

STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA GEOMETRIEI NERVURILOR DISCONTINUE DISPUSE ALTERNANT (OFFSET) ASUPRA PREFORMANȚELOR SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ DIN ALUMINIU ÎN PLĂCI BRAZATE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

autor ing. Septimiu Radu ALBETEL

conducător științific Prof.univ. emerit dr.ing. Mihai NAGI

luna 4 anul 2021

Teza este structurată în 6 capitole și 3 anexe. Primele 3 capitole fiind capitole introductive și de suport în care se motivează teza, se analizează stadiul actual al cercetărilor în domeniu și se introduc noțiunile necesare pentru restul tezei. Următoarele capitole descriu activitatea de cercetare realizată pe nervurile discontinue dispuse alternant (offset). Ultimul capitol este rezervat concluziilor și a prezentării contribuțiilor personale. Cele 3 anexe detaliază anumite procedee de lucru cum este exemplul procedurilor de tratare a erorilor (Anexa A) sau prezintă codul sursă al programelor folosite în postprocesarea datelor (Anexa C). În anexa B se pot vedea o parte din datele obținute experimental.

Capitolul 1 Introducere

De regulă în natură schimbul termic se realizează prin trei moduri: radiație (acest tip de schimb termic are loc între două corpuri având temperaturi diferite mai mari decât 0 K), conducție (transferul termic are loc între medii solide și fluide staționare) și convecție (transferul termic are loc între un mediu staționar și un fluid în mișcare).

Pentru asigurarea schimbului termic, în industrie se folosesc niște aparate denumite schimbătoare de căldură. Aceste aparate au construcții diferite în funcție de tipul de schimb termic pe care îl realizează. Astfel în aplicațiile industriale, agricultură sau construcții se folosesc soluții care să asigure un schimb termic cu precădere convectiv. În industria electronică se folosesc soluții constructive care realizează schimbul termic de tip conductiv. Iar în industria spațială se folosesc exclusiv soluții adaptate schimbului termic radiant.

Schimbătoarele de căldură pot avea o varietate foarte mare de tipuri constructive și pot fi produse din diferite materiale metalice cupru, aluminiu, oțel. Marea majoritate a schimbătoarelor de căldură folosesc ca și agent de răcire aerul atmosferic, eliminând astfel surplusul de căldură din diferite instalații în atmosferă (răcitoare de apă, răcitoare de ulei, răcitoare de aer de supraalimentare, răcitoare de aer comprimat, condensatoare). Există totuși și schimbătoare de căldură secundare care folosesc fluide pentru răcirea altor fluide (de exemplu se răcește ulei cu apă).

În ultima vreme schimbătoarele de căldură folosesc soluții care să îmbunătățească schimbul termic. Aceste soluții sunt denumite suprafețe extinse de schimb termic, cele mai utilizate fiind nervurile. Și aici există o varietate foarte mare de soluții constructive particulare fiecărui producător. Totuși nervurile pot fi clasificate în nervuri ondulate (wavy), sparte (louvered), dispuse alternant (offset).

Din cauza acestei foarte mari diversități a posibilelor soluții constructive și a faptului că performanțele acestor suprafețe extinse depind de foarte mulți factori (temperaturi, tipul fluidului de lucru, viteze, etc), pentru dimensionarea schimbătoarelor de căldură este necesară consultarea literaturii de specialitate care conține date experimentale și ecuații criteriale pentru diferitele suprafețe extinse cunoscute ([Kays și London [4], Wang et al [6] Dong et al [7]-[9], Nagi. [10]-[12], Theil [13], Ilieș [14]-[16]). Totuși, principala provocare în folosirea acestor corelații sau a relațiilor criteriale din literatură este că au diferențe relativ mari, ajungând până la $\pm 30\%$.

De aici rezultă nevoia ca fiecare producător de sisteme de răcire să studieze și să determine corelații specifice producției proprii. Dezvoltarea și extinderea continuă a companiei S.C. RAAL S.A. spre noi piețe a condus la nevoie de aprofundare a studiilor legate de schimbătoarele de căldură în plăci brazate.

S.C. RAAL S.A din Bistrița este o companie care are capacitatea de furniza soluții complete pentru clienții ei pornind de la partea de concepție până la faza de producție și validare a sistemelor de răcire proiectate. Una dintre cele mai moderne instalații de tratare a metalelor este de asemenea disponibilă pentru pregătirea suprafețelor înainte de vopsire.

Standul de teste include toată aparatura necesară pentru a realiza validarea completă a schimbătoarelor de căldură. Laboratorul de teste include două tuneluri de vânt, instalație de efectuare a testelor de spargere, a testelor de presiune pulsatorie, a testelor de șoc termic, cameră frigorifică, instalație de testare la coroziune (ceață salină) și chiar și o instalație de vibrații.

Domeniile de activitate ale clienților firmei RAAL s-au diversificat în ultimii ani. Dacă în primii ani de la înființarea firmei în anul 1991 majoritatea clienților activau în domenii specifice industriale, agricultură sau construcții în ultimii ani au crescut foarte mult numărul clienților din domeniile auto sau din domeniul E-auto (aplicații electrice).

Continua dezvoltare a companiei RAAL a dus la necesitatea de a crea un colectiv solid de cercetare care în colaborare cu Politehnica Timișoara care s-a preocupat de dezvoltarea și optimizarea formelor geometrice ale schimbătoarelor de căldură, această cercetare s-a diseminat folosind literatura științifică prin participarea la diferite conferințe [1]–[9], cărți tehnice cum ar fi „Proiectarea și încercarea schimbătoarelor de căldură” [10], și alte lucrări cu caracter științific [17], [18], [11]–[16].

Scopul acestei lucrări este de a determina relații criteriale pentru tipuri constructive mai noi în vederea îmbunătățirii programelor de dimensionare existente în cadrul RAAL.

Capitolul 2. Stadiul actual în construcția schimbătoarelor de căldură din aluminiu

În Capitolul 2 s-au trecut în revistă principalele suprafețe extinse folosite pentru îmbunătățirea schimbului termic și s-a prezentat stadiul actual al cercetărilor cu accent pe schimbătoarele de căldură în construcție cu plăci brazate și asupra nervurilor discontinue dispuse alternant.

Nevoia de a crește schimbul termic convectiv și de a reduce dimensiunile schimbătoarelor de căldură a condus către utilizarea suprafețelor extinse. Deoarece fluidele în stare gazoasă au un coeficient de transfer termic conductiv relativ mic, transmiterea căldurii în astfel de medii se face în principal prin amestecul fluidului și nu prin transferul termic direct între perete și fluid. Astfel rolul principal al suprafețelor extinse este de a rupe stratul limita sau de a-i limita dezvoltarea [19]. Un alt rol al suprafețelor extinse este de a compensa coeficientul mic de schimb termic conductiv, printr-o suprafață de transfer termic mărită în același gabarit. Bineînțeles că introducerea unor astfel de suprafețe suplimentare în același volum obturează o parte din aria de curgere, crescând astfel suprafața de frecare, astfel crescând și puterea de recirculare.

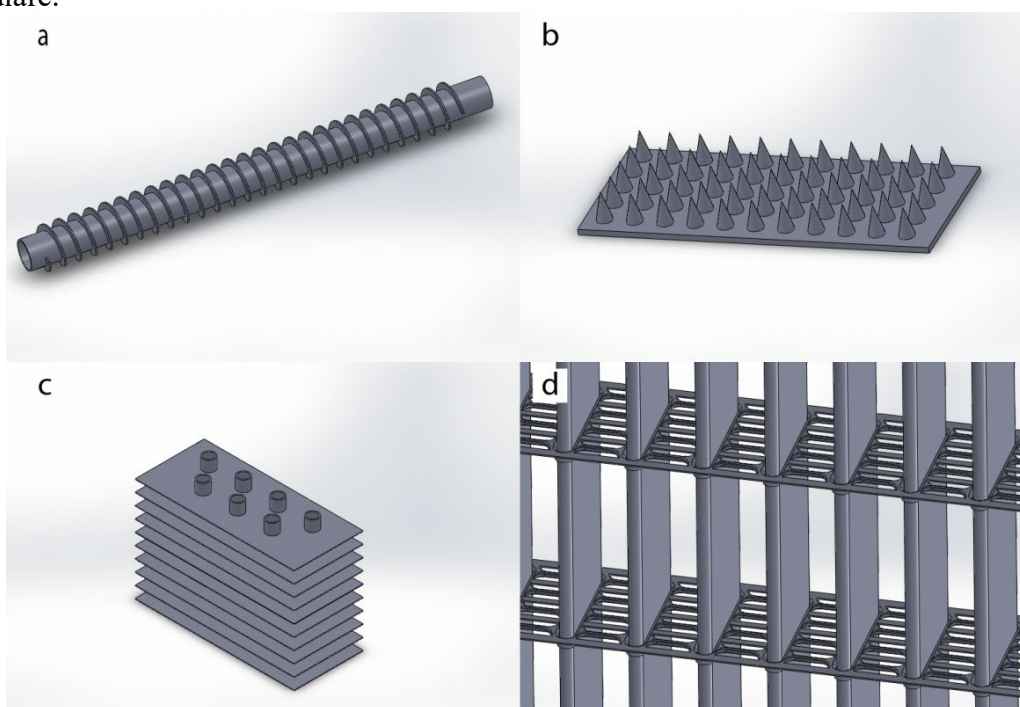


Figura 1 Tipuri de suprafețe extinse: a) tuburi nervurate, b) aripioare de tip ac, c) lamele drepte, d) lamele sparte

Suprafețele extinse au foarte mare importanță în schimbul termic, iar găsirea unor geometrii care să îmbunătățească schimbul termic este o preocupare importantă în departamentul de cercetare din cadrul firmei RAAL. De aici rezultă un număr foarte mare de forme geometrice. Prezentarea tuturor tipurilor de forme geometrice studiate de-a lungul timpului este aproape imposibilă dar în figura 1 întâlnim 4 exemple reprezentative de astfel de suprafețe extinse folosite la primele tipuri de schimbătoare de căldură.

Variantele constructive prezentate în figura 1 se pretează fiecare unui anumit tip de aplicație. Astfel tuburile nervurate se folosesc în principal în construcția răcitoarelor industriale de gabarit mare, acestea fiind unele dintre primele tipuri de geometrii dezvoltate care asigură extinderea suprafeței de schimb termic fără influență semnificativă asupra curgerii. Pentru

răcirea echipamentelor electronice se folosesc suprafețele extinse conice care sunt prezentate în figura 1b [20]. În figura 1c și 1d se pot observa lamelele drepte care se folosesc de regulă în construcția schimbătoarelor de căldură asamblate mecanic.

Suprafețele extinse au foarte mare importanță în schimbul termic, iar găsirea unor geometrii care să îmbunătățească schimbul termic este o preocupare importantă în departamentul de cercetare din cadrul firmei RAAL. De aici rezultă un număr foarte mare de forme geometrice. Prezentarea tuturor tipurilor de forme geometrice studiate de-a lungul timpului este aproape imposibilă dar în figura 1 întâlnim 4 exemple reprezentative de astfel de suprafețe extinse folosite la primele tipuri de schimbătoare de căldură.

Variantele constructive prezentate în figura 1 se pretează fiecare unui anumit tip de aplicație. Astfel tuburile nervurate se folosesc în principal în construcția răcitoarelor industriale de gabarit mare, acestea fiind unele dintre primele tipuri de geometrii dezvoltate care asigură extinderea suprafeței de schimb termic fără influență semnificativă asupra curgerii. Pentru răcirea echipamentelor electronice se folosesc suprafețele extinse conice care sunt prezentate în figura 1b [20]. În figura 1c și 1d se pot observa lamelele drepte care se folosesc de regulă în construcția schimbătoarelor de căldură asamblate mecanic.

Toate tipurile de suprafețe extinse prezentate mai sus au în comun faptul că generează o putere de recirculare redusă. Dezavantajul lor este că în același timp au și performanțe reduse din punct de vedere al schimbului termic. Acest dezavantaj poate fi compensat doar prin construirea unor schimbătoare de căldură de dimensiuni frontale mari.

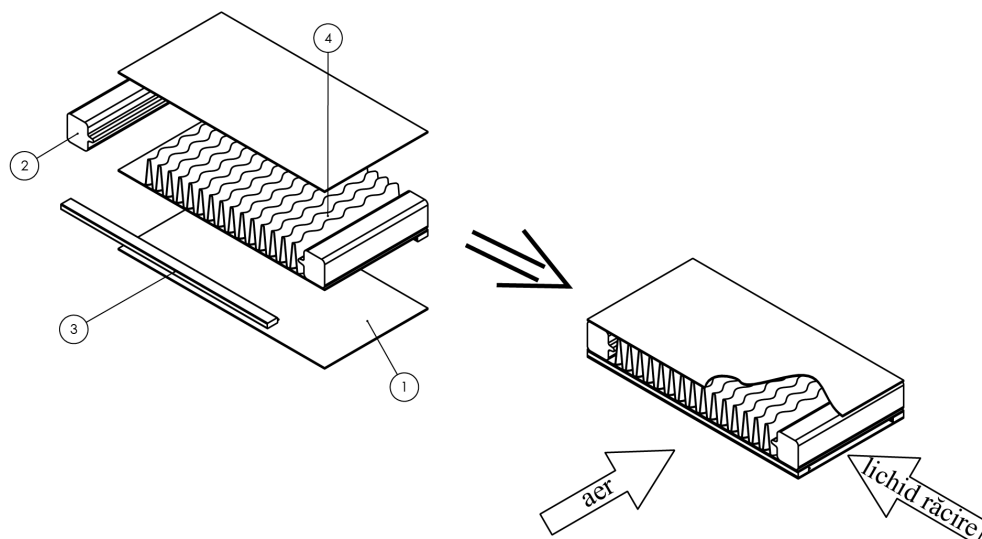


Figura 2 Asamblarea unui schimbător de căldură compact: 1 perete despărțitor; 2 distanțier aer; 3 distanțier apă; 4 aripioară aer

În momentul de față cel mai utilizat tip de suprafață extinsă îl constituie așa numitele aripioare (fins). În figura 2 este prezentă schematic un astfel de suprafață extinsă. Necesitatea acestei soluții a apărut odată cu apariția schimbătoarelor de căldură compacte și au ca rol principal îmbunătățirea schimbului termic pe partea de aer atmosferic.

Schimbătoarele de căldură compacte sunt structuri produse printr-un proces de lipire la cald denumit brazare. Această metodă de realizare duce la eliminarea eventualelor rezistențelor termice care ar putea fi induse de contactele mecanice imperfecte, astfel realizându-se și un schimb termic îmbunătățit.

Tot în capitolul 2 sunt prezentate și principalele tipuri de suprafețe extinse cunoscute cu accente pe nervurile discontinue dispuse alternant.

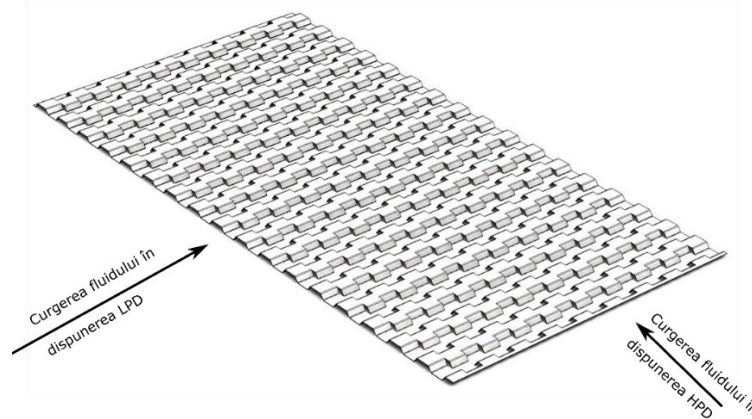


Figura 3 Nervură discontinuă dispusă alternant

Capitolul 3 **Calculul schimbătoarelor de căldură**

Majoritatea instalațiilor industriale au în componență schimbătoare de căldură, acestea putând fi unități individuale sau parte a unor instalații complexe. Fluidele care sunt vehiculate prin schimbătoarele de căldură sunt denumiți agenți termici. Schimbătoarele de căldură trebuie să îndeplinească o serie de condiții de bază. Aceste condiții sunt enumerate mai jos:

- Respectarea tuturor parametrilor de exploatare impuși de cerințele de proiectare pe toată durata funcționării
- Schimbătoarele de căldură trebuie să necesite investiții și cheltuieli de exploatare minime, deci o eficiență economică ridicată
- Soluțiile constructive alese trebuie să fie simple, compacte și să aibă un gabarit redus
- Să poată fi ușor curățate
- Să aibă o durată mare de viață în exploatare
- Să nu polueze

În acest capitol sunt prezentate metode de clasificare a schimbătoarelor de căldură după

diferite criterii: după modul de transmitere al căldurii, după schema de curgere a agenților termici, după destinația schimbului de căldură, după soluția constructivă etc. De asemenea se prezintă și tipurile de schimbătoare de căldură produse în cadrul firmei RAAL din Bistrița. Capitolul prezintă în detaliu două metode de calculare și dimensionare a schimbătoarelor de căldură. Prima metodă este metoda *diferenței logaritmice de temperatură* care se aplică în special răcitoarelor cu circulație în contra sau echicurent, sau dacă unul dintre fluide suferă o schimbare de fază – și care este folosită pentru postprocesarea datelor obținute de la programul de simulare. A doua metodă este așa numita ϵ - NTU care este aplicabilă și pentru circulații în curent încrucișat – această metodă fiind folosită pentru interpretarea datelor obținute experimental.

Capitolul 4. Cercetări experimentale privind influența nervurilor discontinue dispuse alternant asupra performanțelor termice pentru schimbătoarele de căldură în construcție cu plăci brazate

Scopul acestor cercetări este de a determina funcții criteriale pentru schimbul termic la trecerea unui lichid prin nervurile sparte dispuse alternant (turbulator offset dispus transversal).

Pentru cercetările experimentale s-au proiectat și construit în mod special o serie de trei prototipuri în cadrul companiei S:C: RAAL S.A. Bistrița. Schimbătoarele de căldură în plăci brazate, din figura 4 sunt compuse din placă de bază, semicasetă inferioară, semicasetă principală, turbulatori, semicasetă superioară și racorzii.

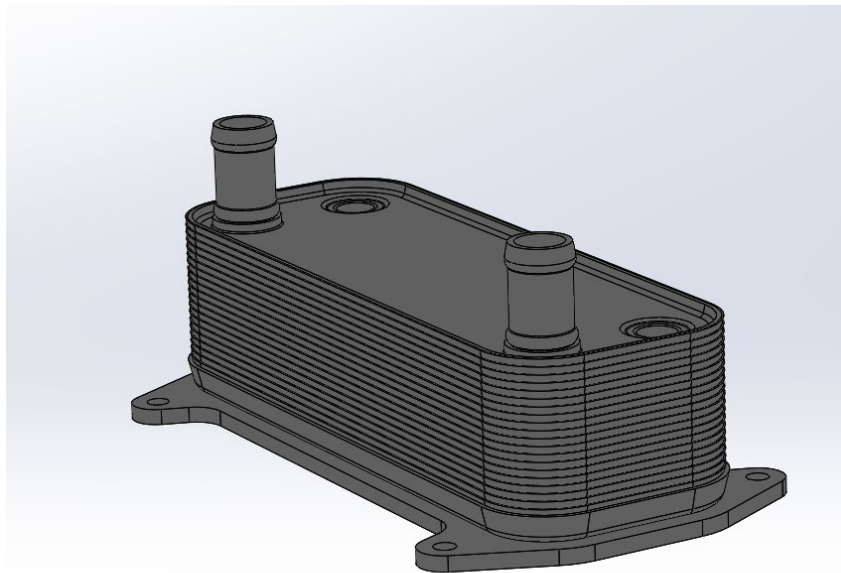


Figura 4 Schimbător de căldură în plăci brazate

Pentru schimbătoarele de căldură proiectate s-a prezentat modul în care au fost determinate caracteristicile geometrice: suprafețele de schimb termic, suprafețele de curgere, diametrele hidraulice.

Având în vedere că în producția curentă a firmei RAAL se folosesc pașii de turbulator de 8 mm, 6,8 mm și 5 mm, prototipurile pentru teste au fost construite folosind cele trei dimensiuni. Testele au fost realizate pe un stand de teste la S.C. RAAL S.A. Bistrița, special conceput pentru testarea schimbătoarelor de căldură apă – apă. Au fost testate trei schimbătoare de căldură cu structură identică pe partea de fluid rece și de fluid cald având pașii de turbulator

$p = 8 \text{ mm}$, 6.8 mm și 5 mm .

Pentru realizarea măsurătorilor a fost utilizată o instalație de testare realizată în cadrul laboratorului de teste al firmei RAAL, schițată în figura 5. Sistemul de testare include două circuite închise de apă: unul pentru fluidul cald și unul pentru fluidul rece, un sistem de achiziție de date (lipsește din schiță) și un schimbător de căldură. Circuitele de apă sunt configurate în așa fel încât să asigure o circulație contracurent prin interiorul răcitorului testat.

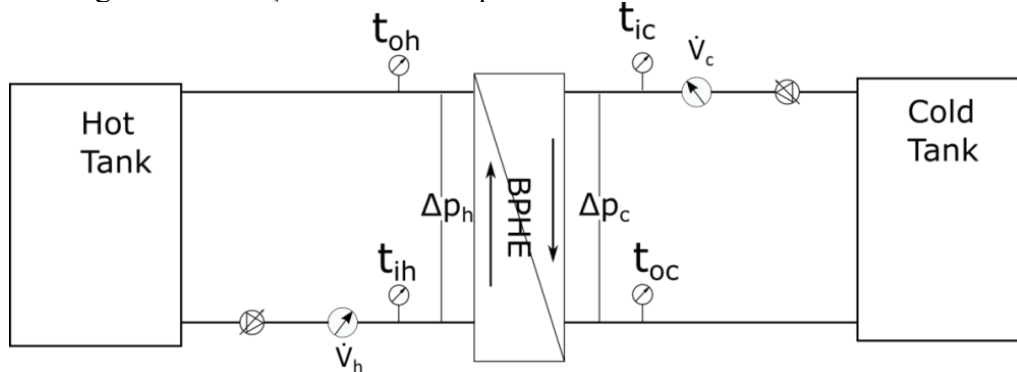


Figura 5. Schema de funcționare stand de testare

Fiecare circuit de apă este prevăzut cu propriul rezervor de apă de 1000 l și cu propria pompă cu viteză variabilă. Pompa cu viteză variabilă ajută la setarea volumul V de apă vehiculat. Debitul de apă este măsurat cu ajutorul unui debitmetru electromagnetic cu o precizie de $\pm 0.2\%$. Temperatura este măsurată cu două termorezistențe PT 1000 cu incertitudine de ± 0.1 °C. Căderea de presiune este măsurată cu un senzor de presiune diferențială cu o precizie de $\pm 0.4\%$.

Pentru a putea analiza datele de măsură luând în considerare și erorile introduse de procesul tranzitoriu al standului de măsură, fiecare punct măsurat a fost repetat de 10 – 50 de ori într-un interval de timp de aproximativ 2 minute. Fiecare repetare a punctului de măsură s-a înregistrat la un interval de timp aproximativ constant. Tabelele cu mărimile măsurate se găsesc în anexa B

Capitolul 5. Determinarea relațiilor criteriale pentru nervurile discontinue dispuse alternant (offset)

Datele obținute s-au prelucrat cu ajutorul teoriei erorilor și a ecuațiilor prezentate în capitolul 3, care au fost implementate într-un script Python ce se află în anexa acestei lucrări.

În toate graficele ce urmează, punctele experimentale sunt reprezentate cu tot cu incertitudinile de măsură. Liniile verticale reprezintă incertitudinea mărimii calculate (Nu, f), iar liniile orizontale reprezintă incertitudinea măsurării vitezei debitului, prin urmare a valorii adimensionale Re .

Prima etapă a interpretării rezultatelor experimentale a generat câte un set de funcții criteriale pentru (Nu, f) pentru fiecare structură în parte.

Scopul acestei cercetări fiind determinarea unor relații criteriale pentru nervurile discontinue dispuse alternant (turbulatori), în general, s-a determinat un set de funcții criteriale care să poată fi folosite pentru toate variantele de geometrii ale turbulatorilor studiați.

Pentru realizarea acestui scop, s-a introdus un parametru adimensional care să definească structura geometrică a turbulatorului în funcție de pasul acestuia.

Astfel s-au obținut relațiile criteriale pentru (Nu, f) de mai jos:

$$Nu = (3.77 \pm 0.68) \cdot 10^{-5} \cdot F_p^{1.65 \pm 0.062} \cdot Re^{-0.51 \pm 0.022} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (5,8)$$

$$f = (1.04 \pm 2.1) \cdot 10^{-3} \cdot F_p^{6.37 \pm 1.93} \cdot Re^{-0.14 \pm 0.12} \quad (5,9)$$

Relațiile de mai sus au fost determinate folosind o regresie cu toate punctele experimentale de la cele trei schimbătoare de căldură (peste 6000 de puncte măsurate). Acest proces a fost automatizat folosind programul Python a cărui listing se găsește în anexe

Capitolul 6. Concluzii și contribuții personale

În lucrarea de față s-au făcut cercetări experimentale și teoretice privind performanțele hidraulice și termice pentru schimbătoarele de căldură în construcție cu plăci brazate în vederea obținerii unor ecuații criteriale care ajută la dimensionarea schimbătoarelor de căldură în construcție cu plăci brazate la SC RAAL SA Bistrița.

S-a prezentat și stadiul actual în studiul schimbătoarelor de căldură de acest gen, cu accent pe partea de nervură discontinuă alternantă (turbulator). Din această analiza a rezultat că deși există o formă analitică general acceptată a expresiilor pentru determinarea numărului Nusselt și a coeficientului de frecare, coeficienții acestor expresii trebuie determinați experimental deoarece diferențele dintre expresiile existente pot fi foarte mari și în producție pot genera erori care duc la costuri ridicate.

Domeniul suprafețelor de schimb termic este unul foarte dinamic și din acest motiv cercetarea are un rol deosebit de important pentru industria producătoare de sisteme de căldură.

Pentru compania S.C. RAAL S.A. Bistrița cunoașterea variației numărului Colburn și a coeficientului de frecare în raport cu parametrii geometrici ai nervurii discontinue dispusă alternant este de o foarte mare importanță. Pentru realizarea acestui scop au fost proiectate și executate trei prototipuri, care ulterior au fost supuse unui număr foarte mare de măsurători experimentale (peste 6000 de puncte).

Interpretarea rezultatelor măsurătorilor experimentale a fost realizată folosind codul scris de către autor utilizând mediul de programare al limbajului Python. Listingul celor mai importante funcții se găsește în anexa C. Cu ajutorul codului scris s-a automatizat prelucrarea datelor experimentale. Astfel, folosind metodologia descrisă în capitolele teoretice, datele experimentale brute au fost convertite într-o formă adimensională. În plus codul realizează regresia mărimilor adimensionale și găsește coeficienții relațiilor criteriale

Relațiile criteriale generalizate (5.8) și (5.9) determinate se pot folosi pentru calculul performanțelor termice ale nervurilor discontinue dispuse alternant numai pentru tipul și geometria răcitoarelor pentru care au fost determinate

- Măsurătorile au fost efectuate pe un singur tip de fluid (apă), dar aceasta nu este un impediment, întrucât relațiile criteriale determinate sunt independente de tipul fluidului folosit, rezultatele obținute pot fi folosite și pentru schimbătoare de căldură ulei – apă și ulei – ulei
- Incertitudinea punctelor cu care s-au realizat regresiiile a fost de 3σ ceea ce înseamnă că există o probabilitate de 5% ca valoarea adevărată a unei măsurători să fie înafara intervalului $\bar{X} - \epsilon, \bar{X} + \epsilon$ unde valoarea este dată de $\bar{X} \pm \epsilon$
- Incertitudinea coeficienților regresiiilor este de 1σ ; pentru a avea o confidență mai mare se pot converti aceste intervale de incertitudine a o confidență de 3σ prin înmulțirea erorilor cu factorul 3.

Pentru îmbunătățirea rezultatelor autorul își propune:

- realizarea unor modificări la programul de achiziție al datelor pentru a se putea înregistra automat la un interval de timp constant, fără intervenția operatorului odată ce procesul de achiziție pentru un anumit punct de măsură este început.
- realizarea de schimbătoare de căldură cu mai multe canale. Calculul geometric a pornit de la ipoteza conform căreia schimbul termic pe canalele de capăt realizat cu mediul înconjurător este neglijabil
- realizarea de măsurători folosind și alte fluide, -cum ar fi apă – ulei și ulei – ulei

Contribuții personale

Teza de doctorat „**Studii și cercetări privind influența geometriei nervurilor discontinue dispuse alternant (OFFSET) asupra performanțelor schimbătoarelor de căldură din aluminiu în plăci brazate**” se bazează pe cunoștințe teoretice și practice acumulate în aproximativ 16 ani de experiență ai autorului precum și pe colaborarea cu Facultatea de Mecanică, catedra Mașini Mecanice, Utilaje și Transporturi din cadrul Universității Tehnice Timișoara.

Se pot enumera următoarele contribuții personale rezultate din studiul schimbătoarelor de căldură în plăci brazate:

- s-au proiectat, executat și încercat experimental trei schimbătoare de căldură cu parametrii geometrici diferiți
- s-a construit un stand de testare pentru schimbătoarele de căldură apă-apă în vederea executării măsurătorilor experimentale

- măsurătorile experimentale au fost realizate pe o plajă foarte largă de parametrii de intrare în așa fel încât să asigure obținerea unor concluzii corecte (peste 6000 de puncte de măsură)
- s-a realizat automatizarea procesării datelor obținute, folosind un limbaj de programare (Python) capabil să proceseze un volum foarte mare de date (Anexa A)
- analiza și determinarea relațiilor criteriile generalizate (5.8) și (5.9) care permit determinarea performanțelor schimbătoarelor de căldură în plăci brazate
- funcțiile determinate sunt deja folosite pentru schimbătoarele de căldură apă – apă, apă – ulei și ulei – ulei care folosesc nervuri discontinue dispuse alternant (turbulatori) în cadrul RAAL
- îmbunătățirea programelor de calcul existente în cadrul firmei RAAL cu noile funcții determinate, acestea fiind deja integrate

De menționat sunt lucrările apărute în: Experimental Heat Transfer [17] indexată ISI, Applied Mechanics and Materials [98]–[100], Applied Mechanics and Materials [98]–[100] indexate BDI, lucrarea susținută la o conferință internațională din Londra UK Heat Transfer Conference [15] și contribuția autorului la monografia „**Proiectarea și încercarea radiatoarelor**” [10] un ghid destinat proiectanților privind modul de dimensionare și construcție a schimbătoarelor de căldură.

Bibliografie

- [1] P. Ilies, M. Vlad, and M. Nagi, "Influence of extended water heat surface on water coolers," in *Conferința Națională de Termodinamică. Univ. Petrol și Gaze*, 2007.
- [2] P. Ilies, M. Vlad, and M. Nagi, "Influenta dimensiunii nervurilor asupra performanțelor radiatoarelor din aluminiu," in *A X-a Ediție a Conferinței Stiintifice a Facultății de Inginerie cu participare internațională*, 2005.
- [3] M. Nagi, P. Ilies, and M. Vlad, "Plates oil coolers with counterflow pattern," in *MVM04-B13*, 2004.
- [4] P. Ilies, V. Martian, and M. Nagi, "SOLUTII CONSTRUCTIVE MODERNE DE SCHIMBATOARE DE CALDURA COMPACTE DIN ALUMINIU," in *ACME Iași*, 2004.
- [5] P. Ilies, M. Vlad, and M. Nagi, "Solutii constructive moderne de schimbatoare de caldura compacte din aluminiu," in *Conf Termo, ed XV cu part.internationala*, 2005.
- [6] M. Nagi, H. Theil, I. Laza, P. Ilies, and A. Runcan, "Preocupări privind realizarea în țară a unor schimbătoare de căldură de eficiență ridicată, din aluminiu," in *Lucrare simpozion de Termotehnică și mașini termice Vol I.*, 1988, pp. 109–116.
- [7] P. Ilies, V. Marțian, and M. Nagi, "EXPERIMENTAL RESEARCH ON SHELL CONSTRUCTION OIL COOLERS," in *MVT*, 2006, p. 9.
- [8] M. Nagi, P. Ilies, and M. Vlad, "An experimental approach for air flow inside the heat exchanger's wavy channel," in *Conferința Națională de Termodinamică. Univ. Petrol și Gaze*, 2007.

- [9] P. Ilieș, "Contribuții la studiul și cercetarea schimbătoarelor de căldură compacte, din aluminiu, cu nervuri ondulate," Politehnica Timișoara, 2010.
- [10] M. Nagi, Ilieș, Paul, and V. Marțian, **S. Albețel**, *Proiectarea și încercarea schimbătoarelor de căldură*. Mitron Timișoara, 2005.
- [11] M. Nagi, P. Ilieș, and M. Vlad, "Critical considerations regarding the generalization of the results that were obtained at the oil-air coolers testing," in *Bul. IPIasi, Tomul L(LIV), Fasc.6C, S. Const. De . Mas.*, 2004, pp. 133–138.
- [12] M. Nagi, P. Ilieș, and M. Vlad, "Compact Heat Exchangers manufactured At RAAL Bistrita Romania," in *University of Russe "Angel Kanchev" Vol 46.*, 2007.
- [13] V. Marțian, **S. Albețel**, and M. Nagi, "Numerical Study of Corrugation Amplitude Influence of a Wavy Fin in Overall Performance of a Compact Heat Exchanger."
- [14] **S. Albețel**, V. Martian, and M. Nagi, "Straight Section Influence on Thermal and Hydraulic Performances for a Wavy Air Fin in a Compact Heat Exchanger," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 659, pp. 283–288, Oct. 2014.
- [15] V. Marțian, M. Nagi, **S. Albețel**, and M. Sucilă, "Height Influence on Thermal and Hydraulic Performances for a Wavy Air Fin in a Brazed Aluminium Plate and Bar Heat Exchanger," in *13th Uk Heat transfer Conference*, 2013, no. September, p. UKHTC2013/26.
- [16] V. Martian, **S. Albețel**, and M. Nagi, "Numerical Study of Corrugation Amplitude Influence of a Wavy Fin in Overall Performance of a Compact Heat Exchanger," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 659, no. 1, pp. 405–410, Oct. 2014.
- [17] V. Marțian, **S. Albețel**, E. David, and M. Nagi, "Heat transfer and hydraulic performance models for a family of aluminum plate heat exchanger with transversal offset strip fins," *Exp. Heat Transf.*, vol. 30, no. 6, pp. 530–543, Nov. 2017.
- [18] V. Marțian, P. Ilieș, M. Nagi, and G. Boldor, "EXPERIMENTAL RESEARCHES REGARDING TRANSIENT HEAT REJECTION OF ALUMINUM HEAT EXCHANGERS," in *MVT*, 2006, pp. 8–10.
- [19] T. V. Jones and I. G. Zaltsman, "BOUNDARY LAYER HEAT TRANSFER," in *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*, Begellhouse, 2011.
- [20] Z. Khattak and H. M. Ali, "Air cooled heat sink geometries subjected to forced flow: A critical review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 130, pp. 141–161, 2019.