International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА СТЪПКАТА НА ЛАМЕЛИТЕ ВЪРХУ ТОПЛИННАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ВЪНШНО ОРЕБРЕНА ТРЪБА

Пламен Бонев

Технически университет – Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, Габрово, България
кореспондиращ автор: pbonev@tugab.bg

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FIN SPACING ON THE THERMAL EFFICIENCY OF AN EXTERNALLY FINED TUBE

Plamen Bonev

Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria
Corresponding author: pbonev@tugab.bg

Abstract

Extended surfaces are widely used to enhance heat transfer, particularly when natural convection on the air side represents a significant thermal resistance. The present study aims to experimentally investigate the influence of the number and spacing of square fins on the thermal performance of a horizontal copper tube. Four configurations with 183, 206, 216, and 283 square fins have been tested with water as a working fluid at different flow rates. The heat transfer rate and overall thermal conductance (UA) *have been determined from the measured inlet and outlet water temperatures, ambient temperature, and flow rate. The results have shown that the increase in the number of fins does not necessarily improve the heat transfer performance. Among the investigated configurations, the arrangement with 183 fins provided the highest average values of* $UA = 2.62\ W/K$ *and* $Q = 67\ W$ *, whereas the configuration with 283 fins showed the lowest performance. The results demonstrate the importance of fin spacing for natural convection and indicate that an appropriate balance between extended surface area and airflow conditions is required. The study provides experimental data for selecting suitable square-fin arrangements for naturally cooled finned tubes.*

Keywords: *square fins, finned tube, natural convection, heat transfer, thermal conductance.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитите топлообменни повърхности, известни още като оребрени повърхности, намират широко приложение в различни видове топлообменни апарати. Използването на ребра е особено ефективно от страната на флуида, характеризиращ се с по-голямо термично съпротивление. Чрез увеличаване на топлообменната площ оребряването позволява да се намали термичното съпротивление и да се увеличи топлинния поток, предаван между повърхността и околния флуид .

При използването на оребрени повърхности обаче увеличаването на топлообменната площ не води непременно до пропорционално увеличаване на предавания топлинен поток. Коефициентът на топлопредаване от страна на оребрената повърхност може да бъде както по-висок, така и по-нисък от този при съответната неоребрена повърхност. Неговата стойност зависи от условията на топ-

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

лообмен, геометрията на ребрата и разстоянието между тях [1,2].

Следователно топлинните характеристики на оребрената повърхност се определят както от увеличаването на топлообменната площ, така и от условията, при които се осъществява конвективният топлообмен.

Поради наличието на температурен градиент в материала на реброто температурата по неговата повърхност не е постоянна. Вследствие на това действително предаваният топлинен поток е помалък от теоретично възможния топлинен поток, който би се получил, ако цялата повърхност на реброто се намираше при температурата на неговата основа. За количественото характеризиране на този ефект се използва степен на ефективност на реброто , която се определя от ур. (1) [2,5]:

$$\eta_f = \frac{Q}{hA_f\left(T_w - T_\infty\right)} \qquad (1)$$

където η_f е ефективност на реброто; Q - действително предаденият от реброто топлинен поток, h - коефициент на топлопредаване, A_f - топлообменната площ на реброто, T_w - температура в основата на реброто, T_∞ - температура на околния флуид.

Ефективността на реброто зависи от неговата геометрична форма, размери, топлопроводността на материала и условията на топлообмен с околната среда [5]. При отчитане на конвективния топлообмен от края на реброто в се предлага използването на коригирана дължина, ур. (2) [2],

$$L_c = L + \frac{t}{2} \qquad (2)$$

където L_c – е коригираната дължина на реброто, L - действителната му дължина, а t - неговата дебелина.

При анализа на оребрените топлообменни повърхности е необходимо да се отчита не само ефективността на отделното ребро, но и ефективността на цялата оребрена повърхност. Тя включва вторичната повърхност, образувана от ребрата, и първичната повърхност, към която те са прикрепени. Общата ефективност на оребрената повърхност се определя от ур. (3) [2]

$$\eta_o = 1 - \left(1 - \eta_f\right)\frac{A_f}{A} \qquad (3)$$

където η_o е общата ефективност на оребрената повърхност; η_f - ефективност на ребрата; A_f - общата площ на ребрата, A - общата топлообменна площ, включваща първичната и вторичната повърхност. При използването на тези зависимости се приема, че коефициентът на топлопредаване върху оребрената повърхност е еднакъв с този върху основната повърхност.

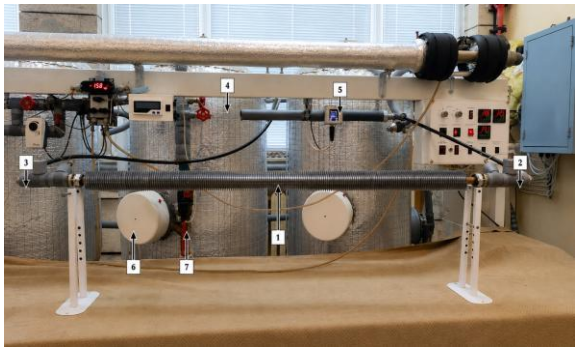
За увеличаване на топлообменната площ е особено подходящо да се използват ламели, особено във въздушна среда. Топлинният поток, постъпващ от основната повърхност към реброто, се разпространява в материала посредством топлопроводност, след което се пренася от неговата повърхност към околния въздух чрез конвекция. Оребрените тръби намират широко приложение във въздушни топлообменници, отоплителни тела, кондензатори, изпарители, рекуператори, термопомпени и климатични системи, както и при охлаждането на електронно оборудване [3,4]. В тези приложения увеличаването на външната топлообменна площ позволява частично да бъде компенсиран сравнително ниският коефициент на топлопредаване от страна на въздуха и да бъде увеличена общата топлинна мощност на съоръжението.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА УСТАНОВКА

Като работен флуид се използва вода, циркулираща в затворен контур, Фиг. 1.

Водата се нагрява в резервоара 4 посредством електрически нагревател 6 до предварително зададена температура, след което чрез циркулационна помпа 7 се подава към измервателния участък и се връща обратно в резервоара. Обемният дебит на водата се измерва посредством калибриран дебитомер 5. Тази организация на експерименталната система позволява задаване и поддържане на различни температурни и дебитни режими по време на измерванията.

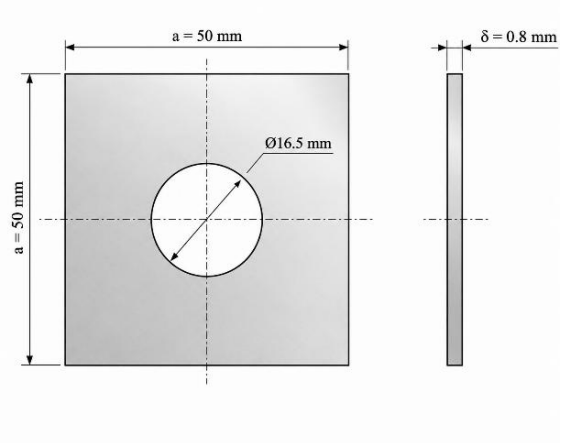
Основният елемент на измервателния участък е хоризонтално разположена външно оребрена медна тръба 1 с дължина L=1 m, вътрешен диаметър 14.0 mm и външен диаметър 16.0 mm. Вътрешният и външният диаметър на медната тръба съответстват на геометрията, използвана при предходни експериментални изследвания.



Фиг. 1. *Схема на експерименталната установка за изследване на топлообмен при гладка и оребрена тръба.*

Гладката тръба се използва като базова конфигурация, спрямо която се оценява изменението на топлинните характеристики при добавяне на оребряване.

За увеличаване на външната топлообменна повърхност върху медната тръба са монтирани напречно разположени квадратната ламели. Всяка ламела е с размери a=50 mm, дебелина 0.8 mm и централен кръгъл отвор с диаметър 16.5 mm. Диаметърът на отвора е съобразен с външния диаметър на медната тръба и позволява монтирането и последователното разполагане на ламелите по дължината на измервателния участък. Геометрията и основните размери на една ламела са представени на фиг. 2.



Фиг. 2. *Геометрия и основни размери на правоъгълната ламела*

Площта на двете основни повърхности на една ламела, без площта на централния отвор, може да бъде определена от:

$$A_{f,1} = 2\left(a^2 - \frac{\pi d_f^2}{4}\right) \qquad (4)$$

където $a = 0.05$ m са размерите на ламелата, а $d_f = 0.0165$ m е диаметърът на централния отвор.

Топлинният поток от циркулиращата във вътрешността на тръбата вода се предава посредством конвекция към вътрешната повърхност на тръбата, чрез топлопроводност през медната стена и впоследствие от външната повърхност към околния въздух. При оребрените конфигурации част от топлинният поток се предава от основната тръба към ламелите, откъдето се отвежда към околната среда. От външната страна на измервателния участък топлообменът се осъществява при условия на естествена конвекция, без използване на вентилатор или друго устройство за принудително движение на въздуха.

За определяне на топлинните характеристики се измерват температурите на водата на входа 2 и на изхода от измервателния участък 3. Обемният дебит на

работния флуид се регистрира посредством дебитомер 5. Измерените стойности на входната и изходната температура и обемния дебит се използват при последващото определяне на отведения топлинен поток чрез енергиен баланс на измервателния участък.

Експерименталните данни се визуализират и регистрират посредством програмната среда LabVIEW. Системата за събиране на данни позволява непрекъснато наблюдение на измерваните величини, проследяване на достигането на установен топлинен режим и съхраняване на получените стойности за последваща математическа обработка. Този подход е използван и при предходните експериментални изследвания, проведени с основния стенд, Фиг. 1.

При провеждането на експериментите, температурата на водата на входа 2 на измервателния участък се изменя в диапазона 45–55 °C, докато температурата на околния въздух е приблизително 20 °C. За всеки изследван режим измерванията се извършват след достигане на установено, стационарно топлинно състояние. Като критерий за стабилизиране на режима се приема изменение на температурата между последователните показания, по-малко от ±0.2 °C. След установяване на режима измерените параметри се използват за определяне на топлинните характеристики.

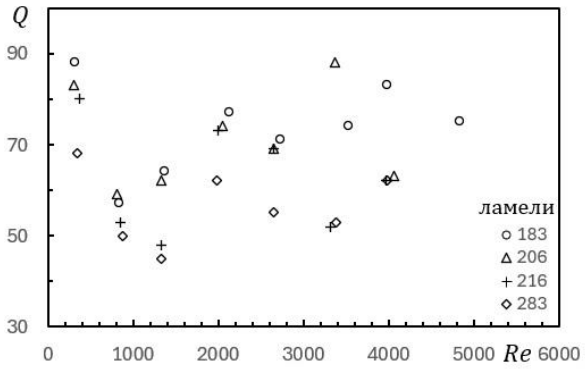
3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Получените експериментални резултати са в зависимост от дебита на водата и съответното число на Рейнолдс. За всяки експериментален режим, в зависимост от измерените входна и изходна температура на водата, както и масовия дебит се изчислява топлинният поток [3], ур. (5)

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \left(T_i - T_o \right) \tag{5}$$

а чрез средната температура на водата T_f и тази на околния въздух T_a се определя общата топлинна проводимост, UA.

На фиг. 3 е представено изменението на топлинния поток $\dot{Q}$ в зависимост от числото на Рейнолдс Re е за изследваните конфигурации с различен брой квадратни ламели.



Фиг. 3. *Зависимост на $\dot{Q}$ от Re за различните конфигурации с квадратни ламели.*

Увеличаването на броя на ламелите води до нарастване на оребрената външна топлообменна площ и едновременно до намаляване на разстоянието между тях, което изменя условията за естествена конвекция на въздуха. С увеличаване на числото на Рейнолдс се подобрява и принудителният конвективен топлообмен от вътрешната страна на тръбата и се намалява вътрешното топлинно съпротивление. Следователно изменението на общия топлинен поток се определя от съвместното влияние на броя и разположението на ламелите, оребрената топлообменна площ, естествената конвекция от външната страна и хидродинамичния режим на водата във вътрешността на тръбата.

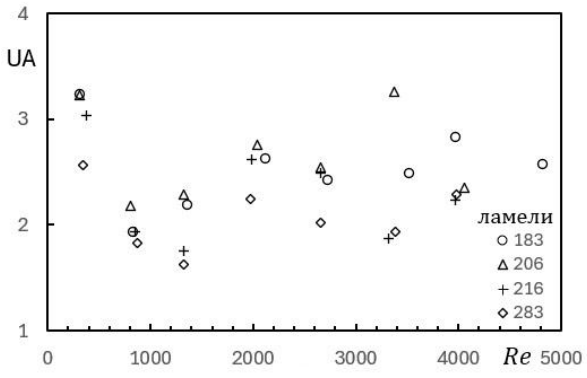
За оценка на топлинните характеристики на отделните конфигурации е анализирано изменението на общата топлинна проводимост UA. Използването на този параметър позволява да бъде отчетено влиянието на движещата температурна разлика и да се извърши непосредствено сравнение между конфигурациите с различен брой ламели.

За всяка конфигурация общата топлинна проводимост се определя от ур. (6),

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_m} \qquad (6)$$

където ΔT_m е средната логаритмична температурна разлика между водата и околния въздух.

На фиг. 4 е представена зависимостта на UA от числото на Рейнолдс за изследваните случаи. Както се вижда от Фиг. 4, с намаляване на броя на ламелите (разстоянието между тях) се увеличава топлинната проводимост UA.



Фиг. 4. *Зависимост на UA от Re за различните конфигурации с квадратни ламели.*

Изменението на UA с нарастване на Re характеризира съвместното влияние на вътрешния конвективен топлообмен и топлоотдаването от развитата външна повърхност към околния въздух, като сравнението между отделните конфигурации позволява да се оцени влиянието на броя на ламелите върху общите топлинни характеристики. Увеличаването на броя на ламелите води до нарастване на топлообменната площ и създава предпоставки за по-високи стойности на UA, но едновременно с това намаляването на разстоянието между тях и може да ограничи естественото движение на въздуха, както и да засили взаимодействието между граничните слоеве на съседните повърхности, поради което зависимостта между броя на ламелите и UA не е задължително линейна.

За сравнителна оценка на топлинните характеристики на изследваните конфигурации са определени средните стойности на общата топлинна проводимост UA_{avg} и топлинния поток Q_{avg}. Получените резултати са представени в Табл. 1.

Таблица 1. Усреднени стойности на UA и Q

Конфигурация	UA_{avg}, W/K	Q_{avg}, W
183 ламели	2.62	67
206 ламели	2.28	51
216 ламели	2.24	53
283 ламели	1.78	37

Получените експериментални резултати показват ясно изразено влияние на броя на ламелите върху топлинните характеристики на изследваната тръба. Най-високи средни стойности са получени при конфигурацията със 183 ламели, за която $UA_{avg} = 2.62$ W/K и $Q_{avg} = 67$ W. При увеличаване на броя на ламелите до 206 и 216 общата топлинна проводимост намалява съответно до 2.28 и 2.24 W/K, а средният топлинен поток достига съответно 51 и 53 W, докато при конфигурацията с 283 ламели са установени най-ниските стойности – $UA_{avg} = 1.78$ W/K и $Q_{avg} = 37$ W.

Получените резултати показват, че увеличаването на броя на ламелите и съответно на развитата топлообменна площ не води непременно до подобряване на топлинните характеристики, тъй като намаляването на разстоянието между съседните ламели може да затрудни свободното движение на нагретия въздух и да засили създаването на застойни зони с високо термично съпротивление. В резултат положителният ефект от увеличената топлообменна площ може да бъде ограничен от влошаването на условията за естествена конвекция.

Следователно сред разгледаните конфигурации *най-благоприятни топлинни характеристики се получават при 183 ламели,* което показва необходимостта при проектирането на подобни оребрени повърхности да се отчита не само разви-

тата топлообменна площ, но и разстоянието между ламелите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е проведено експериментално изследване на топлинните характеристики на хоризонтална медна тръба с напречно разположени квадратни ламели при естествена конвекция от външната повърхност. Изследвани са четири конфигурации с различен брой ламели – 183, 206, 216 и 283, като влиянието им върху топлообмена е оценено посредством топлинния поток Q и общата топлинна проводимост UA.

Получените резултати показват същественото влияние на разстоянието между съседните ламели върху процеса на естествена конвекция. Увеличаването на броя на ламелите и съответно на развитата топлообменна площ не води непременно до подобряване на топлинните характеристики, тъй като намаляването на междуребреното пространство може да ограничи свободното движение на нагретия въздух и да засили влиянието на застойни зони с високо термично съпротивление. По този начин положителният ефект от увеличената топлообменна площ може да бъде ограничен от влошаването на условията за естествена конвекция.

На базата на проведените експерименти може да се заключи, че конфигурацията със 183 квадратни ламели осигурява най-благоприятни топлинни характеристики сред разгледаните варианти. Получените резултати потвърждават, че при проектирането на оребрени топлообменни повърхности е необходимо да се търси подходящо съотношение между развитата топлообменна площ и разстоянието между ламелите, вместо ефективността да се оценява единствено въз основа на увеличаването на техния брой.

Източник на финансиране *Настоящото изследване е извършено с финансовата подкрепа на договор по проект № НИП2026-12.*

БЛАГОДАРНОСТИ: *Авторът изказва благодарност на „Фидокс България“ ЕООД за изработването на опитния образец, използван при провеждането на експерименталните изследвания.*

ЛИТЕРАТУРА

[1] Webb RL. Principles of enhanced heat transfer. New York: John Wiley & Sons, 1994.

[2] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

[3] Kakaç S, Liu H, Pramuanjaroenkij A. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

[4] Shah RK, Sekulić DP. Fundamentals of heat exchanger design. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

[5] Janna WS. A manual for the heat transfer laboratory. University of Memphis, 2002.