مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الهندسية – المجلد (16) العدد (2) 1414 هـ 1994 م

"العمل الاقتصادي الأمثل لمبادلات حرارية حلقية الشكل"

الدكتـــور ســـامي قدســـية*

❐ ملخص ❐

يتضمن البحث دراسة ميكانيكية واقتصادية لمبادل حراري عـن طريـق دراسـة انتقـال الحـرارة مـن خـلال دراسة هيدروليكية كاملة بعد اللجوء لاستخدام عامل التجهيز الكهربائي. بينت هذه الدراسة أن الطريقة المتبعة تعتبر الأفضل في تحديد المعطيات التقنية الأمثل والحصول على نتائج هامة.

* الدكتور سامي قدسية أستاذ مساعد في قسم هندسة القـوى الميكانيكيـة بكليـة الهندسـة الميكانيكيـة والكهربائيـة – جامعـة تشـرين – اللاذقية – سورية.

مقدمة:

نتيجة للتطور التقني الكهروميكانيكي تزداد الحاجة إلى الحرارة للإنسان وللعمليات التكنولوجية، إلا أن العامل الاقتصادي في استخدام هذه الأجهزة يلعب دوراً كبيراً في إمكانية استثمارها عملياً. لذلك مسألة تحديد الطرق الأكثر اقتصادية لعمل المبادلات الحرارية تبقى الأهم في الحصول على جميع أشكال الحرارة.

بما أن المبادلات الحرارية تعتبر الأجهزة الأهم في توزيع الحرارة داخل الأماكن السكنية وأماكن الإنتاج، ونظراً لاستخدام المبادلات الحرارية بشكل واسع في مجالات مختلفة كان لا بدّ من إيجاد الطريقة الأمثل لدراسة نوع المبادلات الحرارية حلقية الشكل المستخدمة في البيوت الزجاجية والبلاستيكية من أجل الحصول على الشروط المطلوبة للإنتاج وذلك من خلال دراسة ميكانيكية واقتصادية يُحدد العمل الأمثل لهذه الأجهزة.

لدراسة اقتصادية عمل المبادل الحراري نأخذ جهازاً يعمل على حرق الوقود (حراق) يتصل بجهاز مروحي كهربائي يقوم بدفع الهواء عبر المبادل الحراري لتأمين توزيع حراري أفضل.

لحساب التكلفة الاسمية لعمل الجهاز بالكامل نلجأ إلى المعادلة التالية:

$$Z = (E+\mu)M_i.C_{Mi} + Nh.C_e + \beta.h.C_f \quad (1)$$

حيث:

E: عامل معياري يساوي 0.2.

M_i: كتلة الجهاز

C_{Mi}: الكلفة النوعية للجهاز (تشمل التكلفة مع المصاريف الإضافية على الدراسة والتصميم والتنفيذ المنسوبة إلى كتلة الجهاز).

μ: عامل الصيانة والخدمة.

h: عدد ساعات العمل في العام الواحد.

N: استطاعة محرك الجهاز المروحي.

C_e: كلفة الطاقة الكهربائية في الساعة الواحدة.

β: الاستهلاك الساعي من الوقود.

C_f: كلفة الليتر الواحد من الوقود.

إن اتباع الطرق المعروفة في حساب التكلفة الدنيا لعمل الجهاز من خلال بعض المؤشرات الأساسية يكون مرتبطاً بعمليات حسابية كبيرة ومعقدة لا تساعد في حل المسائل المتعلقة بالعمل الأمثل للجهاز. لذلك استخدام مؤشر واحد مرتبط بجميع مواصفات الجهاز الأساسية يعتبرمهماً جداً للمساعدة في إيجاد التكلفة الاسمية لعمل الجهاز. في هذه الحالة يفضل اللجوء إلى اختيار عامل يدعى بعامل التجهيز الكهربائي ε الذي يعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon = \frac{N}{Q} \quad (2)$$

حيث:

Q: القدرة الحرارية للجهاز.

للتعبير عن معادلة التكلفة الاسمية للجهاز من خلال عامل التجهيز الكهربائي ε نلجأ لبعض التحويلات في المعادلة (1) لإيجاد كتلة الجهاز:

$$Mi = F \cdot g \quad (3)$$

حيث:

F: سطح التبادل الحراري.

g: كتلة الجهاز المنسوبة إلى $1M_2$ من سطح التبادل الحراري.

إلا أننا نعلم بأن واحد أن سطح التبادل الحراري يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$F = \frac{Q}{K.\Delta t} \quad (4)$$

حيث:

K: عامل النقل الحراري.

Δt: التغير الحراري الوسطي للجهاز.

في الحالة العامة يعبر عن عامل النقل الحراري K بالعلاقة التالية:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_g} \right)^{-1} \quad (5)$$

حيث: α_a وα_g: عوامل النقل الحرارية للوسيط الناقل للحرارة (هواء) وللغازات الناتجة عن احتراق الوقود.

λ_i وδ_i: السماكة والناقلية الحرارية للجدار i من المبادل الحراري.

فإذا أهملت المقاومة الحرارية للجدار يكون لدينا:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_g} \quad (6)$$

ووفق تشابه رينولدز يمكن التعبير عن عامل النقل الحراري من خلال المقاومات الهيدروليكية للمبادل الحراري أي أن:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &= A_a . \Delta p_a^{ma} \\ \alpha_g &= A_g . \Delta p_g^{mg} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

حيث: A_a وA_g: عوامل تناسبية تتعلق بالبارامترات الهندسية للجهاز.

ΔP_a وΔP_g: المقاومات الهيدروليكية للمبادل الحراري.

m_a وm_g: عوامل تتعلق قيمها بشكل سطح التبادل الحراري.

من ناحية أخرى يمكن التعبير عن عوامل التبادل الحراري بشكل غير قياسي من خلال رقم نوسلت:

$$Nu = \frac{\alpha d_\tau}{\lambda} \quad (8)$$

حيث:

d_τ: القطر الهيدروليكي لقناة المبادل الحراري.

بمقارنة العلاقات (7) و(8) نحصل على:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_a^{ma} . A_a &= \frac{Nu_a . \lambda_a}{d_{\tau a}} \\ \Delta P_g^{mg} . A_g &= \frac{Nu_g . \lambda_g}{d_{\tau g}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

إلا أن المقاومات الهيدروليكية تحسب بواسطة معادلة دارسي، ففي حالة أن الأنابيب ملساء مستقيمة فإن:

$$\Delta P = \xi \frac{\ell . \rho v^2}{2 d_\tau} \quad (10)$$

حيث:

ξ: عامل المقاومة الهيروليكية.

ℓ: طول القناة.

ρ: كثافة الوسيط الناقل للحرارة.

v: سرعة حركة الوسيط الناقل.

بتعويض السرعة خلال رقم رينولدز Re نحصل على:

$$\Delta P = \frac{0.3164}{2} . \frac{\ell . \gamma^2 . \rho}{d_\tau^3} . \mathrm{Re}^{1.75} \quad (11)$$

حيث:

γ: اللزوجة الحركية للوسيط الناقل.

يمكن التعبير عن رقم رينولدز Re من خلال المقاومة الهيدروليكية فيكون لدينا:

$$\mathrm{Re} = \left(6.3 . \Delta P . \frac{d_\tau^3}{\ell . \gamma^2 . \rho} \right)^{\frac{1}{1.75}} = \left(6.3 . \frac{d_\tau^3}{\ell . \gamma^2 . \rho} \right)^{\frac{1}{1.75}} . \Delta P \frac{1}{1.75} \quad (12)$$

في حالة أن جريان السائل كان Re > 10^4 داخل الأنابيب الملساء [2] فإن:

$$\mathrm{Nu} = 0.021\ \mathrm{Re}^{0.8} . \mathrm{Pr}^{0.43} . (\mathrm{Pr_f} / \mathrm{Pr_w})^{0.25} \quad (13)$$

حيث: $\mathrm{Pr_f} / \mathrm{Pr_w}$: أرقام براندل لتيار الوسيط الناقل عند الجدران.

بتعويض (12) في (13) نحصل على:

$$Nu = 0.021\left(6.3\frac{d_\tau^3}{\ell.\gamma^2.\rho}\right)^{\frac{0.8}{1.75}} .\Delta P^{\frac{1}{1.75}}.\Pr^{0.43}\left(\Pr_f/\Pr_w\right)^{0.20} \quad (14)$$

نقوم بتعويض العلاقة (9) في المعادلة (14) فيكون لدينا:

$$\Delta P^m.A = 0.021\left(6.3\frac{d_\tau^3}{\ell.\gamma^2.\rho}\right)^{0.46} .\Pr^{0.43}.\Delta P^{0.46}.\left(\Pr_f/\Pr_w\right)^{0.20} \quad (15)$$

إذا اعتبرت $m=\frac{0.8}{1.75}$ فإن المعادلة (15) تصبح من الشكل التالي:

$$A = 0.021\left(6.3\frac{d_\tau^3}{\ell.\gamma^2.\rho}\right)^{0.46} .\Pr^{0.43}.\left(\Pr_f/\Pr_w\right)^{0.2} \quad (16)$$

تعتبر هذه المعادلة محققة من أجل جريان وسيط غازي من أنابيب ملساء. باتباع نفس الطريقة على أنابيب مبادلات حرارية ذات أشكال مختلفة المقاطع والتركيب نستطيع الحصول على قيم m كما في الجدول (1).

بباستخدام بعض العلاقات المساعدة مثل:

$$N=N_a+N_g \quad (17)$$

حيث:

$$N_a=\frac{G_a.\Delta P_a}{\eta_a} \quad (18)$$

$$N_g=\frac{G_g.\Delta P_g}{\eta_g} \quad (19)$$

حيث:

$$G_a=\frac{G}{C_{pa}.\delta.ta} \quad (20)$$

$$G_g=V_g.\beta \quad (21)$$

حيث:

$$V_g=1.1.\alpha.\frac{Q_H^P+6W^P}{1000} \quad (22)$$

و:

$$B=\frac{Q-N.\chi}{Q_H^P.\eta_{yc}} \quad (23)$$

حيث:

N_g و Na : استطاعتي المحرك الكهربائي للمروحة لتحريك الوسيط الحراري وجهاز تحريك غازات نواتج احتراق الوقود.

G_a: كمية الوسيط الناقل للحرارة المصروفة لأهداف تكنولوجية.

G_g: كمية الوقود المستهلكة.

C_{pa}: السعة الحرارية للوسيط الحراري.

η_{ta}: تغير درجة حرارة الوسيط الحراري.

η_g وη_a: مراديد أجهزة تحريك الوسيط وغازات نواتج الاحتراق.

V_a: حجم الهواء اللازم لحرق 1 Kg من الوقود.

Q_H^P: القيمة الحرارية الدنيا للوقود المستعمل.

α: عامل فائض الهواء.

W^P: وزن الماء أو الرطوبة في الوقود المستعمل.

χ : المعامل الايروديناميكي لتحويل الاحتكاك إلى حرارة.

η_{YC}: مردود جهاز التوليد الحراري.

وبتعويض العلاقات (23)-(2) في المعادلة (1) والقيام ببعض التحويلات نحصل على علاقات تساعد في تحديد الكلفة الاسمية من خلال عامل التجهيز الكهربائي على الشكل التالي:

(24)

$$Z^* = \frac{Z}{Q} = \frac{E+\mu}{\Delta t}.g.C_{Mi}\left[\frac{1}{A_a.C_a^{ma}.\varepsilon_a^{ma}} + \frac{1}{A_a C_g^{mg}\left(\frac{\varepsilon_g}{1-\chi.\varepsilon_g}\right)^{mg}}\right] +$$

$$+\left(\varepsilon_g+\varepsilon_g\right).h.C_e + \frac{1-\chi.\varepsilon_g}{Q_H^P.\eta_{yc}}.h.C_f$$

حيث هنا:

$$C_a = C_{pa}.\delta_{ta}.P_a.\eta_a$$

$$C_g = \frac{1000Q_H^P.\eta_{yc}}{\alpha\left(Q_H^P + 6W^P\right)}$$

القيم المثلى لمعامل التجهيز الكهربائي عند قيم التكلفة الاسمية الدنيا تساوي:

(25)

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{aopt} &= \left[\frac{(E+\mu).g.C_{Mi}.m_a.\eta_a}{A_a.C_a^{ma}.\overline{\Delta t}.Ceh}\right]^{\frac{1}{1+ma}} \\ \varepsilon_{gopt} &= \left[\left(\frac{(E+\mu).g.C_{Mi}.m_g.\eta_g}{\left(\eta_{yc}.C_e+\chi.C_f/Q_H^P\right)A_g.C_g^{mg}.\overline{\Delta t}.h}\right)\right]^{\frac{1}{1+mg}}\end{aligned}\right\}$$

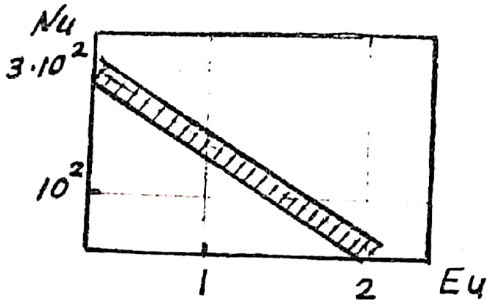
نلاحظ من المعادلة (25) أن قيم ε تتعلق بشكل أساسي بالبارامترات A وm.

عند جريان الهواء بشكل اضطرابي داخل قناة حلقية الشكل يركب داخلها مسخن كهروحراري دائري المقطع يتمتع باستطاعة متغيرة 0-10 KW. يجب أن تتوافق النتائج العلمية مع النتائج النظرية بحيث لا يتعدى الخطأ ±5%.

يمكن التعبير عن العلاقة بين عامل التبادل الحراري والمقاومة الهيدروليكية بمعادلة نوسلت التالية:

$$Nu = L.E_u^m \qquad (26)$$

يبين الشكل (1) علاقة رقم نوسلت Nu برقم اويلر Eu عند جريان مضطرب للهواء $10^4<Re<10^5$ داخل قناة حلقية.



شكل (1)

يلاحظ هنا أن بارامتر السرعة من أهم البارامترات الأساسية المؤثرة على المؤشرات التصحيحية والحرارية للجهاز المولد للحرارة.

يتم تحديد القيم المثلى لسرعتي الوسيط الحراري وغازات الاحتراق بواسطة القيم المثالية لعامل التجهيز الكهربائي ε من خلال العلاقات التالية لرينولدز:

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{Re}_{aopt} &= \left(\frac{\varepsilon_{aopt}}{L_a}\right)^{ja} \\ \mathrm{Re}_{aopt} &= \left(\frac{\varepsilon_{gopt}}{L_g}\right)^{jg} \end{aligned}\right\} \quad (27)$$

حيث:

L_a وL_g: عوامل تتعلق بشكل سطح التسخين والخواص الفيزيوحرارية لوسيط الناقل الحراري.

J: عامل يتعلق بطريقة ترتيب تركيب سطوح التبادل الحراري، الذي قيمته مبينة في الجدول (1).

جدول (1)

سطح التبادل الحراري	m	J
جريان مواز للأنابيب	0.457	$\frac{1}{1.75}$
جريان اعتراضي للأنابيب عند $(x_1/d)<(x_2/d)$	0.35	$\frac{1}{1.72}$
عند $(x_1/d)>(x_2/d)$	0.35	$\frac{1}{1.72}$
جريان اعتراضي لأنابيب متباعدة بشكل منتظم	0.374	$\frac{1}{1.74}$

حيث: x_1/d وx_2/d: الخطوة العرضية والطولية النسبية لتوزع أنابيب الحزمة.

كجهاز منظم للاستطاعة يمكن استخدام منظم زيتي كهربائي أحادي الغاز. في هذه الحالة يلجأ لدفع الهواء بواسطة مروحتين مربوطتين على التسلسل تعملان على تأمين ضاغط أعظمي يصل حتى H≈7.35 Mpas. لخفض التغيرات في قيم الضغط وتأمين دخول انسيابي للهواء في الفراغ الحلقي يفضل تركيب خزان مخمد ذو أطراف غير حادة بين مراوح الهواء والأقسام العملية.

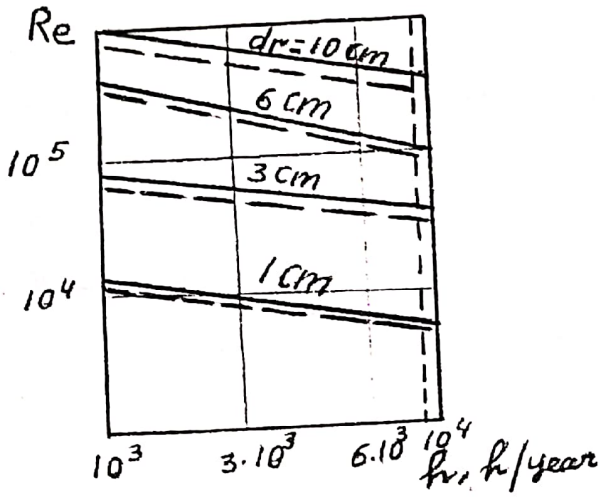
يلاحظ في هذه الحالة أن تسخين الهواء يتم بشكل مباشر عند مدخل الفراغ الحلقي مما يساعد بآن واحد على تشكل تيار هيدروديناميكي وحراري.

يتم قياس السرعات ودرجات الحرارة في ثلاث نقاط على طول الفراغ الحلقي وكذلك عند مدخل ومخرج الجهاز.

أما العوامل A وM فيمكن تحديدهما انطلاقا من العلاقات (7) والمعادلة (26) وبالتالي:

$$A = \frac{\alpha}{\Delta P^m} = \frac{L^\lambda}{d_r(\rho W^2)^m} \quad (28)$$

إن علاقة السرعات المثالية بعدد ساعات عمل الجهاز في عام واحد وبالقطر الهيدروليكي عند حركة وسيط النقل الحراري في حزمة أنابيب مستقيمة يمكن توضيحها في الشكل (2)، حيث الخط المستمر يعبر عن سرعة الهواء والخط المنقط يعبر عن سرعة غازات نواتج الاحتراق.



الشكل (2)

عند تعويض القيم العددية للبارامترات أو المؤشرات المبينة أدناه يمكن أن نحصل على علاقات وفق الشكل (2).

$E = 0.2$; $\mu = 0.227$; $g = 70\ Kg/M^2$

$m_a = m_g = 0.457$; $CP_a = 6.5.10^4\ J/M^3$

$\chi=1$; $Q_H^P = 40.8\ MJ/Kg$; $Cp_g = 2.5.10^6\ J/M^3$

أما قيم C_{MI} وC_e وC_f فتؤخذ من الواقع العملي.

نتائج:

مما ذكر أعلاه نرى أن المعادلة الاقتصادية المبينة للسرعة الحركية الفعالة للهواء والغازات الناتجة عن الاحتراق تساعد على استنتاج ما يلي:

1. إن زيادة سرعتي الهواء وغازات نواتج الاحتراق تساعد على خفض التكلفة الاسمية لأجهزة توليد الطاقة الحرارية.
2. إن أجهزة توليد الطاقة الحرارية ذات استثمار لفترة قصيرة يجب أن تتمتع وسائط النقل الحراري فيها بسرعات عالية وقيم كبيرة لعامل التجهيز الكهربائي.
3. استخدام هذه الأجهزة وفق (1) و(2) يؤمن توزيعاً حرارياً أفضل ولمسافات أكبر.

❒ ABSTRACT ❒

Our present work deals with the work possibility determination of optimum - thermal - exchanges, by studying the thermal effects and their economy.

Using the hydraulic studies of thermal transmission flow methods (burn up of air and gases) in different - cross - sections' tubes) we obtained useful relations for the nominal cost determination from the supplied Electrical - factors and velocities of thermal transmission. These factors are important optimum work determination of the thermal exchangers.

المراجع

1. يليسييف ن. ن. وغيره: "تحسين بارامترات أجهزة توليد الطاقة الحرارية" مجلة الميكـانيك والكهربـاء رقـم 4 عـام 1975 - موسكو.
2. ميخييف م. أ.: "أسس النقل الحراري" دار توليد الطاقة - موسكو - لينينغراد - 1956.
3. بوغوسلوفسكي ب. ن. وغيره: "التدفئة والتهوية" دار البناء - موسكو - 1980.