order to obtain maximum coefficient of energy. Thus, the economic installation using this sort of exchangers will gain further profit, through rationing the consumption of energy necessary to accomplish the heat exchange process, reduce the production materials' cost and save time.

**Keywords:** Heat exchanger; Density of heat stream; activity of Energy, Aerodynamic resistance, surface of heat exchanger, outgoing of power.

---

\*Associate Professor, Department of Power Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

تحظى المبادلات الحرارية في وقتنا الراهن بأهمية بالغة كإحدى أهم مصادر تبادل الطاقة الحرارية، حيث يعتبر المبادل الحراري جهازاً حرارياً يتم فيه تبادل الحرارة بين مادتين إحداها ساخنة والثانية باردة، وتكونان عادة من الموائع (السوائل أو الغازات)، وتقسّم المبادلات الحرارية إلى الأنواع الرئيسية التالية:

**أ - المبادلات الحرارية المسترجعة:**

يتم في هذا النوع من المبادلات فصل المائع الساخن والبارد عن بعضهما البعض بواسطة جدار، ويتم انتقال الحرارة بينهما عن طريق الحمل من المائع الساخن إلى الجدار وبالتوصيل عبر الجدار ومن ثم بالحمل من جديد من الجدار إلى المائع البارد. ويعتبر هذا النوع هو الأكثر استخداماً في الحياة العملية وتستخدم على الأغلب لتسخين أو تبريد الموائع التي يجب أن تكون مفصولة عن بعضها البعض لأسباب صحية أو كيميائية.

يتم انتقال الحرارة في هذا النوع من المبادلات بمرور الناقلين الحراريين على جدار الفصل (المسمى بسطح التبادل الحراري) بوقت واحد فيقوم الجدار الفاصل بانتزاع قسم من طاقة المائع الساخن وإعطائها إلى المائع البارد في حالة التسخين أو العكس في حالة التبريد.

**ب - المبادلات الحرارية المحولة أو المتجددة:**

يشغل المائع الساخن والبارد في المبادلات الحرارية المحولة (أو المتجددة) نفس الحيز ولكن بالتناوب في قلب المبادل، ويعمل قلب المبادل كجهاز خزان حراري يسخن دورياً بالمائع الساخن، وبعد ذلك تنقل الحرارة التي تم الاحتفاظ بها في قلب المبادل إلى المائع البارد الذي يمرر دورياً أيضاً. من أجل استمرارية العمل يمكن أن يكون المبادل مصمماً ليحتوي أكثر من قلب عامل في نفس الوقت.

تمتاز عملية التبادل الحراري في الحشوة بعدم الثبات، إذ إن درجة حرارة الأخيرة تتغير باستمرار مع الزمن. يستخدم هذا النوع بشكل كبير للتبادل الحراري بين الغازات لأن الموائع هنا تمر بشكل متناوب ولا حاجة لفصلها.

**ج - المبادلات الحرارية ذات التماس المباشر أو المزجية:**

يحصل في هذا النوع التلامس بين المائع الساخن والبارد مباشرة. وكمثال على المبادلات ذات التماس المباشر تعتبر أبراج التبريد التي يتم فيها تساقط رذاذ الماء من أعلى البرج ليكون في تماس مباشر مع الهواء الذي يتدفق للأعلى بشكل طبيعي نتيجة سخونته أو بشكل قسري بواسطة مروحة دفع، مما يبرد الماء المتساقط للأسفل. وما زالت الأبحاث جارية لتحديث منظومات التماس المباشر وغيرها من أنواع المبادلات الحرارية.

**د - المفاعلات:**

هي مبادلات حرارية ذات مصدر حراري داخلي ناتج عن تفاعل كيميائي أو نووي أو نتيجة عملية احتراق أو نتيجة فعل بيولوجي. ينساب في مثل هذه الأجهزة ناقل حراري واحد، ينقل الحرارة من المصدر إلى الأقسام الأخرى. وخير مثال على هذه الأجهزة، المفاعلات النووية والسخانات الكهربائية وأفران الوقود (الصلب أو السائل أو الغازي) المستخدمة لتسخين المياه أو لتبخيره كما هو الحال في أفران مولدات البخار [1],[2].

**أهمية البحث وأهدافه:**

يُعتبر كل من التبادل الحراري Heat Transfer ومعامل الاستفادة الحقيقي من الطاقة *real useful coefficient of energy* للعمليات التقنية، من أهم المميزات التي تعبر عن درجة اكتمال العمليات الفعلية لتبادل الطاقة أو عن عمليات تحولها من شكل إلى آخر .  
إن المردود والفعالية الطاقية *activity of Energy* غالباً ما يعبران عن الجزء المفيد من الطاقة والمستخدم في النظام المدروس  $W_{uesfull}$  ، وبالتالي يعطى المردود كنسبة الطاقة المفيدة إلى الطاقة المقدمة  $W$  :

$$\eta = \frac{W_{uesfull}}{W}$$

تعتبر مختلف أنواع تحولات الطاقة غير عكوسة بشكل عام، وبالتالي توجد ضياعات طاقية وهذا يعني أن مردود أية عملية تحويل للطاقة سيكون أصغر من الواحد الصحيح أي:  $\eta < 1$

عند حصول عمليات التبادل الحراري في المبادلات الحرارية يمكن ملاحظة عدد من التيارات الحرارية:

1- التيار الحراري الذي يعطي الطاقة المفيدة  $W_{uesfull}$  حيث:

$$W_{uesfull} \equiv Q$$

وتعطى  $Q$  من التوازن الحراري الذي يمكن تحديده لكل من الوسيطين الحراريين:

$$Q = G\Delta h$$

2- التيار الطاقى المفقود إلى الوسط المحيط  $Q_{los}$  ويتم الحصول عليه من التوازن الطاقى لكامل

$$Q = G_1\Delta h_1 = G_2\Delta h_2 + Q_{los} \quad \text{المبادل الحراري:}$$

حيث تشير اللاحقة السفلية الرمز 1 إلى الوسيط الحراري الساخن أما اللاحقة 2 فتشير إلى الوسيط الحراري

البارد؛  $Q_{los}$  تمثل الجزء من الطاقة المتبادلة مع الوسط المحيط ويمكن إنقاص هذا الجزء عن طريق العزل الحراري.

$$Q = G_1\Delta h_1\eta = G_2\Delta h_2 \quad \text{وتكتب معادلة التوازن الحراري في هذه الحالة بالشكل:}$$

حيث يوصف  $\eta$  نسبة الحرارة المفقودة إلى الوسط المحيط ويسمى بالمردود الحراري للمبادل.

3- الفقد الطاقى  $N$  والذي يمثل بالتيار الطاقى المستخدم لتدوير المضخات والمراوح وغيرها، وتتعلق

قيمه باستطاعة هذه التجهيزات وبالمقاومات الهيدروليكية لها وبمردودها التصميمي  $\eta_E$  ويعطى بالعلاقة.

$$N = G\Delta P / (\rho\eta_E)$$

حيث: يمثل  $G(kg/s)$  التدفق الكتلي للوسيط الحراري المار عبر هذا أو ذلك الجهاز،  $\Delta P$  : انخفاض

الضغط على سطح المبادل الحراري والمعطى بالعلاقة:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} (Pa)$$

$$\rho : \text{كثافة الوسيط الحراري } kg/m^3$$

ويرمز للضياعات الحرارية الأعظمية المتعلقة بفرق درجات حرارة الوسيط الحراري بين الدخول والخروج من

المبادل الحراري بـ  $Q_{max}$  الأمر الذي يخفض التيار الحراري المعطى.

وعليه يمكن القول بأن مردود سطح المبادل الحراري يمكن أن يوصف آلية حدوث عملية التبادل الحراري

وفعاليته، عند انتقال كمية من الحرارة  $Q$  وبالتالي توجد علاقة بين التيار الحراري المُستلم والتيار الحراري الأعظمي

الممكن  $Q_{max}$ .

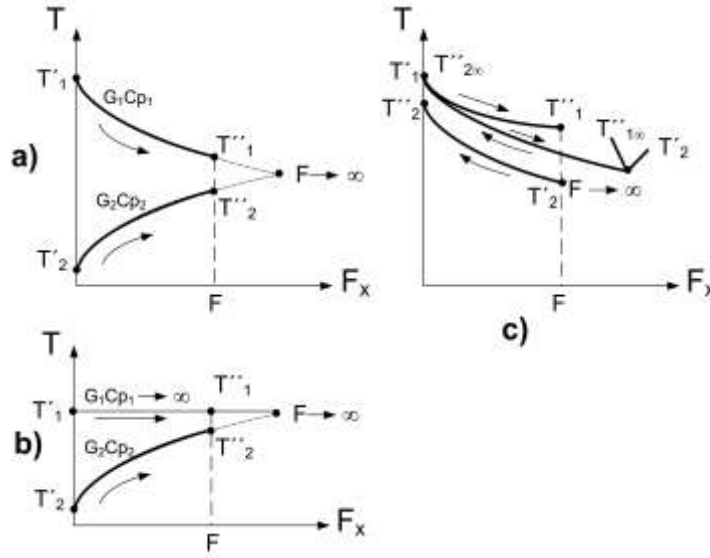
تعتبر الفعالية الحرارية من مواصفات التبادل الحراري السطحي من وجهة نظر الضياعات الحرارية، ولذلك توجد علاقة بين  $Q$  و  $N$ ، ارتباطاً مع ذلك وبالاعتماد على الفعالية الحرارية السطحية سوف نقسمها إلى:

- 1- فعالية عملية التبادل الحراري.
- 2- الفعالية الطاقية السطحية للمبادل.

### فعالية عملية التبادل الحراري:

تحدد فعالية عملية التبادل الحراري كنسبة التيار الحراري المُستلم  $Q$  إلى التيار الحراري الأعظمي  $Q_{\max}$ ، وسيتم اعتماد كتيار حراري أعظمي  $Q_{\max}$ ، التيار الذي يمكن إعطاؤه من الوسيط الحراري الذي يملك قيمة أصغرية للحد  $(Gc_p)_{\min}$ ، والذي سيملك درجة حرارة عند الخروج من المبادل مساوية لدرجة حرارة دخول الوسيط الحراري الآخر. يُظهر الشكل (1) عدداً من الاحتمالات الممكنة لتغيير درجات حرارة الوسائط الحرارية المثالية تبعاً لتغيير قيم الحد  $(Gc_p) \rightarrow \infty$  واتجاه الجريان. حيث يتبين من هذا الشكل أنه في التيار المباشر تتحقق قيمة التيار الحراري الأعظمي من خلال تحقق شرطين أساسيين:

- إما أن تكون مساحة سطح التبادل الحراري كبيرة إلى درجة لانهاية أي  $F \rightarrow \infty$ .
- أو يكون أحد الوسيطين الحراريين يملك  $(Gc_p) \rightarrow \infty$  أو بمعنى آخر  $(G_1c_{p1} \gg G_2c_{p2})$ . وتعتبر قيمة  $Q_{\max}$  الأعظمية من أجل التيار المتعاكس فقط، عندما يسعى سطح التبادل الحراري إلى اللانهاية  $F \rightarrow \infty$ .



الشكل (1) تغيير درجات حرارة الوسائط الحرارية؛

- a- تيار حراري مباشر من أجل  $(G_1c_{p1} \approx G_2c_{p2})$ ؛ b- تيار حراري مباشر من أجل  $(G_1c_{p1} \gg G_2c_{p2})$ ؛
- c - تيار حراري متعاكس من أجل  $(G_1c_{p1} \geq G_2c_{p2})$ .

إذاً فمخطط تدفق الجريان المتعاكس يملك حدوداً أصغرية، ويعتبر أكثر تعميماً، ولذلك يمكن أن يعطي تحديداً أكثر للتدفق الحراري الأعظمي. الذي يعرف بأنه التيار الحراري الذي يمكن أن ينتقل في الحالة المثالية فقط من المبادل الحراري ذي الجريان المتعاكس، عندما يكون سطح التبادل الحراري كبيراً جداً بلا حدود.

من هنا يمكن الإشارة إلى أنه عندما تعطى بارامترات العمل  $(T_1', T_2')$ ،  $(G_1c_{p1})$ ،  $(G_2c_{p2})$  فإن القيمة :

$$\varepsilon = \frac{G_1 c_{p1} (T_1' - T_1'')}{(Gc_p)_{\min} (T_1' - T_2')} = \frac{G_2 c_{p2} (T_2' - T_2'')}{(Gc_p)_{\min} (T_2' - T_1')}$$

يمكن اعتبارها كفعالية حرارية عند تبريد الوسيط الحراري الأول أو بالشكل:

$$\varepsilon = \frac{(T_1' - T_1'')}{(T_1' - T_2')}$$

حيث يكون:

$$(G_1 c_{p1}) = (Gc_p)_{\min} < (G_2 c_{p2})$$

وعند تسخين الوسيط الحراري الثاني فإن:

$$\varepsilon = \frac{(T_2' - T_2'')}{(T_2' - T_1')}$$

حيث يكون:

$$(Gc_p)_{\min} = (G_2 c_{p2}) < (G_1 c_{p1})$$

فإن:

$$Q_{\max} = (G_1 c_{p1})_{\min} \cdot \Delta T_{\max}$$

وتعطى الفعالية الحرارية في حالة التيار المتعاكس عند استخدام علاقة النفوذ الحراري كالتالي:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{kF\Delta T}{(Gc_p)_{\min} \cdot \Delta T_{\max}} = NTU_{\min} \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}$$

يكتب الحد  $NTU_{\min}$  بالشكل:

$$NTU_{\min} = \frac{kF}{(Gc_p)_{\min}} = \frac{1}{(Gc_p)_{\min}} \int_0^F k dF$$

والذي يعرف بعدد واحدة التبادل الحراري، ويربط بين أبعاد سطح التبادل الحراري وحجمه  $V(m^3)$  وعدد

الوسائط الحرارية المشاركة في عملية التبادل الحراري، ويعتبر مقياساً لتنظيم عملية التبادل الحراري [8].

### الفعالية الطاقية لسطح التبادل الحراري:

إن حل كثير من المشاكل المتعلقة بفعالية سطح التبادل الحراري التي تظهر عند تصميم أو إنتاج أجهزة التبادل

الحراري الجديدة، يمكن تقييمها على أساس ارتباطها بالفعالية الطاقية، تلك المسألة المعروفة وبشكل واسع (باسم المتانة

المتساوية). التي تعرف بأنها الخاصية الطاقية الأساسية للتبادل الحراري السطحي من أجل مساحة معلومة. حيث يجب

أن يتمتع سطح التبادل الحراري بالمواصفات الثلاثة التالية:

1- استطاعة التدفق الحراري المعطى  $Q(W)$ .

2- الاستطاعة المصروفة من خلال سطح التبادل الحراري  $N(W)$ .

3- مساحة سطح التبادل الحراري  $F(m^2)$ .

بناءً على ذلك يمكن ملاحظة ثلاثة احتمالات تتطابق مع التبادل الحراري السطحي وفقاً لفرضية المتانة

المتساوية وهي:

a- عن طريق التدفق الحراري  $Q$  (عندما تتساوى الاستطاعة المصروفة  $N$  من واحدة مساحة سطح التبادل

الحراري).

-b عن طريق الاستطاعة المصروفة N ( عند ثبات التيار الحراري المعطى Q من واحدة مساحة سطح التبادل الحراري F).

-c عن طريق سطح التبادل الحراري F ( عند معرفة الاستطاعة المصروفة N والتدفق الحراري Q).  
يوجد من أجل كل احتمال من الاحتمالات الثلاثة السابقة معامل فعالية يمكن وصفه بعلاقة رياضية وفقاً للصيغة المعتمدة التالية:

$$K_Q = \frac{Q}{Q_0}, K_N = \frac{N}{N_0}, K_F = \frac{F}{F_0}$$

a                      b                      c

ويمكن تطبيقها وفقاً للشروط التالية:

$$K_N = 1, K_F = 1 \text{ عندما } K_Q = ?$$

$$K_Q = 1, K_F = 1 \text{ عندما } K_N = ?$$

$$K_N = 1, K_Q = 1 \text{ عندما } K_F = ?$$

تنسب الحدود بدون لاحقات سفلية في علاقات تحديد  $K_Q, K_F, K_N$  إلى سطح التبادل الحراري التصميمي، أما الحدود التي تملك لاحقات سفلية 0 فتتنسب إلى سطح المقارنة أو السطح المعياري.

إن العلاقات المعروفة لوصف التبادل الحراري والمقاومة الهيدروليكية توضح بالتتابع التالية  $Nu(Re), Eu(Re)$  ، والتي يتم من خلالها الحصول على علاقات تصف التيار الحراري المعطى والاستطاعة المصروفة للوسيط الحراري المدروس [1]:

$$Q = \alpha F \Delta T, Nu = \frac{\alpha L}{\lambda_f} = c Re^m \rightarrow \alpha = \frac{\lambda}{L} c \frac{w^m L^m}{v^m} = \frac{\lambda}{v^m} c L^{m-1} w^m$$

$$N = \frac{G \Delta P}{\rho}, Eu = A Re^k \rightarrow \Delta P = \frac{\rho}{v^k} A L^k w^{(k+2)}, G = \rho w F$$

ومنه نستنتج معادلة لكل من Q, N من الشكل:

$$Q = c F \left( \frac{\lambda}{v^m} \right) L^{m-1} w^m \Delta T; \quad N = \left( \frac{\rho}{v^k} \right) A F L^k w^{(k+3)}$$

### طرائق البحث ومواده:

يعتبر هذا البحث تحليلياً، حيث جرى فيه استعراض الدراسات النظرية في هذا المجال وتحليلها، وتم التوصل إلى عرض مفهوم جديد حول دراسة التبادل الحراري من سطح المبادل الأنبوبي، وتم بعد ذلك ربطه وبشكل مباشر مع الفعالية الطاقية وطريقة جريان الوسائط الناقلة للحرارة بهدف زيادة الفعالية الطاقية للمبادل الحراري الأنبوبي.

### زيادة الفعالية الطاقية لسطوح التبادل الحراري بالحمل:

إن زيادة سماكة الطبقة الحدية الحرارية على سطح التبادل الحراري يؤدي إلى إنقاص شدة التبادل الحراري وبالتالي نقصان معامل الفعالية الطاقية لكامل سطح التبادل الحراري. من هنا يمكن القول: إن أية عملية تهدف إلى منع زيادة سماكة الطبقة الحدية الحرارية على سطح التبادل الحراري، يمكن أن تنسب إلى الطرق المتبعة لزيادة الفعالية

الطاقة، وعلى سبيل المثال زيادة الفعالية الطاقة للتبادل الحراري الناتج عن القسم الابتدائي، يمكن النظر إليه كطريقة لزيادة الفعالية للعديد من سطوح التبادل الحراري [1].

إن إحدى الطرق المتبعة لزيادة المساحة في أفنية سطح المبادل الحراري، تعتمد على طريقة الزعنفة والتي يمكن أن تكون؛ إما على شكل زعانف منقطعة على سطح الأنبوب، أو أفنية محلزنة داخلية أو خارجية. إن تصغير أقطار أنابيب المبادل يؤدي إلى إنقاص سماكة الطبقة الحدية. وفي الحالة الأخيرة يمكن معاملة سطح التبادل وكأنه صفيحة وبالتالي سيكون التيار الحراري متوسطاً، الأمر الذي يجعل الدراسة في مجال الطبقة الحدية الصفائحية. [1] [2]

تزداد سماكة الطبقة الحدية الصفائحية بازياد البعد  $X$  من نقطة البداية، إلى الحد الذي يصبح فيه هذا البعد مساوياً للطول الحرج  $L_{cr}$  ، الذي تبدأ عنده الحركة الانتقالية ويتحول الجريان من صفائحي إلى مضطرب، يتحدد هذا البعد من عدد رينولدز الحرج  $Re_{cr} = 5 \times 10^5$  . ويمكن أن يكون هذا العدد أكبر من ذلك بكثير فيما إذا كانت شدة الاضطراب صغيرة، كما ويمكن أن تكون قيمته أصغر فيما إذا كانت شدة الاضطراب كبيرة. ويتم حساب التبادل الحراري في حالة وجود القسم الصفائحي والقسم المضطرب للجريان معاً بالعلاقة [3]:

$$Nu_L = \sqrt{Nu_{Llam}^2 + Nu_{Ltor}^2}$$

حيث:

$$Nu_{L.lam} = 0.664 \sqrt{Re_L} \sqrt[3]{Pr};$$

$$Nu_{L.torb} = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) Re \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{(\xi/8)(Pr^{0.75} - 1)}}; \quad \xi/8 = 0.037 Re_L^{-0.2}$$

من أجل الأجسام التي تملك أشكالاً خاصة مثل الاسطوانات والكرات، يمكن حساب عدد رينولدز بمساعدة العلاقات من أجل الصفائح، فيما إذا استخدم في حساب عدد رينولدز وعدد نوسلت للجريان الصفائحي والمضطرب، البعد المميز المناسب والذي يسمى بالقطر المكافئ، وبحسب كنسبة المساحة على البعد الأكبر في المستوي للشكل الهندسي المدروس  $L = F / L_{body}$  . بقدر ما تكون قيمة عدد رينولدز صغيرة من أجل الأبعاد الثلاثة للجسم، حيث يسعى عدد رينولدز  $Re_{L \rightarrow 0}$  فإن التبادل الحراري يحسب وفقاً للعلاقة:

$$Nu_L = Nu_{Lmin} + \sqrt{Nu_{Llam}^2 + Nu_{Ltor}^2}$$

من أجل الأسطوانة الطويلة التي تملك قطراً مقداره  $d$  يحسب الطول المميز بالعلاقة:

$$L = F / L_{body} = \left(\frac{\pi d L}{2}\right) / L = \frac{\pi d}{2}$$

فتكون قيمة عدد نوسلت  $Nu_{Lmin}$  للأسطوانات الطويلة من مرتبة  $Nu_{Lmin} = 0.3$  ، ولذلك تأخذ الحسابات الحرارية للأسطوانات الشكل التالي [3]:

$$Nu_L = 0.3 + \sqrt{Nu_{Llam}^2 + Nu_{Ltor}^2}$$

يمكن استخدام الطريقة المعروضة أعلاه لحساب التبادل الحراري حتى من أجل الحزم الأنبوبية وكذلك من أجل الأنابيب المتوضعة بشكل عرضي. وفي هذه الحالة لا بد من الأخذ بعين الاعتبار خصوصية كل حالة من حالات



توزيع الأنابيب، بشكل شطرنجي أو بشكل خطي، وكذلك سرعة الجريان وتأثيرها على التبادل الحراري، إضافة إلى خطوة توزيع الأنابيب وعددها في الحزمة.

تعتمد هذه الطريقة على علاقة رينولدز المعروفة، وفي هذه الحالة عند النظر إلى الفعالية الطاقية، فإن الاستطاعة المفقودة بواسطة قوى الاحتكاك على السطح العنصري المدروس يجب النظر إليها كمقياس صغير لضياعات الاستطاعة للوسيط الحراري. إذا فهذه الصيغة ترتبط بطريقة تصنيع السطوح وبإبعاد هذه السطوح. وارتباطاً مع ذلك فإن إمكانية زيادة الفعالية الطاقية للحزم الأنبوبية المتوضعة بشكل عرضي يمكن تحقيقه عن طريق التأثير المتبادل للجريان ضمن الفراغ بين الأنابيب وتأثير هذا الفراغ على الجريان. ففي هذه الحالة لا بد من رفع درجة اضطراب الجريان وبشكل قسري، ولتنظيم الجريان لا بد من تحقيق الأتي:

1 - تحديد القوانين التي تعطي ضياعات الضغط الحقيقية على شكل متتالٍ بما يتفق ونظام الجريان.

2- تأمين خلخلة للتيار المتدفق.

3 - تنظيم طرق الحركة بين الأنابيب المتجاورة، إحداهما تملك إمكانية طبيعية لتدرج الضغط وأخرى لا تملك تدرجاً للضغط لأحد الوسائط الحرارية أو لكليهما، إلا أن حقول الضغط لهما يجب أن تتوافق عند منتصف طول الموجة.

4 - ظهور مناطق انقطاع التيار، الأمر الذي يؤدي إلى ظهور الجريان الانتشاري والجريان التلامسي. [1],[6]

### النتائج والمناقشة:

يمكن من خلال دراسة الجريان والمقاومة الهيدروليكية والتبادل الحراري والفعالية الحرارية في الفراغ بين حزم الأنابيب ذات التوزيع المتناسق الشطرنجي والخطي الخلوص إلى النتائج التالية:

**أولاً - تحديد الضغط والسرعة تبعاً لمواصفات الجريان:**

تتصف حزم الأنابيب ذات التوزيع الخطي والشطرنجي بالخطوة العرضية  $\alpha = S_1 / d$  والخطوة الطولية  $b = S_2 / d$  ويقطر أنبوب الحزمة  $d$  وبالخطوة المكافئة  $S'_2$  التي تتحدد بالشكل:

$$S'_2 = \sqrt{\left(\frac{S_1}{2}\right)^2 + S_2^2} \text{ من أجل التوزيع الشطرنجي.}$$

$$S'_2 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \text{ من أجل الحزم ذات التوزيع الخطي.}$$

حيث إن جريان المائع على حزمة الأنابيب ذات التوزيع الشطرنجي تتطابق في كثير من الأحيان مع الجريان عبر قناة متعرجة، أما الجريان على الحزمة ذات التوزيع الخطي فتشبه الجريان عبر قناة مستقيمة. إن تمثيل الجريان حول حزم الأنابيب ذات التوزيع الشطرنجي والخطي عندما تكون النسبة  $\frac{S_2}{d} \approx 1$  موضحة في الشكل (2). وفي الحالة

التي تكون فيها قيمة  $\frac{S_2}{d}$  كبيرة يمكن أن يحصل التطابق بين الجريان حول الحزم ذات التوزيع الشطرنجي والخطي،

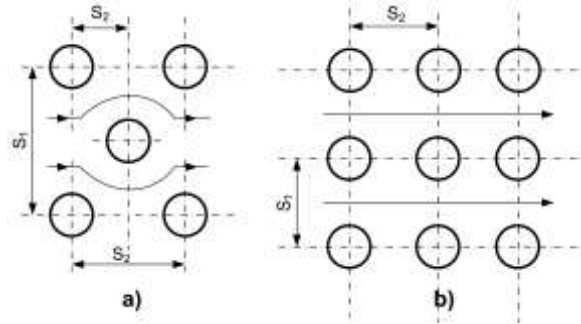
كما هو واضح من الشكل (3). ففي الحالة الأولى حيث  $\frac{S_2}{d}$  صغيرة، فإن حقل السرعة في الحزم العميقة يكون

متطابقاً، أما في الحالة الثانية حيث  $\frac{S_2}{d}$  كبيرة، فإن منحنى السرعة بين الصفوف المتماثلة يكون

متطابقاً. [1][2]

يحدد نظام الجريان على الحزم الأنبوبية بعدد رينولدز  $Re$  بشكل شرطي، وارتباطاً مع عدد رينولدز يمكن تقسيم نظام الجريان إلى المجالات التالية:

- 1- من أجل  $Re < 1 \times 10^3$  بداية التغلب على نظام الجريان الصفائحي.
- 2- من أجل  $Re < 2 \times 10^3$  بداية نظام الجريان الحرج أو نظام الجريان المختلط.
- 3- من أجل  $Re > 2 \times 10^5$  بداية نظام الجريان المضطرب أو نظام الجريان الحرج.
- 4- من أجل  $Re > 4 \times 10^5$  نظام الجريان فوق الحرج.



الشكل (2) توزيع الجريان حول الأنابيب a - ذات التوزيع الشطرنجي  $\frac{S_2}{d} \approx 1$  والخطي  $\frac{S_2}{d} \approx 1$

بالاعتماد على ما تمت مناقشته أعلاه يمكن ملاحظة ما يلي:

أ- إذا كان عدد رينولدز صغيراً فإن التيار الرئيسي للجريان يكون صفائحيًا، وعلى الجزء الخلفي من الأنبوب تكون دورات التدفق متماثلة.

ب- عند زيادة عدد رينولدز فإن التيار في الفراغ بين الأنابيب يصبح متخلخلاً مع زيادة درجة الاضطراب، وبالسير على كامل الأنبوب يصبح الجريان مضطرباً وتتطور الطبقة الحدية الصفائحية على أي جزء من الأنبوب متحولة إلى مضطربة.

في نظام التوزيع الخطي، وعند ازدياد عدد رينولدز لأكثر من  $Re > 1 \times 10^3$ ، فإن الجريان الصفائحي يتحول إلى جريان شديد الاختلاط في الاتجاه العرضي. وكذلك هو الحال بالنسبة للتوزيع الشطرنجي الذي يملك قيمة كبيرة للخطوات الطولية وقيمة صغيرة للخطوات العرضية، حيث يصبح قريباً بخواصه من نظام التوزيع الخطي. أما من أجل أنظمة الجريان ذات التوزيع الشطرنجي الأخرى فيحصل الجريان الانتقالي عند قيم أصغر لعدد رينولدز. ويرتبط ظهور الاضطراب في الفراغ بين الأنابيب بشكل حزمة الأنابيب وبعده رينولدز  $Re$ . من أجل الخطوات العرضية الصغيرة نسبياً يظهر اضطراب السرعة أكثر حدة، وعند الدخول في الصف التالي وتحت تأثير تدرج الضغط السلبى فإن هذا الاضطراب يخمد بسرعة أكبر مما لو كانت الخطوات كبيرة.

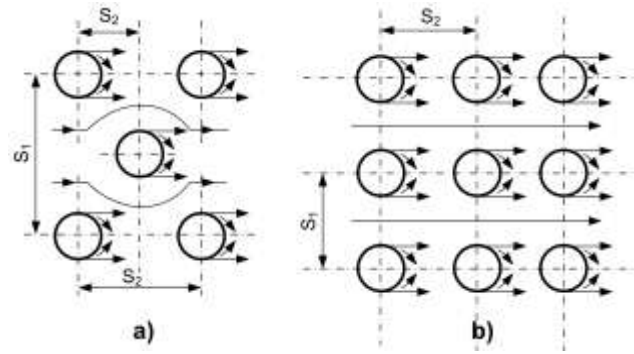
إن الاضطراب الذي يحمله التيار القادم عند دخوله إلى حزمة الأنابيب يؤثر على أنابيب الصف الأول والثاني فقط، أما الأنابيب في الصفوف الداخلية للحزمة فتتلقى تيارات أكثر اضطراباً، ارتباطاً بالشكل الهندسي للحزمة وأبعاد خطواتها.

ج - إن أجل  $Re > 2 \times 10^5$  يدخل نظام الجريان المضطرب أو الحرج، ويضطرب التيار في الفراغ بين الأنابيب بشدة، ويظهر الجريان المضطرب من خلال الطبقة الحدية على الأنبوب. وبشكل عام تملك الأنابيب

الانسيابية خواصاً اضطرابية متغيرة، وظهور ذلك يعني مؤشراً لبداية تحول الطبقة الحدية الصفائحية إلى مضطربة وبتجاه أية نقطة حرجة، وانفصال الطبقة الحدية المضطربة يمتزج من الأسفل بالتيار القريب من النقطة الحرجة.  
 د - من أجل  $Re > 4 \times 10^5$  يكون نظام الجريان فوق الحرج ويملك الجريان في الفراغ بين الأنابيب طبقة حدية ذات طبيعة اضطرابية ويعطى معامل توزيع الضغط بالعلاقة:

$$\bar{P} = 1 - \frac{P_{\varphi=0} - P_{\varphi}}{1/2(\rho \bar{w}^2)}$$

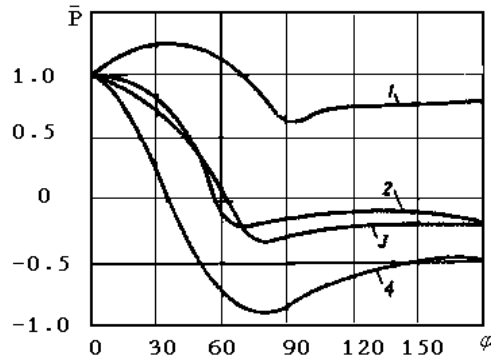
حيث تظهر قيمة السرعة على الأنابيب في الصفوف الداخلية العميقة مختلفة عن قيمها على الأنابيب الوحيدة، وتختلف قيمتها على كل صف من الصفوف.



الشكل (3) شكل الجريان على الحزم الأنبوبية عندما تكون النسبة  $\frac{S_2}{d}$  مرتفعة

a- الحزم ذات التوزيع الشطرنجي  $\frac{S_2}{d} \geq 6$  ؛ b- الحزم ذات التوزيع الخطي  $\frac{S_2}{d} \geq 6$

يظهر الشكل (4) النتائج التجريبية [3] حيث  $\bar{P} = f(\varphi)$ ، من أجل الصف الوحيد ( $z_2 = 1$ )، ومن أجل الصفوف الداخلية في الحزم ذات التوزيع الشطرنجي والخطي ( $z_2 = 4$ ). ويتبين من هذا الشكل:  
 1 - أن الجريان على الصف الأول من الحزم ذات التوزيع الخطي والشطرنجي حيث ( $z_2 = 1$ )، يكون مشابهاً للجريان حول أنبوب مفرد في النظام قبل الحرج، إضافة إلى أنه في الحزم ذات التوزيع الشطرنجي، وقبيل انفصال الطبقة الحدية يلاحظ ازدياداً غير كبير للضغط  $\bar{P}$  بالمقارنة مع الأنابيب المفرد.



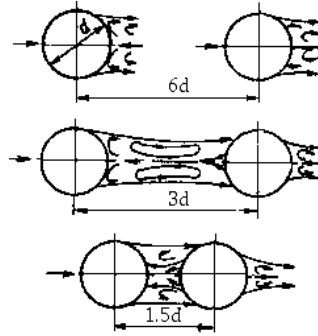
الشكل (4) توزيع الضغط  $\bar{P}$  على محيط الأنابيب ذات التوزيع الخطي والشطرنجي

- 1- على الصف الرابع من الحزمة ذات التوزيع الخطي؛ 2- على الصف الأول من الحزمة ذات التوزيع الخطي؛  
3- على الصف الأول من الحزمة ذات التوزيع الشطرنجي؛ 4- على الصف الرابع من الحزمة ذات التوزيع الشطرنجي

2 - يلاحظ حصول القيمة العظمى للضغط  $\bar{P}_{max}$  في نقطة اصطدام التيار بسطح الأنبوب، أما القيمة الصغرى للضغط  $\bar{P}_{min}$  فتكون قبيل انفصال الطبقة الحدية عن السطح، حيث يحصل استقراراً للضغط  $\bar{P}$ ، بعد انفصال الطبقة الحدية وفي منطقة التدوير يكون  $\bar{P} = const$ .

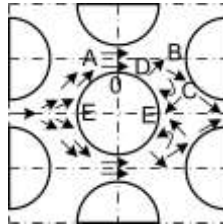
من أجل الصفوف الداخلية ذات التوزيع الخطي حيث  $z_2 \geq 4$  يكون  $\bar{P} = \bar{P}_{max}$  ويحدث ذلك من أجل زاوية مجابهة  $\varphi = 30-50^\circ$  الشكل (5). بعد اصطدام التيار بسطح الأنابيب يحصل زيادة في درجة الاضطراب مع تطور طبقتين حديتين وجريان عكسي حيث:  $\bar{P} = \bar{P}_{min}$  عند زاوية مجابهة  $\varphi = 90^\circ$ ، ويحصل الضغط المستقر  $\bar{P}$  عند انفصال الطبقة الحدية، عند الزاوية  $\varphi = 120^\circ$ .

من أجل الصفوف الداخلية في الحزم ذات التوزيع الشطرنجي ( $z_2 = 4$ ) فإن  $\bar{P} = \bar{P}_{max}$  ( $\varphi \approx 0$ ) يُفسر زيادة الضغط قبيل انفصال الطبقة الحدية بالتحول من الطبقة الحدية الصفائحية إلى المضطربة، وتحصل القيمة الأعظمية عند انفصال الطبقة الحدية المضطربة عن سطح الأنابيب حيث  $\bar{P} = \bar{P}_T$  ( $\varphi = 140-150^\circ$ ) كما في الشكل (6)، حيث  $\bar{P}_T$  يمثل ضغط انفصال الطبقة الحدية.



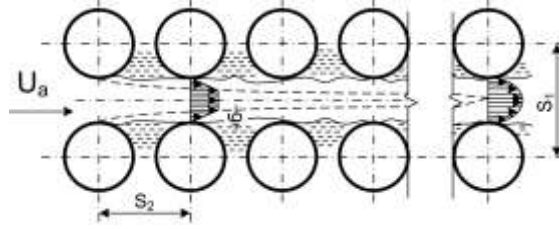
الشكل (5) مخطط الجريان على الصفوف الداخلية من الحزمة ذات التوزيع الخطي

تمثل المنطقة A على الشكل (6) تسارع التيار وتمثل المنطقة B الجريان المتوسط، أما المنطقة C فتتمثل منطقة الخواء (الفراغ) وتمثل المنطقة D منطقة ازدياد الجريان. يتوزع السائل عند أية نقطة حرجة إلى مختلف الاتجاهات. وفي أي جزء من الأنبوب يتمثل بالمنطقة A يتسارع فيه التيار، بينما يصبح الجريان متوسط السرعة في المنطقة الخلفية (المنطقة B). إن التطورات التي تحصل بعد انفصال الطبقة الحدية تؤدي إلى تباطؤ الجريان من جراء الخواء (الانفراغ)، وفي المنطقة الخلفية للنقطة الحرجة C يتحرك التيار بالاتجاه المعاكس على سطح الأنابيب وتظهر الطبقة الحدية الصفائحية.



الشكل (6) مخطط الجريان على الصفوف الداخلية لحزمة أنابيب ذات توزيع شطرنجي

يتأثر توزيع السرعة على حزمة الأنابيب بشدة بالخطوة العرضية  $\alpha = \frac{s_1}{d}$ ، وإن نقصان  $\alpha$  يؤدي إلى زيادة السرعة في كل من الحزم ذات التوزيع الخطي والشطرنجي. إن الحزم ذات التوزيع الخطي تتأثر بشدة أيضاً بالخطوة الطولية  $\beta = \frac{s_2}{d}$  الشكل (7).



الشكل (7) مخطط الجريان على حزمة أنابيب ذات توزيع خطي مضغوطة  $s_2 = d$

### ثانياً - المقاومة الأيروديناميكية لحزمة من الأنابيب ذات ترتيب متناسق

تعتبر المقاومة الأيروديناميكية أهم خواص حزمة الأنابيب، فعند الجريان العرضي على حزمة من الأنابيب تظهر قوى مقاومة تؤثر على الأنابيب، قيمتها الإجمالية تساوي مجموع قوى الاحتكاك  $F_x$  وقوى الضغط

$$F = F_x + F_w \text{ أي: } F_w$$

ويعطى معامل قوى الاحتكاك بالعلاقة [2]:

$$C_f = \frac{\tau_w}{(\rho w^2)/2}$$

حيث  $\tau_w$ : إجهاد القص المماسي على الجدار،  $w$  السرعة المتوسطة في المقطع الاصفري للأنابيب. من أجل توزيع معروف للسرعة  $w_x$  ضمن الطبقة الحدية فإنه يمكن تحديد إجهاد القص المماسي  $\tau_w$  لأي جزء اعتباراً من أية نقطة حرجة ( $\varphi = 0$ ) حتى المنطقة الخلفية أو إلى مكان انفصال الطبقة الحدية ( $\varphi_T$ )، وتعطى القيمة الكلية لقوة الاحتكاك بالعلاقة:

$$F_w = \frac{1}{F} \int_0^f \tau_w dF$$

حيث  $F$  مساحة سطح الأنابيب التي تحتلها الطبقة الحدية، أما مقاومة الضغط فتعطى بالعلاقة:

$$C_x = \frac{F_x}{A(\rho w^2)/2}$$

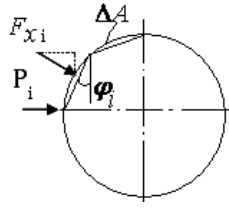
حيث  $F_x$ : القوة الطولية الناتجة عن الضغط و  $A = dL$  مساحة المقطع الطولي للأنابيب، ويمكن حساب  $F_x$

بالشكل:

$$F_x = \Delta A \sum_{i=1}^n (P_i \cos \varphi_i)$$

حيث  $\Delta A = \frac{\pi d L}{n}$ : الجزء المدروس من مساحة الأنابيب؛  $n$  عدد الأجزاء المشاركة في قياس الضغط؛  $P_i$ :

الضغط المقاس على الجزء من سطح الأنابيب؛  $L$  طول الأنبوب المدروس الشكل (8).



الشكل (8) قوى الضغط المؤثرة على الأنبوب

بالنظر إلى الشكلين (9) و(10) يتبين:

- 1- في مكان تصادم التيار مع الأنبوب وانفصاله عنه ويكون  $C_f = 0$ .
- 2- تتعلق القيمة الأعظمية لـ  $C_{f_{max}}$  بعدد رينولدز ويحصل ذلك عند القيمة  $\varphi \approx 50 - 80^\circ$ .
- 3- تصبح قيمة  $C_f$  أصغر بعد انفصال الطبقة الحدية وقيمة سالبة.
- 4 - تكون قيمة  $C_x$  للحزمة الأنبوبية ذات التوزيع الشطرنجي أكبر منها للحزمة ذات التوزيع الخطي.
- 5 - عند القيم الصغيرة لعدد رينولدز تكون  $C_f = C_x$ ، أما عند القيم الكبيرة لعدد رينولدز فتكون  $C_f \ll C_x$ ، ويزيادة عدد رينولدز تنقص النسبة بينهما، فمثلاً عندما  $Re = 10^4$  للحزم ذات التوزيع الشطرنجي تكون النسبة  $C_f / C_x \approx 0.07$  وعندما يصبح  $Re = 3 \times 10^5$  تكون النسبة  $C_f / C_x \approx 0.01$ . وبكلام آخر يمكن القول:

" أن المقاومة الأساسية للجريان الانسيابي على حزمة من الأنابيب ستشكلها مقاومة الضغط".

تتعلق المقاومة الأيروديناميكية الكلية على حزمة أنابيب بشكل عام بخواص جريان السائل في الفراغ بين الأنابيب وبعدد صفوف الأنابيب في طريق التيار الحراري  $z_2$ ، وتتعلق أيضاً بالخواص الفيزيائية للوسيط الحراري، حيث تستخدم في حساب المقاومة الحرارية عادة العلاقة التي تم التوصل إليها تجريبياً والتي تملك الشكل اللا بعدي التالي [1]:

$$\xi = \frac{\Delta P}{(\rho w)^2 / 2} = 2Eu = f(Re, \frac{s_1}{d}, \frac{s_2}{d}, z_2)$$

اعتماداً على الدراسات التجريبية [3],[5]، في هذا المجال تم التوصل إلى معادلة تملك الشكل التالي من أجل الحزم الشطرنجية:

$$\xi = c_p Re^k (z_2 + 1) \quad (1)$$

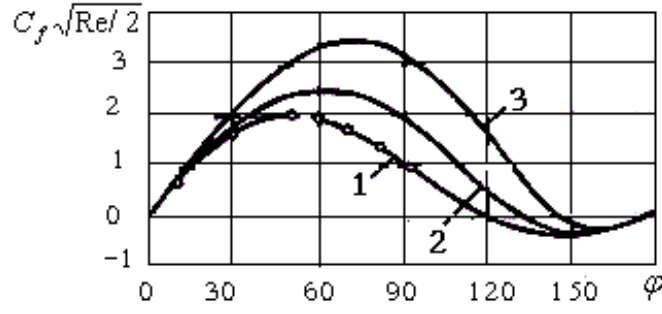
وللحزم ذات التوزيع الخطي من الشكل:

$$\xi = c_p Re^k z_2$$

حيث:  $C_p$  ثابت شكل الحزمة، وتعتمد درجة الحرارة المتوسطة لتحديد الخواص بالعلاقة:

$$\bar{t} = 0.5(t_{in} + t_{out})$$

وتستخدم السرعة المتوسطة في أضيق مقطع للحزمة كسرعة حسابية.



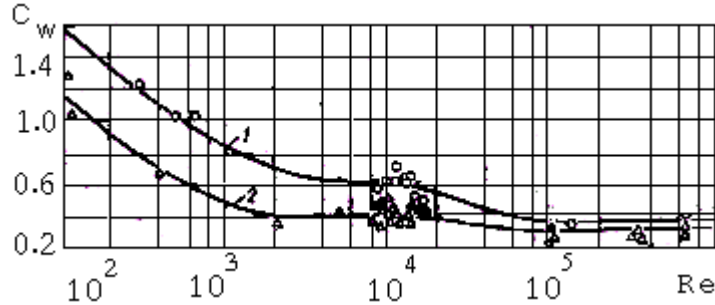
الشكل (9) معامل الاحتكاك على الحزم ذات التوزيع الشطرنجي.

$$\frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.5 \times 1.5; \text{Re} = 1.3 \times 10^5 - 2; \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.5 \times 1.5; \text{Re} = 10^3 - 1$$

$$\frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.5 \times 1.5; \text{Re} = 1.4 \times 10^6 - 3$$

يمكن القول هنا بأن المقاومة السطحية للاحتكاك تكون صغيرة بالمقارنة مع المقاومة الكلية، وعموماً من أجل  $\text{Re} > 10^3$  يكون تأثير عدم تساوي درجة الحرارة على المقاومة غير ملحوظ، ويكون تأثير الخواص الفيزيائية للناقل الحراري على الطبقة الحدية في المعادلة (1) غير ملحوظ أيضاً. المعلومات الأكثر تعميماً عن خواص المقاومة للحزم الشطرنجية والخطية موضحة في المرجع [3]، والحسابات من أجل صف واحد  $Eu_1 = \frac{Eu}{z_2}$  موضحة على الشكلين (11) و(12). يظهر من هذين الشكلين أن المقاومة الأيروديناميكية لحزمة الأنابيب ذات التوزيع الخطي والشطرنجي

تعتمد وبشكل أساسي على النسبة  $\frac{s_1}{d}$  وكلما نقصت هذه النسبة فإن عدد أويلر  $Eu_1$  يزداد .



الشكل (10) معامل مقاومة الضغط للصفوف الداخلية للحزم ذات التوزيع الشطرنجي والخطي.

$$1 - \text{التوزيع الشطرنجي}; \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 2.0 \times 2.0; \text{التوزيع الخطي}; \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 2.0 \times 2.0 - 2$$

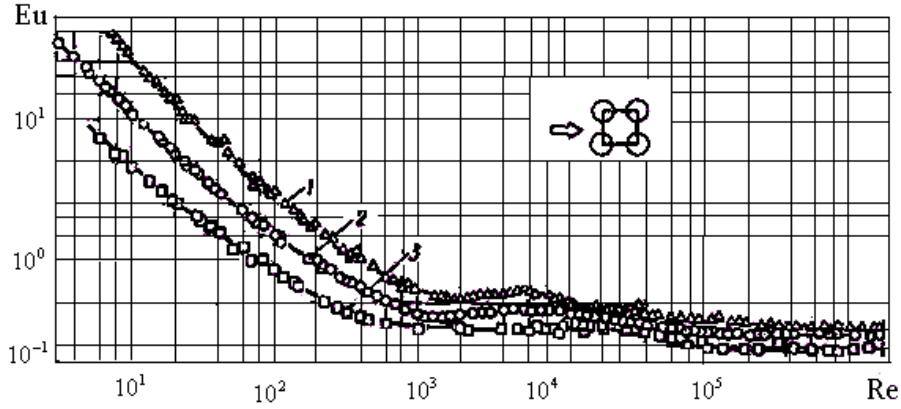
في منطقة الجريان الصفائحي حيث  $(\text{Re} < 10^3)$  ومن أجل الحزم ذات التوزيع الخطي والشطرنجي فإن الأس المستخدم في العلاقة (1) هو  $k \approx -0.5$ ، وقيمة الثابت  $C_p$  تعتمد على طبيعة الحزمة وعلى النسبة:

$$\frac{(s_2/d) - 0.8}{(s_1/d) - 1.0}$$

ففي مجال نظام الجريان المختلط  $(10^3 < \text{Re} < 2 \times 10^5)$  فإن قيم الأس  $k$  والثابت  $C_p$  تختلف لكلا الحزمتين

الخطية والشطرنجية، فبالنسبة للحزم ذات التوزيع الخطي:

$$\text{Re} = 10^3 - 10^4, Eu_1 = \frac{Eu}{z_2} = 0.115 \left( \frac{1}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^{0.75} \neq f(\text{Re}) \quad (2)$$

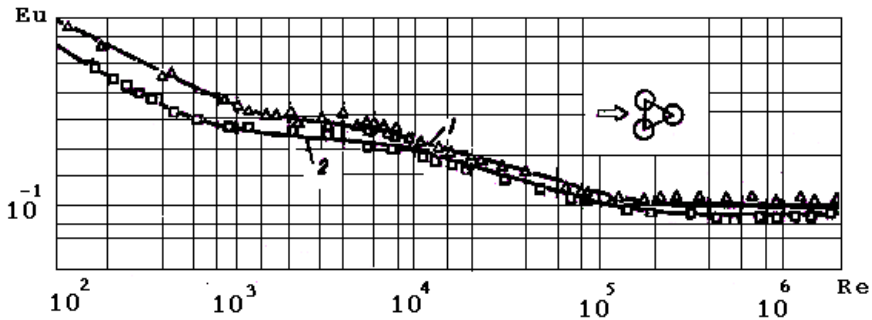


الشكل (11) المقاومة الأيروديناميكية للحزم الأنبوبية ذات التوزيع الخطي؛

$$\frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 2.0 \times 2.0 - 3 \quad ; \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.5 \times 1.5 - 2 \quad ; \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.25 \times 1.25 - 1$$

$$Re = 10^4 - 2 \times 10^5, Eu_1 = \frac{Eu}{z_2} = 0.26 \left( \frac{\frac{s_2}{d} - 0.8}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^{1.5} Re^k$$

$$\frac{\frac{s_2}{d} - 0.8}{\frac{s_1}{d} - 1} \geq 1 \quad \text{من أجل}$$



الشكل (12) المقاومة الأيروديناميكية للحزم الأنبوبية ذات التوزيع الشطرنجي؛

$$\frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.5 \times 1.5 - 2 \quad ; \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.3 \times 1.3 - 1$$

$$Eu_1 = \frac{Eu}{z_2} = 0.26 \left( \frac{\frac{s_1}{d} - 0.8}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^1 Re^k \quad (3)$$

$$k = -0.12 \left( \frac{\frac{s_1}{d} - 0.8}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^{0.5} ; \quad \left( \frac{\frac{s_1}{d} - 0.8}{\frac{s_1}{d} - 1} \right) \leq 1 \quad \text{من أجل}$$

في المنطقة التي يحصل فيها الجريان المضطرب ( $Re > 2 \times 10^5$ ) فإن مقاومة الحزمة لكلا التوزيعين الخطي والشطرنجي لا تتعلق بعدد رينولدز  $Re$  كما هو الحال بالنسبة للتوزيع الخطي؛



$$\text{Re} > 2 \times 10^5, Eu_1 = \frac{Eu}{z_2} = 0.0.9 \left( \frac{1}{\frac{s_1}{d} - 1} \right)^{0.4} \neq f(\text{Re}) \quad (4)$$

$$\text{من أجل: } \frac{s_1}{d} > 1.25, \text{ and } \frac{s_2}{d} > 1.7$$

يتم حساب المقاومة في التطبيقات العملية لكلا الحزمتين ذات التوزيع الخطي والشطرنجي باستخدام مخططات مبنية على أساس النتائج التجريبية [3]. ويمكن أيضا حساب المقاومة الأيروديناميكية للأنظمة ذات الترتيب المتناسق حسب المرجع [4].

#### ثالثاً - انتقال الحرارة من الحزم الأنبوبية ذات الترتيب المتناسق

إن تحليل النتائج التجريبية لانتقال الحرارة من الحزم الأنبوبية من الصف الأول إلى الصفوف التالية تظهر أن انتقال الحرارة يزداد على حساب زيادة اضطراب التيار.

ويمكن الانطلاق لحساب التبادل الحراري للحزم الأنبوبية ذات التوزيع الخطي والشطرنجي اعتماداً على العلاقة التالية:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = c_s c_z \text{Re}^n \text{Pr}^m \varepsilon_l \quad (5)$$

حيث  $c_s$  - ثابت تحدده الخطوات لحزمة الأنابيب.

$c_z$  - قيمة مضافة من أجل عدد الصف في الحزمة.  $\varepsilon_l$  قيمة تضاف نتيجة عدم انتظام درجات حرارة

الجريان.

لحساب معامل الحمل الحراري الوسطي على أنبوب واقع في الصفوف الداخلية حيث ( $z_2 \geq 3$ ) يمكن استخدام

العلاقات التالية [3]:

- للجريان الصفائحي والحزم ذات التوزيع الشطرنجي:

$$40 < \text{Re} < 10^3 \rightarrow \overline{Nu} = 0.71 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.36} \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25} \quad (6)$$

- للجريان الصفائحي والحزم ذات التوزيع الخطي:

$$100 < \text{Re} < 10^3 \rightarrow \overline{Nu} = 0.52 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.36} \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25} \quad (7)$$

- ومن أجل الجريان المختلط والتوزيع الشطرنجي حيث ( $100 < \text{Re} < 10^5$ ):

$$\frac{s_1}{s_2} < 2 \rightarrow \overline{Nu} = 0.35 \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{0.2} \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{0.36} \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25} \quad (8)$$

$$\frac{s_1}{s_2} > 2 \rightarrow \overline{Nu} = 0.40 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{0.36} \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25}$$

- ومن أجل الجريان المختلط والتوزيع الخطي حيث ( $100 < \text{Re} < 10^5$ ):

$$\overline{Nu} = 0.27 \text{Re}^{0.63} \text{Pr}^{0.36} \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25} \quad (9)$$

- للجريان المضطرب ( $\text{Re} > 2 \times 10^5$ ):

• التوزيع الشطرنجي:

$$\overline{Nu} = 0.031 \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{0.2} Re^{0.8} Pr^{0.4} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (10)$$

• التوزيع الخطي:

$$\overline{Nu} = 0.033 (Re^{0.8} Pr^{0.4} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}) \quad (11)$$

ويعطى معامل الحمل الحراري المتوسط عندما يكون المائع المتحرك على الحزم الأنبوبية غازاً أو سائلاً بالعلاقة:

$$\overline{Nu}_{chell} = \overline{Nu} \cdot \mathcal{E}_\phi \cdot \mathcal{E}_z \quad (12)$$

لتتطابق نتائج المعادلة (12) في حساب  $\overline{Nu}$  مع نتائج العلاقات (6) و(10) يؤخذ المعامل  $\mathcal{E}_\phi$  من المخطط

المبين في الشكل (13)، أما المعامل  $\mathcal{E}_z$  فيرتبط بعدد الأنابيب في الحزمة ويؤخذ من الشكل (14).

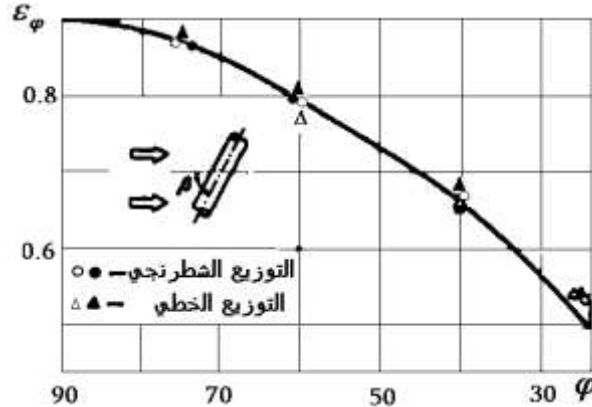
يأخذ العامل  $\left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}$  بعين الاعتبار تأثير تغير الخواص الفيزيائية للوسيط الناقل للحرارة تبعاً لتغير درجات

الحرارة ضمن مجال عدد برانتل (1 - 10000). وارتباطاً مع ذلك فإن العلاقات من (6) وحتى (12) تكون صالحة للحساب حتى من أجل الغازات أيضاً.

يعتبر البعد المميز في العلاقات من (6) وحتى (12) هو القطر  $d$  ودرجة الحرارة التي يتحدد عندها خواص

الناقل الحراري هي درجة الحرارة المتوسطة لدخول وخروج هذا الناقل:

$$\bar{t}_f = 0.5(t_{f in} - t_{f out})$$



الشكل (13) مخطط لحساب معامل زاوية مجابهة التيار لأنابيب الحزمة.

أما  $Pr_w$  فيتحدد عند درجة حرارة الجدار، وتتحدد سرعة الناقل في أضيق مقطع بين الأنابيب. وكما يظهر من

الشكل (15) للحزم المتعددة الصفوف، فإن تأثير الصفوف الأولى على  $\overline{Nu}_{shell}$  تكون أضعف، مما هي عليه في

الحزم قليلة الصفوف، حيث يمكن أن يكون تأثيره كبيراً، ويجب أخذه بعين الاعتبار. يرتبط ذلك بالخطوة الطولية  $s_2$ ،

حيث ونتيجة الحركة الاضطرابية للتيار الحراري فإن الصفوف الداخلية يمكن أن يزداد معامل الحمل الحراري من

30% إلى 100%. يكون انتقال الحرارة في الصف الثاني ولمعظم الحالات أقل بحدود من 10% إلى 30% عن

الصفوف الداخلية.

رابعاً - حساب ومقارنة معامل الفعالية الطاقية للحزم الأنبوبية ذات التوزيع المتناسق

إن حساب الفعالية الطاقية للحزم الأنبوبية ذات التوزيع الخطي والشطرنجي المتناسقة بطريقة الشروط المتساوية

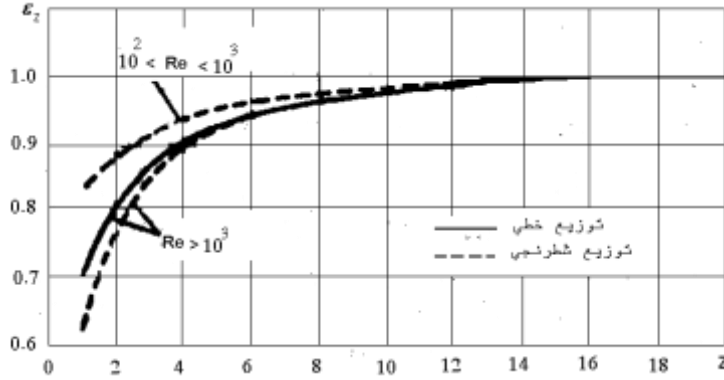
موضحة في [6],[7].

والحسابات في [7] مبنية على أساس أن  $G_1 = G_2$  حيث  $G_1 = idem$  ثابتة في الحالة المدروسة وفي الحالة المعيارية، حيث  $z_{1,2} \rightarrow \infty, z_{2,2} \rightarrow \infty$ ، أي أن عدد صفوف الأنابيب في طريق الغازات للحالة المدروسة وللحالة المعيارية معلوم، وإن قطر الأنبوب والوسيط الحراري وفرق درجات الحرارة لكلا الحزمتين متساوٍ وبالتالي:

$$d_1 = d_2; Pr_1 = Pr_2; \Delta t_1 = \Delta t_2$$

في الحالة المعيارية تم اعتماد حزمة أنبوبية ذات توزيع خطي فيها:

$$\frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 2.0 \times 2.0$$



الشكل (14) مخطط لحساب المعامل  $E_z$  تبعاً لعدد الأنابيب

تمت مقارنة نسبة أرقام رينولدز اعتماداً على طريقة الشروط المتساوية وبالتالي من أجل هذه الحالة يمكن كتابة العلاقات التالية عندما  $k_F = K_N = 1$  يكون:

$$K_Q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{C_{S2}}{C_{S1}} \times \frac{C_{Z2}}{C_{Z1}}; \frac{Re_2^{n_2}}{Re_1^{n_1}} = \left[ \frac{C_{P2}}{C_{P1}} \times \frac{\left(\frac{S_1}{d} - 1\right)_2}{\left(\frac{S_1}{d} - 1\right)_1} \right]^{\frac{1}{k_2+3}} Re_1^{\frac{k_1+3}{k_2+3}} \quad (13)$$

وعندما  $k_F = K_Q = 1$  يكون:

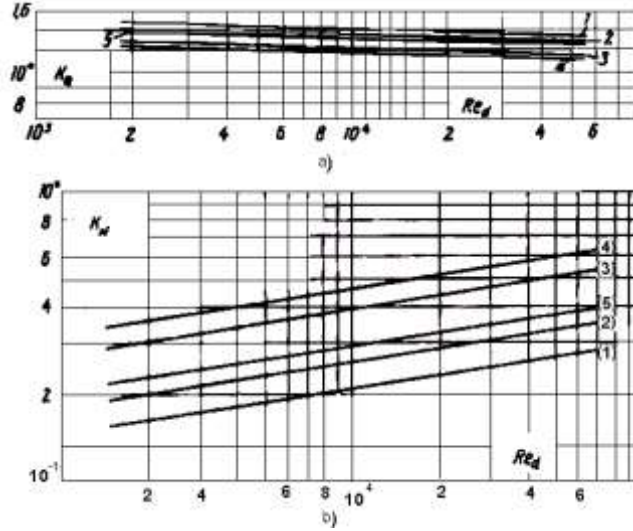
$$K_N = \frac{N_2}{N_1} = \frac{C_{P2}}{C_{P1}} \times \frac{Re_2^{(K_2+2)}}{Re_1^{(K_2+2)}}; \frac{Re_P}{Re_1} = \left[ \frac{C_2}{C_1} \times \frac{C_{Z2}}{C_{Z1}} \right]^{\frac{1}{n_2}} Re_1^{\frac{n_1-1}{n_2}} \quad (14)$$

من أجل الحزم الشطرنجية المتناسقة تم اعتماد  $K = -0.27, N_2 = 0.6$ ، ومن أجل الحزم الخطية المتناسقة كان  $K_2 = 0 - (-0.2), N_2 = N_1 = 0.65$ ، بين الشكلين (15) و (16) نتائج حساب كل من  $K_Q = f(Re)$ ،

$$k_F = f(Re) \text{ للحزم المتناسقة عند قيم مختلفة للخطوات العرضية والطولية } \frac{S_1}{d}, \frac{S_2}{d} \quad [6]$$

يتبين من الشكلين (15) و (16) أنه عند زيادة قيمة عدد رينولدز فإن فعالية الحزمة تتناقص، ومن أجل الحزم الأنبوبية ذات التوزيع الشطرنجي المتناسقة فإن المنحنيات لا تتقاطع، ولذلك عند مقارنة الفعالية يتبين أنه يمكن تحديدها من أجل أية قيمة لعدد رينولدز  $Re_1$ . أما بالنسبة للحزم الخطية حيث  $\frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 2.0 \times 1.1$  يوجد مجال لعدد رينولدز  $Re_1$  بحيث تصبح فيها قيمة الفعالية للجملة المدروسة أصغر من فعالية الحالة المعيارية والتي تملك

وبالتالي يكون  $K_N > 1, K_O < 1$  . وبالنتيجة يمكن القول بأن الفعالية لكلا الحزمتين الخطية والشطرنجية تزداد بنقصان الخطوة العرضية  $\frac{S_1}{d}$  .  
 $\frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 2.0 \times 2.2$

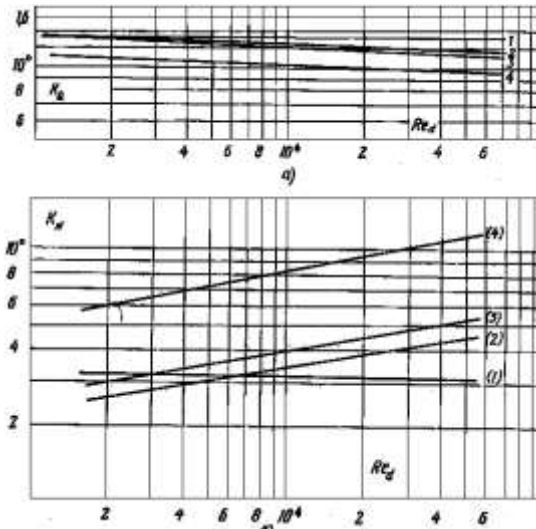


الشكل (15) الحزمة الشطرنجية المتناسقة:

- (a) - الفعالية بدلالة Q من أجل  $Re_1 = \text{var}$  متغير ؛
- (b) - الفعالية بدلالة N من أجل  $Re_1 = \text{var}$  متغير:

$$\frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 1.2.0 \times 1.1 - 3 \quad \frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 1.3 \times 1.1 - 2 \quad ; \quad \frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 1.1 \times 1.1 - 1$$

$$\frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 1.6 \times 1.1 - 5 \quad \frac{S_1}{d} \times \frac{S_2}{d} = 1.1 \times 2.0 - 4$$



الشكل (16) الحزمة الخطية المتناسقة:

- (a) - الفعالية بدلالة Q من أجل  $Re_1 = \text{var}$  متغير ؛
- (b) - الفعالية بدلالة N من أجل  $Re_1 = \text{var}$  متغير

$$-1 \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.1 \times 1.1 - 2 \quad ; \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.1 \times \frac{s_2}{d}$$

$$-3 \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 1.6 \times 1.1 - 4 \quad ; \quad \frac{s_1}{d} \times \frac{s_2}{d} = 2.0 \times 1.1$$

وهذا يظهر تأثير الخطوة الطولية على لكل واحدة من الحزم المتناسقة بشكل مختلف وبالتالي يمكن الخلوص إلى النتائج التالية:

$$a- \text{ من أجل الحزم الشطرنجية المتناسقة تزداد قيمة الفعالية بنقصان الخطوة العرضية } \frac{s_1}{d}.$$

b- من أجل الحزمة الخطية المتناسقة فإن نقصان الخطوة العرضية  $\frac{s_1}{d}$  يقود إلى زيادة الفعالية للحزم ذات

الخطوات الطولية الكبيرة، ولكن بنقصان الخطوة العرضية  $\frac{s_1}{d}$  فإن تأثير الخطوة الطولية على الفعالية ينقص عند نفس القيم المتماثلة للحزم الشطرنجية، وعندئذ يوجد تقييد لمعاملي الفعالية  $K_N, K_Q$  عند القيم الصغيرة للخطوة العرضية، الأمر الذي يمكن أن يشرح تأثير الفراغ بين الأنابيب على الصفوف المتتالية.

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم من خلال هذه الدراسة التحليلية الخلوص إلى النتائج التالية:

1 - يمكن تقسيم الجريان حول الحزم الأنبوبية ذات التوزيع المتناسق (خطي أو شطرنجي) وفقاً لقيم عدد رينولدز إلى: بداية التغلب على نظام الجريان الصفائحي من أجل  $Re < 1 \times 10^3$  ؛ بداية نظام الجريان الحرج أو نظام الجريان المختلط من أجل  $Re < 2 \times 10^3$  ؛ بداية نظام الجريان المضطرب أو نظام الجريان الحرج من أجل  $Re > 2 \times 10^5$  نظام الجريان فوق الحرج من أجل  $Re > 4 \times 10^5$ .

2 - يؤثر الاضطراب الذي يحمله التيار القادم عند دخوله إلى حزمة الأنابيب على أنابيب الصف الأول والثاني فقط. والأنابيب في الصفوف الداخلية للحزمة تتلقى تيارات أكثر اضطراباً، يتم تحديدها من الشكل الهندسي للحزمة ومن أبعاد خطواتها.

3 - يتأثر توزيع السرعة على حزمة الأنابيب بشدة بالخطوة العرضية  $\alpha = \frac{s_1}{d}$ ، وإن نقصان  $\alpha$  يؤدي إلى زيادة السرعة في كلا الحزمتين الخطية والشطرنجية، كما أن الحزم الخطية تتأثر بشدة أيضاً بالخطوة الطولية  $\beta = \frac{s_2}{d}$ .

4 - لا تتعلق المقاومة الأيروديناميكية للحزمتين الخطية والشطرنجية بعدد رينولدز في المنطقة التي يحصل فيها الجريان المضطرب ( $Re > 2 \times 10^5$ ) كما هو الحال بالنسبة للتوزيع الخطي، وإنما يتم حساب المقاومة في التطبيقات العملية لكل من الحزمتين ذات التوزيع الخطي والشطرنجي باستخدام مخططات مبنية على أساس النتائج التجريبية.

5 - تتعلق المقاومة الأيروديناميكية الكلية لحزمة أنابيب بشكل عام بخواص جريان المائع في الفراغ بين الأنابيب وبعدد صفوف الأنابيب في طريق التيار الحراري  $z_2$ ، وتتعلق أيضاً بالخواص الفيزيائية للوسيط الحراري.

## قائمة بالرموز المستخدمة:

$Q$  - استطاعة التدفق الحراري الكلية (kW).

$Q_{usfull}$  - الطاقة الحرارية المفيدة (kW).

$N$  - استطاعة التدفق الحراري من سطح المبادل (kW).

$F$  - مساحة سطح التبادل الحراري  $m^2$ .

$\varphi$  - زاوية المجابهة بين التيار وأنايب المبادل.

$\varphi_T$  - زاوية المجابهة الموافقة لانفصال الطبقة الحدية.

$d$  - القطر الخارجي لأنبوب المبادل الحراري mm.

$s_1$  - الخطوة العرضية mm.

$s_2$  - الخطوة الطولية mm.

$K_F = \frac{F}{F_0}$  - الفعالية السطحية.

$K_Q = \frac{Q}{Q_0}$  - الفعالية الحرارية.

$K_N = \frac{N}{N_0}$  - فعالية الضياعات الحرارية.

$C_f$  - معامل الاحتكاك.

$t$  - درجة الحرارة  $^{\circ}C$ .

$P$  - الضغط kPa.

$G$  - التدفق الكتلي kg/s.

$\rho$  - الكثافة النوعية  $kg/m^3$ .

$\zeta$  - المقاومة الحرارية اللا بعدية.

## المراجع:

- 1- HOLMAN. J.P, *profess of mech. Eng Methodist University "Heat Transfer"*, ninth Edition 2002 , 655.
- 2- أيوب حسن . " انتقال الحرارة والكتلة ". جامعة تشرين، 2008، 789 .
- 3- جوكاوسكي أ.أ. " انتقال الحرارة بالحمل في المبادلات الحرارية ". موسكو. دار العلم. (عن الروسية) 1982، 556.
- 4- موتشين س. أي، " الحسابات الأيروديناميكية للمراحل البخارية ". دار الإنيرجيا. (عن الروسية)، 1977، 351.
- 5- فيلنتشكو ف.أي؛ برونين ف.أ. " التبادل الحراري القسري ورفع معامل الفعالية الطاقية للتبادل الحراري ". إصدار معهد موسكو للطاقة . (عن الروسية) 2003، 65.
- 6 - برونين ف. أ. " قياس الخواص الأيروديناميكية وانتقال الحرارة للحزم الأنبوبية " - ملخص أطروحة دكتوراه (عن الروسية). 1990، 8-15.

- 7- باجان ب.اي. وآخرون "مرجع في أجهزة التبادل الحراري" . (عن الروسية). موسكو 1999، 359.
- 8 - بيتوخوف. ب. س ، شيكوف. ف. ك. "مرجع في التبادل الحراري" . مترجم عن اللغة الانكليزية. موسكو. معهد الطاقة الذرية. الجزء الأول. ( عن الروسية). 1987، 559.