



**HAL**  
open science

## Conception et étude préliminaire d'un échangeur de chaleur tubes et calandres assisté par Ultrasons

Audrey Monnot, Nicolas Gondrexon, Primius Boldo, André Bontemps

### ► To cite this version:

Audrey Monnot, Nicolas Gondrexon, Primius Boldo, André Bontemps. Conception et étude préliminaire d'un échangeur de chaleur tubes et calandres assisté par Ultrasons. CFM 2007, Aug 2007, Grenoble, France. hal-00271213

**HAL Id: hal-00271213**

**<https://hal.science/hal-00271213v1>**

Submitted on 4 Mar 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Conception et étude préliminaire d'un échangeur de chaleur tubes et calandre assisté par ultrasons

Yorick Tisseau<sup>1</sup>, Primius Boldo<sup>2</sup>, Nicolas Gondrexon<sup>1</sup> & André Bontemps<sup>3</sup>

<sup>1</sup>: LEPMI, UMR 5631 INPG/CNRS/UJF, BP75, 38402 St Martin d'Hères cedex France

<sup>2</sup>: Polytech'Savoie, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac cedex France

<sup>3</sup>: Université Joseph Fourier, LEGI, 38041 Grenoble Cedex 9 France

Andre.Bontemps@ujf-grenoble.fr

### Résumé :

*Dans ce travail, un échangeur de chaleur de type faisceau de tubes/calandre couplé à un champ ultrasonore a été conçu et étudié. Les premiers résultats expérimentaux illustrent une augmentation systématique du coefficient global de transfert de chaleur en présence d'ultrasons pouvant atteindre 250 %. Cette amélioration ne varie pas avec la puissance du champ ultrasonore mais est très sensible à la configuration hydrodynamique retenue.*

### Abstract :

*The effect of ultrasound on heat transfer performances of a "vibrating" shell and tubes heat exchanger has been investigated. Comparison between overall heat transfer coefficient with and without ultrasound has shown that with ultrasound the overall heat transfer coefficient can be increased up to 250 %. This enhancement is not sensitive to the ultrasonic power but strongly depends on the hydrodynamic conditions.*

### Mots-clefs :

**échangeur de chaleur ; champ ultrasonore ; amélioration du transfert**

## 1 Introduction

Les effets des ultrasons sur les phénomènes de transfert de chaleur ont donné lieu à de nombreux travaux qui reposent sur des études fondamentales concernant aussi bien l'influence des ondes ultrasonores sur la convection naturelle et/ou forcée que sur les phénomènes de transfert avec changement de phase (Komarov *et al.* 2003, Monnot *et al.* 2007, Wong *et al.* 1969, Oh *et al.* 2003). Les recherches relatives à l'application d'un champ acoustique au sein même d'un échangeur de chaleur sont quant à elles quasi-inexistantes (Melkumov *et al.* 2003). Aussi, ce travail concerne le développement d'un nouveau type d'échangeur de chaleur : il s'agit d'un échangeur tube et calandre vibrant. Les premiers résultats obtenus avec ce dispositif sont présentés ici.

## 2 Dispositifs et méthodologies

### 2.1 Descriptif de l'échangeur

L'échangeur de chaleur utilisé dans ce travail a été conçu et réalisé à partir d'un module tubulaire vibrant breveté, le Sonitube<sup>®</sup>. Ce dispositif de conception et d'usage industriel, peut être présenté comme un tube vibrant à une fréquence ultrasonore donnée à travers lequel circule

un fluide (Dubruque *et al.* 1993). Le Sonitube<sup>®</sup> (SM 35, fréquence 35 kHz, longueur 240 mm, diamètre intérieur 20 mm) fait ici office de calandre au sein de laquelle est inséré un tube coudé (diamètre intérieur 4 mm, diamètre extérieur 6 mm) offrant une surface d'échange moyenne  $S$  de  $0,0063 \text{ m}^2$ . L'échangeur ultrasonore ainsi constitué est présenté sur la figure 1 ci-après.

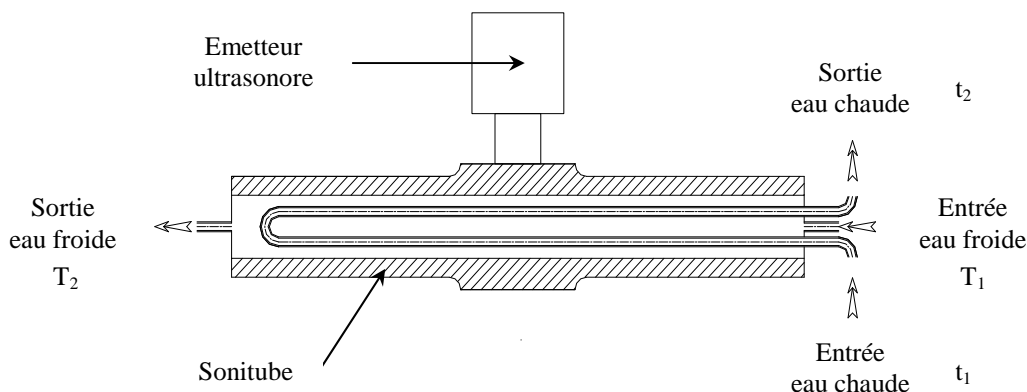


FIG. 1 – Représentation schématique de l'échangeur ultrasonore.

## 2.2 Dispositif d'études

Le dispositif expérimental utilisé est schématiquement représenté sur la figure 2. L'eau chaude produite dans le réservoir ( $t_1 = 35,5\text{-}36^\circ\text{C}$ ) est pompée à un débit maintenu constant ( $1,6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) afin d'alimenter l'échangeur côté tube. L'eau chaude en sortie d'échangeur retourne vers le réservoir d'alimentation. L'eau froide provient quant à elle directement du réseau et circule côté calandre à un débit qui a varié de  $0,25$  à  $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . 4 sondes de température Pt100 (précision  $0,1^\circ\text{C}$ ), reliées à un système d'acquisition de données ADAM<sup>®</sup> collectées par un PC à l'aide d'un logiciel spécifique, permettent de mesurer et de suivre l'évolution des températures entrée et sortie de chacun des deux fluides chaud ( $t_1, t_2$ ) et froid ( $T_1, T_2$ ). De plus, la mesure du débit est assurée par 2 débitmètres McMillian<sup>®</sup>.

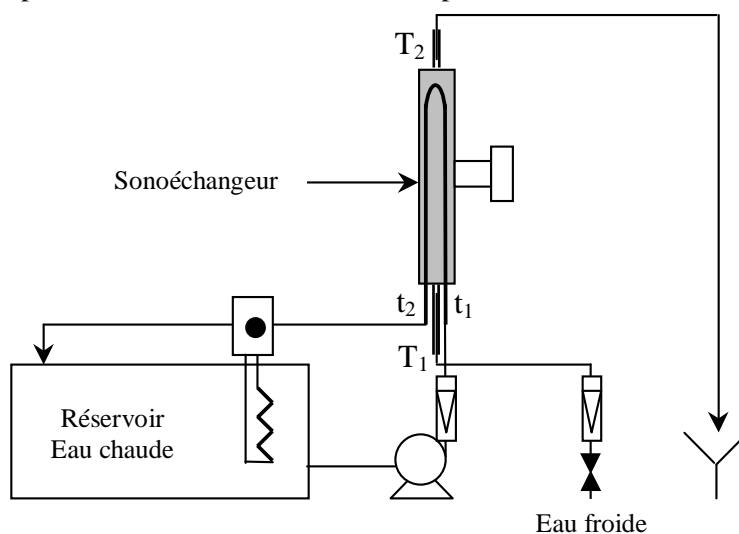


FIG. 2 – Représentation de l'ensemble du dispositif expérimental.

## 2.3 Procédure expérimentale

L'échangeur est préalablement alimenté en eau froide à un débit constant. Le dispositif est maintenu en position verticale de manière à s'assurer de son bon remplissage côté calandre afin d'éviter tout problème de transmission des ondes ultrasonores. L'échangeur est ensuite alimenté en eau chaude côté tube à débit fixe par mise en route de la pompe de circulation. L'acquisition de données permet alors de suivre l'évolution des températures entrée et sortie pour chacun des fluides en fonction du temps. Lorsque les valeurs mesurées n'évoluent plus, le processus d'échange de chaleur est considéré comme ayant atteint l'équilibre.

## 3 Résultats et discussion

### 3.1 Bilan thermique

En présence ou non d'ultrasons, le bilan thermique global sur l'échangeur à l'équilibre s'écrit de la manière suivante :

$$P_{us} + Q_{chaud} = Q_{froid} + Pertes\ thermiques \quad (1)$$

Dans l'expression ci-dessus,  $P_{us}$  désigne la puissance induite par l'irradiation ultrasonore qui est fournie au fluide côté calandre. Cette puissance est estimée expérimentalement par une méthode calorimétrique améliorée (Boldo *et al* 2003), outil classiquement utilisé pour la caractérisation des réacteurs à ultrasons. Les flux de chaleur relatifs à chaque fluide peuvent être calculés aisément à partir des mesures de température et de débit selon :

$$Q_{chaud\ ou\ froid} = Q_m\ chaud\ ou\ froid\ C_p\ \Delta T_{chaud\ ou\ froid} \quad (2)$$

Par conséquent, les pertes thermiques peuvent être déduites de l'équation (1) dans la mesure où tous les autres termes sont connus. L'ensemble des résultats correspondants à cette partie est donné dans le tableau 1 ci-après.

Amplitude Ultrasons (%)	t <sub>1</sub> (°C)	t <sub>2</sub> (°C)	Q <sub>chaud</sub> (W)	Débit (L/min)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	Q <sub>froid</sub> (W)	P <sub>us</sub> (W)	Q <sub>chaud</sub> + P <sub>us</sub> (W)	Pertes (W)
Pas d'ultrasons	36.6	34.3	<b>251.9</b>	1	18.6	21.6	<b>212.5</b>	0	251.9	<b>39.4</b>
	36.0	34.1	<b>212.9</b>	0.75	18.3	21.8	<b>183.4</b>		212.9	<b>29.5</b>
	35.6	34	<b>179.5</b>	0.50	18.4	22.6	<b>143.9</b>		179.5	<b>35.6</b>
	35.5	34.1	<b>147.1</b>	0.25	18.5	24.4	<b>102.8</b>		147.1	<b>44.4</b>
50	36.5	33.8	<b>301.0</b>	1	18.5	23.2	<b>321.2</b>	58.8	359.8	<b>38.6</b>
	36.0	33.5	<b>268.6</b>	0.75	18.3	24.1	<b>301.0</b>		327.4	<b>26.5</b>
	35.5	33.5	<b>228.5</b>	0.50	18.5	25.9	<b>259.2</b>		287.3	<b>28.1</b>
	35.5	33.8	<b>187.3</b>	0.25	18.5	29.6	<b>193.8</b>		246.1	<b>52.2</b>
70	36.4	33.7	<b>301.0</b>	1	18.5	23.1	<b>322.6</b>	66.0	367.0	<b>44.4</b>
	35.8	33.5	<b>260.8</b>	0.75	18.3	24.0	<b>299.9</b>		326.8	<b>26.9</b>
	35.5	33.4	<b>227.4</b>	0.50	18.5	25.9	<b>259.2</b>		293.4	<b>34.2</b>
	35.5	33.8	<b>188.4</b>	0.25	18.5	29.8	<b>196.6</b>		254.4	<b>57.7</b>
90	36.3	33.6	<b>301.0</b>	1	18.4	23.2	<b>331.6</b>	73.0	374.0	<b>42.3</b>
	35.8	33.4	<b>261.9</b>	0.75	18.2	24.1	<b>307.2</b>		334.9	<b>27.7</b>
	35.3	33.3	<b>230.7</b>	0.50	18.4	26.1	<b>268.9</b>		303.7	<b>34.8</b>
	35.5	33.8	<b>190.6</b>	0.25	18.5	30.2	<b>203.3</b>		263.6	<b>60.4</b>
100	36.1	33.4	<b>297.6</b>	1	18.3	23.2	<b>342.1</b>	86.7	384.3	<b>42.3</b>
	35.7	33.3	<b>270.9</b>	0.75	18.2	24.3	<b>317.2</b>		357.6	<b>40.4</b>
	35.3	33.2	<b>233.0</b>	0.50	18.3	26.1	<b>272.7</b>		319.7	<b>46.9</b>
	35.5	33.8	<b>189.5</b>	0.25	18.5	30.3	<b>205.9</b>		276.2	<b>70.3</b>

TAB. 1 – Valeurs des températures et puissances ultrasonores mesurées, des flux et pertes thermiques calculés (débit d'eau chaude = 1,6 L.min<sup>-1</sup>).

Au vu des résultats rapportés dans le tableau 1, il s'avère que les flux de chaleur calculés en présence d'ultrasons sont toujours supérieurs à ceux obtenus sans irradiation ultrasonore. Ceci est vrai côté tube et côté calandre et ce quel que soit le débit d'eau froide retenu. Cette première observation illustre l'apport bénéfique des ondes ultrasonores sur les flux de chaleur.

En l'absence d'ultrasons, le flux de chaleur côté chaud est systématiquement supérieur au flux de chaleur côté froid, quelle que soit la configuration hydrodynamique. Ceci traduit l'existence de pertes thermiques, estimées à partir du bilan thermique global. Ces pertes sont justifiées dans la mesure où aucune précaution particulière n'a été prise au niveau de l'échangeur pour les éviter ou même les minimiser.

En présence d'ondes ultrasonores, le flux de chaleur côté froid est cette fois toujours supérieur au flux thermique côté chaud. Ceci s'explique par le fait que l'émission d'ultrasons, qui a lieu au niveau de la calandre, induit un apport énergétique supplémentaire que représente l'énergie ultrasonore transmise à l'eau froide sous forme calorifique.

Concernant les pertes thermiques au niveau de l'échangeur, il semble délicat de livrer une analyse fine des résultats obtenus. Les valeurs obtenues avec et sans ultrasons sont du même ordre de grandeur. Néanmoins, la présence d'ultrasons semble se traduire par une augmentation significative des pertes thermiques au plus faible débit d'eau froide.

### 3.2 Comparaison du coefficient global de transfert de chaleur

L'objectif étant de comparer le transfert de chaleur réalisé au sein de l'échangeur en présence ou non d'ultrasons, le coefficient global d'échange  $h$  a été déterminé pour chaque expérience réalisée à partir de l'expression suivante :

$$Q = h S \Delta T_m \quad (3)$$

expression dans laquelle  $\Delta T_m = F \Delta T_{ml}$  avec  $F$  facteur de correction classique et où  $\Delta T_{ml}$  est la différence moyenne logarithmique des températures.

Compte tenu des observations expérimentales relatives aux flux de chaleur mentionnées ci-avant, la détermination du coefficient global de transfert de chaleur  $h$  a été réalisée à partir du flux réellement transféré à travers la surface d'échange  $S$ . Ainsi, et de façon à minimiser l'influence des ultrasons, le coefficient  $h$  a été calculé à partir du flux thermique le plus faible, c'est à dire du flux coté froid sans ultrasons et du flux côté chaud avec ultrasons respectivement.

Afin de quantifier l'effet « ultrasons », un facteur d'amélioration  $A$ , défini comme le rapport du coefficient global d'échange obtenu avec ultrasons sur le coefficient global d'échange obtenu sans ultrasons dans les mêmes conditions de débit, est calculé selon :

$$A = h_{avec\ ultrasons} / h_{sans\ ultrasons} \quad (4)$$

L'ensemble des valeurs de  $h$  et de  $A$  sont présentées dans le tableau 2 ci-après. Au regard de ces données, il apparaît que l'application du champ ultrasonore côté calandre se traduit systématiquement par une amélioration significative du coefficient global d'échange de chaleur. Ceci s'explique par la turbulence induite au sein du liquide dans la calandre par les effets qui accompagnent l'émission d'ondes ultrasonores dans l'eau. L'implosion des bulles de cavitation génère des ondes de choc et des micro-jets qui favorisent un mélange local auquel vient s'ajouter la contribution d'intenses courants de convection (Boucher 1970, Lee *et al.* 2002). Comme illustré sur la figure 3, on remarquera que, pour un débit d'eau froide donné, l'amélioration due aux ultrasons est sensiblement identique quelle que soit la puissance ultrasonore transmise au milieu. Par contre, le facteur d'amélioration est d'autant plus prononcé que le débit d'eau froide est faible. Dans ce cas, la turbulence engendrée par les ondes

ultrasonores vient s'imposer à l'écoulement du fluide dans la calandre alors qu'elle ne semble que le compléter aux plus forts débits d'eau froide.

Amplitude ultrasons (%)	$\Delta T_1 = t_1 - T_2$ (°C)	$\Delta T_2 = t_2 - T_1$ (°C)	F	$\Delta T_{ml}$ (°C)	$\Delta T_m = F \cdot \Delta T_{ml}$ (°C)	Débit eau froide (L/min)	Flux de chaleur Q (W)	Coefficient global d'échange h (W/m <sup>2</sup> °C)	Facteur d'amélioration A = h <sub>us</sub> /h
Sans ultrasons	14.99	15.78	1.00	15.38	15.4	1	212.5	2192.7	-
	14.23	15.83	1.00	15.02	15.0	0.75	183.4	1938.7	-
	13.04	15.56	1.00	14.26	14.3	0.50	143.9	1601.0	-
	11.05	15.63	0.92	13.21	12.2	0.25	102.8	1342.3	-
50	13.35	15.26	1.00	14.28	14.3	1	301.0	3344.5	1.53
	11.90	15.25	1.00	13.51	13.5	0.75	268.6	3157.2	1.63
	9.58	14.97	1.00	12.08	12.1	0.50	228.5	3003.8	1.88
	5.83	15.28	0.95	9.81	9.3	0.25	187.3	3190.2	2.38
70	13.22	15.15	1.00	14.16	14.2	1	301.0	3373.0	1.54
	11.84	15.24	1.00	13.47	13.5	0.75	260.8	3074.0	1.59
	9.51	14.91	1.00	12.01	12.0	0.50	227.4	3005.7	1.88
	5.69	15.29	0.95	9.71	9.2	0.25	188.4	3240.9	2.41
90	13.05	15.11	1.00	14.05	14.1	1	301.0	3398.9	1.55
	11.65	15.18	1.00	13.34	13.3	0.75	261.9	3117.5	1.61
	9.24	14.89	1.00	11.84	11.8	0.50	230.7	3093.0	1.93
	5.37	15.33	0.95	9.49	9.0	0.25	190.6	3354.2	2.50
100	12.87	15.11	1.00	13.96	14.0	1	297.6	3384.0	1.54
	11.38	15.02	1.00	13.12	13.1	0.75	270.9	3278.0	1.69
	9.16	14.90	1.00	11.80	11.8	0.50	233.0	3134.3	1.96
	5.20	15.32	1.00	9.37	9.4	0.25	189.5	3211.4	2.39

TAB. 2 – Ensemble des valeurs du coefficient global d'échange de chaleur et du facteur d'amélioration correspondant (débit d'eau chaude = 1,6 L.min<sup>-1</sup>).

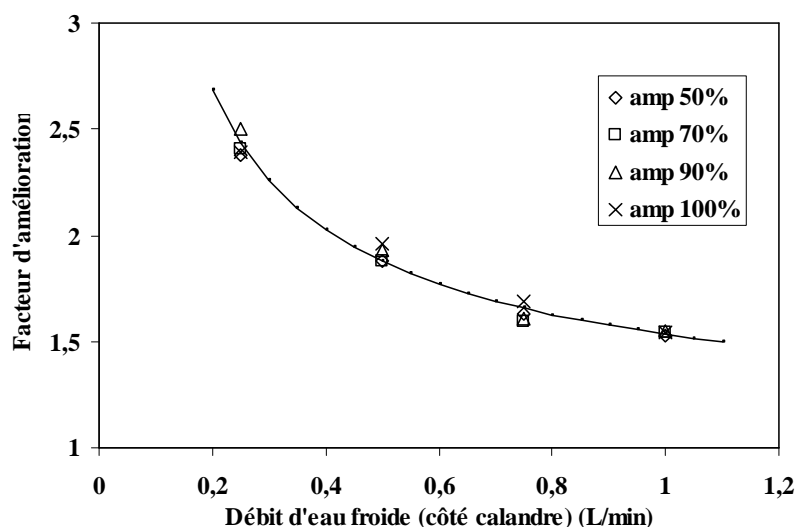


FIG. 3 – Evolution du facteur d'amélioration A en fonction du débit d'eau froide pour différentes amplitudes ultrasonores.

#### 4 Conclusions

Les premiers résultats relatifs à l'utilisation d'un échangeur tube et calandre vibrant ont montré une amélioration des flux de chaleur transférés en présence d'ultrasons aussi bien côté tube que côté calandre. La comparaison des coefficients globaux d'échange a démontré l'apport bénéfique du champ ultrasonore. L'effet des ultrasons semble indépendant de la puissance ultrasonore et plus particulièrement prononcé pour le débit côté calandre le plus faible. La suite

de notre travail vise à confirmer ces premières observations dans le but d'établir la faisabilité d'un tel échangeur de chaleur, d'un type nouveau.

### Nomenclature

$T_1$ :	Température d'entrée de l'eau froide
$T_2$ :	Température de sortie de l'eau froide
$t_1$ :	Température d'entrée de l'eau chaude
$t_2$ :	Température de sortie de l'eau chaude
$Q$ :	Flux thermique (W)
$Q_{\text{chaud}}$ :	Flux thermique côté tube (W)
$Q_{\text{froid}}$ :	Flux thermique côté calandre (W)
$Q_m$ :	Débit massique de fluide ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$C_p$ :	Capacité calorifique de l'eau ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )
$\Delta T$ :	Différence de température pour un fluide ( $^\circ\text{C}$ )
$\Delta T_m$ :	Différence de température moyenne ( $^\circ\text{C}$ )
$\Delta T_{\text{ml}}$ :	Différence moyenne logarithmique des températures ( $^\circ\text{C}$ )
$F$ :	Facteur de correction (-)
$P_{\text{us}}$ :	Puissance ultrasonore transmise déterminée par calorimétrie (W)
$h$ :	Coefficient global d'échange de chaleur ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$S$ :	Surface moyenne d'échange ( $\text{m}^2$ )
$A$ :	Facteur d'amélioration (-)

### Références

- Boucher, R.M.G., 1970, Sonochemistry at low and high ultrasonic frequencies, *British Chemical Engineering Journal*, 15 (3), pp. 363-367.
- Dubruque, D., Luche, J.L. and Berlan, J., 1993, Montée en échelle de processus sonochimiques – mise au point d'un réacteur pilote tubulaire continu, *Réc. Progrès en Génie des Procédés*, 31 (7), pp. 17-22.
- Komarov, S. and Hirasawa, M., 2003, Enhancement of gas phase heat transfer by acoustic field application, *Ultrasonics*, 41 (4), pp. 289-293.
- Lee, Y.L. and Choi, Y.D., 2002, Turbulence enhancement by ultrasonically induced gaseous cavitation in the CO<sub>2</sub> saturated water, *KSME Int. Journal*, 16 (2), pp. 246-254.
- Monnot, A., Boldo, P., Gondrexon, N. and Bontemps, A., 2007, Enhancement of cooling rate by means of high frequency ultrasound, *Heat transfer engineering*, 28 (1), pp. 1-6.
- Oh, Y.K., Park, S.H. and Cho, Y.I., 2002, A study of the effect of ultrasonic vibrations on phase-change heat transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45 (23), pp. 4631-4641.
- Wong, S. W. and Chon, W.Y., 1969, Effects of ultrasonic vibrations on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling, *AIChE Journal*, 15 (2), pp. 281-288.
- Boldo, P., Pétrier, C. and Gondrexon, N., 2004, New operating method improves calorimetric measurement of ultrasonic power, *Proc. 9th Meeting of the European Society of Sonochemistry*, Badajoz, Spain, pp. 147-148.
- Melkumov, U. and Kurbanov, K., 2003, Use of ultrasound for intensification of heat transfer process in heat exchangers, *Proc. International Congress of Refrigeration*, Washington, DC, Vol. 4, pp. 1-5.