

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛООБМЕНА ПРИ ОРЕБРЕНА ТРЪБА С РАЗЛИЧНА СТЬПКА НА ЛАМЕЛИТЕ

Пламен Йорданов Бонев

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

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN A FINNED TUBE WITH DIFFERENT FIN PITCHES

Plamen Yordanov Bonev

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

Abstract

This paper presents an experimental study of heat transfer performance in a finned tube with several fin pitches. The test loop circulates water at controlled inlet temperatures of 45–55 °C and room air at 20 °C. Inlet/outlet water temperatures and volumetric flow are measured, and overall heat transfer rate Q and overall conductance UA are evaluated. Results indicate that tighter fin pitch (183 fins in the studied geometry) yields the largest UA and Q in the tested Reynolds range.

Keywords: heat transfer, finned tube, fin pitch, natural convection, overall heat transfer coefficient.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните енергийни и термотехнически системи оптимизацията на топлообменните повърхности е ключов фактор за повишаване на ефективността и намаляване на енергийните загуби. Тенденцията към миниатюризация на апаратите, използването на възобновяеми източници на енергия и необходимостта от устойчиви решения поставят нови изисквания към компактността и топлинната производителност на топлообменниците. Подобряването на топлообменните повърхности позволява да се увеличи коефициентът на топлоотдаване, да се намали консумацията на енергия за пренос на флуидите и да се по-

стигне по-висока обща ефективност на термодинамичните цикли. В този контекст развитието на интензифициращи структури – оребрени, порести, микроканални или комбинирани повърхности – се превръща в стратегическа насока за модерното топлотехническо проектиране. Оребрените тръби са сред най-разпространените решения за интензификация на топлообмена, благодарение на способността си да увеличават топлообменната площ без значително нарастване на масата и обема на апарата. Те намират широко приложение в топлообменници с въздушно охлаждане, в изпарителни и кондензаторни секции на климатични и хладилни инсталации, в

охладители на масла и компресори, както и в енергийни системи за отпадна топлина. Чрез оребряване се постига по-висока плътност на топлинния поток и по-равномерно разпределение на температурата по повърхността на тръбата. Геометрията на ребрата – тяхната височина, дебелина, форма и стъпка – може да се адаптира към конкретния режим на конвекция и вида на работния флуид, като по този начин се реализира оптимален баланс между топлинна ефективност и хидродинамично съпротивление. Особено значение имат тръбите с плоски, вълнообразни или радиално разположени ламели, които позволяват целенасочено управление на граничния слой и подобро отвеждане на топлината при естествена или принудителна конвекция.

Такива повърхности намират широко приложение в топлообменници за климатични, хладилни и енергийни системи, както и в електронни охладители, където ограниченото пространство и високата плътност на топлинния поток изискват висока ефективност на топлоотдаване.

Геометричните параметри на ламелите – тяхната стъпка, дебелина, форма и височина – оказват съществено влияние върху интензитета на конвективния топлообмен и хидродинамичните загуби.

Намаляването на стъпката на ламелите води до увеличаване на ефективната повърхност, но същевременно ограничава въздушния поток между ребрата, което може да повиши съпротивлението и да намали коефициента на топлоотдаване при естествена конвекция.

Затова изследването на оптималната стъпка на оребрени тръби представлява важна инженерна задача, която изисква експериментална оценка и анализ на интегралните показатели на топлопреминаване – топлинен поток Q , обща проводимост UA и критерий на Рейнолдс Re .

При анализа на топлообменните процеси при оребрени тръби е важно да се отчете не само геометрията на ламелите, но и термофизичните свойства на работния флуид, режима на протичане и гра-

ничните условия. Когато течението е ламинарно или с нисък турбулентен интензитет, оребряването има по-съществен ефект върху повишаването на локалния коефициент на топлоотдаване. При по-високи скорости, обаче, прекомерното уплътняване на ламелите може да доведе до спад на ефективността поради засилване на хидравличното съпротивление и ограничаване на обмяна на топлина между ламелите и околния въздух. Затова изборът на оптимална стъпка трябва да бъде резултат от компромис между увеличената площ на топлообмен и устойчивия режим на въздушно движение между ребрата [1].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Оребрените повърхности са класически подход за интензифициране на конвективния топлообмен чрез увеличаване на топлообменната площ и управляване на граничния слой. При въздушни среди и ограничени габарити те са особено ефективни, тъй като позволяват реализиране на висок топлинен поток при сравнително малки температурни разлики между повърхността и околната среда [2].

Основният механизъм на подобрене се изразява в повишаване на локалните коефициенти на топлоотдаване чрез разрушаване на термичния граничен слой и създаване на условия за по-интензивна турбулентност или микровихрови структури между ламелите. В зависимост от конкретната геометрия, оребрените повърхности могат да бъдат оптимизирани за естествена, принудителна или смесена конвекция.

Стъпката на ламелите е водещ геометричен параметър, който влияе едновременно върху коефициента на топлоотдаване и съпротивлението на протичане. По-малката стъпка увеличава ефективната повърхност и намалява температурния градиент по ребрата, но при прекомерно уплътняване се наблюдава ограничаване на въздушния поток и повишаване на хидродинамичните загуби. В ли-

температурата са известни множество конфигурации – плоски, вълнообразни, перфорирани и радиални ламели – като всяка от тях предлага специфичен баланс между термична ефективност и аеродинамична стабилност. Оптимумът е силно зависим от режима на течението, вида на флуида, ориентацията на тръбата и конструктивните ограничения на конкретното приложение [3].

Настоящата работа има за цел да оцени влиянието на стъпката на ламелите върху интегралните показатели на топлообмена – топлинен поток Q и обща проводимост UA – при четири конфигурации на една и съща оребрена тръба, като параметър е броят на ламелите: 183, 206, 216 и 283. За целта са проведени експерименти в реална лабораторна установка при контролирани температурни и дебитни условия, с цел определяне на оптималната стъпка, осигуряваща най-висока ефективност на топлообмена.

Топлинният поток през циркулиращия флуид се оценява по енергийния баланс:

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} (T_o - T_i) \quad (1)$$

където $\dot{m}$ е масовият дебит, c_p – топлоемност при постоянно налягане, а T_i и T_o – входна и изходна температура.

Общата проводимост се определя чрез средно-аритметична обемна температура на водата в тръбата T_f и околния въздух T_a .

$$UA = \dot{Q} / \Delta T_m \quad (2)$$

В контекста на оребрени повърхности, ефективността на оребвяването мо-

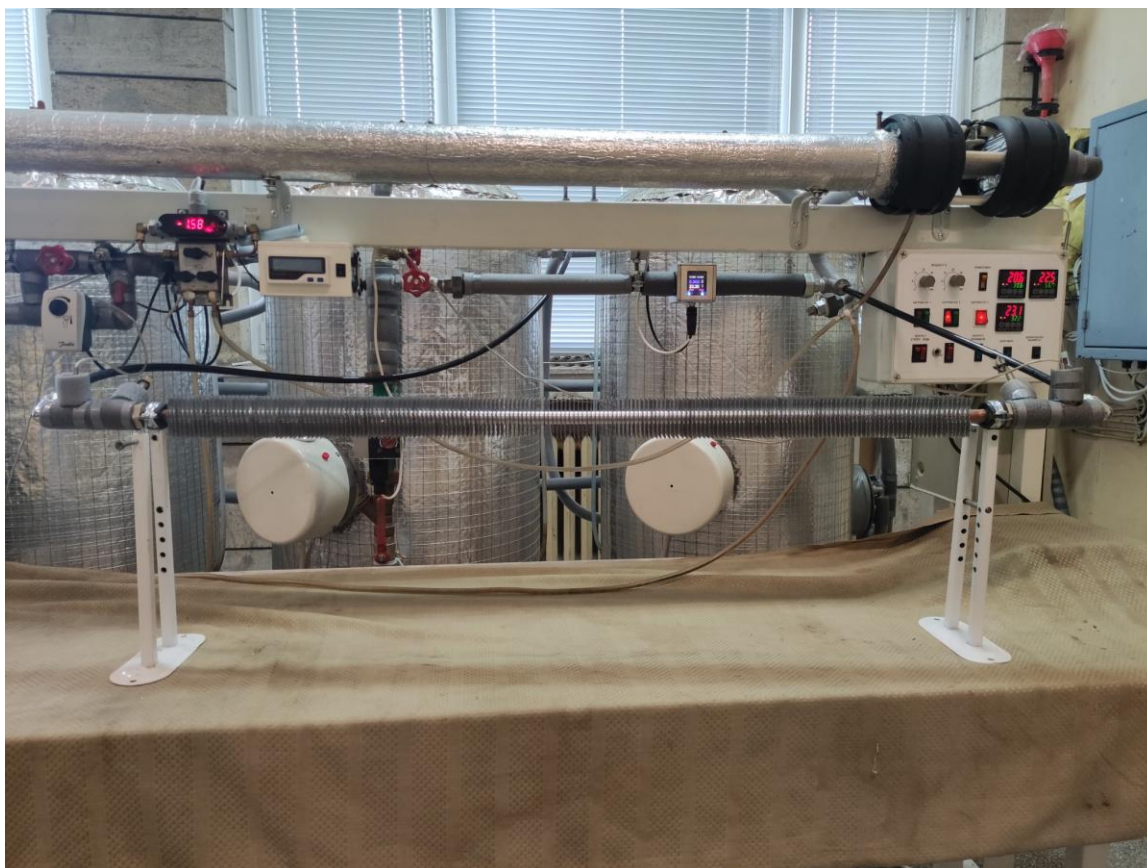
же да се въведе чрез класическите определения за ефективност на ребро η_f и ефективност на оребрена повърхност η_o , но в настоящата работа се използват интегралните показатели Q и UA за сравнение между геометрии.

Системата включва резервоар с електрически нагревател, циркуляционна помпа, оребрена тръба и измервателни средства: термодвойки за T_i и T_o , дебитомер за обемния дебит и контролна система. Входната температура се задава 45–55 °C; температурата на помещението е около 20°C. Изследвани са четири конфигурации, характеризирани с различен брой ламели (183, 206, 216, 283).

Методиката включва стабилизиране на режима при даден дебит, запис на T_i , T_o и изчисляване на Q и UA . Реалните измервания са извършени при няколко стойности на числото на Рейнолдс, покриващи ниски до умерени дебители.

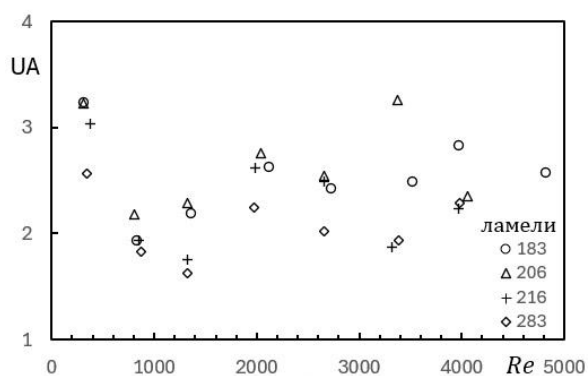
Данните се визуализират и съхраняват в програмна среда LabVIEW, което позволява едновременно наблюдение на моментните стойности и последваща обработка. Дебитомерът е калибриран за диапазона на изследване, като осигурява достатъчна точност при ниски скорости на потока.

За всяка конфигурация на ламелите се извършват по няколко експериментални серии при различни дебители, като целта е да се обхване диапазонът на числото на Рейнолдс от около 300 до 5000. Преди всяко измерване системата се оставя да достигне стационарен топлинен режим, при който температурната разлика между последователни показания е по-малка от ± 0.2 °C.

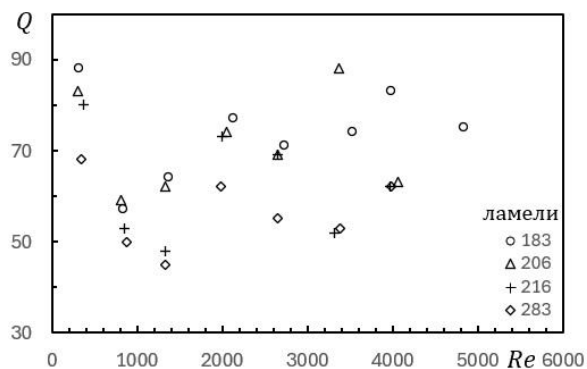


Фиг. 1. Експериментална установка за изследване на оребрена тръба.

На фиг. 2 и фиг. 3 са представени графики на UA и Q като функции на Re. При по-малка стъпка на ламелите (183) се наблюдават най-високи UA и Q в разглеждания диапазон. Това е очаквано, тъй като по-гъстото оребрение увеличава ефективната площ и интензифицира конвективния пренос.



Фиг. 2. Зависимост $UA = f(Re)$ при различен брой ламели- $T_f = 50^\circ\text{C}$.



Фиг. 3. Зависимост $Q = f(Re)$ при различен брой ламели- $T_f = 50^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Усреднени стойности на UA и Q за разгледаните конфигурации

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

Обобщено се вижда, че конфигурацията с 183 ламели постига най-високи усреднени стойности на UA и Q . При 283 ламели се наблюдава редукция, която може да се дължи на ограниченото проветряване между ламелите и увеличено аеродинамично съпротивление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталното изследване показва, че намаляването на стъпката на ламелите води до увеличаване на интегралната проводимост UA и топлинния поток Q в разгледания диапазон на Re .

Най-добро поведение демонстрира конфигурацията с 183 ламели. В бъдеща работа е целесъобразно да се разшири диапазонът на Re , да се оценят хидравличните загуби и да се въведе критерий за цялостна ефективност, който комбинира термичния и хидравличния принос.

Получените резултати потвърждават, че геометричните параметри на оребрите повърхности имат съществено влияние върху интензивността на топлообмена. Намаляването на стъпката на ламелите води до увеличаване на ефективната площ и до по-добро развитие на конвективния процес, но същевременно може да предизвика повишаване на съпротивлението на въздушния поток.

Този ефект се обяснява с промяната на структурата на въздушния поток между ламелите, където при по-гъсто оребряване се формират зони с локални вихрови образувания и по-интензивен топлообмен в близост до основата на ребрата. Същевременно, ограниченото пространство между ламелите увеличава скоростния градиент и води до по-високи стойности на локалния коефициент на триене, което повишава съпротивлението на въздуха и изисква по-голям енергиен разход при принудителна конвекция.

Следователно изборът на стъпка трябва да се базира на комплексна оцен-

ка, отчитаща както подобряването на топлинния поток, така и минимизирането на хидродинамичните загуби, с цел оптимално съотношение между термична ефективност и енергийна икономичност.

Следователно оптималната конфигурация трябва да бъде определяна не само въз основа на максималния топлинен поток, но и с оглед на енергийната ефективност на системата като цяло. Конфигурацията с 183 ламели показва най-добър компромис между висока термична производителност и приемливи хидравлични характеристики в разгледания диапазон на Re .

Следователно оптималната конфигурация трябва да бъде определяна не само въз основа на максималния топлинен поток, но и с оглед на енергийната ефективност на системата като цяло.

Конфигурацията с 183 ламели показва най-добър компромис между висока термична производителност и приемливи хидравлични характеристики в разгледания диапазон на Re .

Източник на финансиране

Настоящата публикация е изготвена в рамките на изпълнението на проект № НИП2025-13, финансиран от Фонд „Научни изследвания“ на Технически университет – Габрово.

Благодарности:

Настоящата публикация е изготвена във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № НИП2025-13.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 2007.
- [2] Holman J.P. Heat Transfer, McGraw-Hill, 2010.
- [3] Webb R.L., Kim N.H. Principles of Enhanced Heat Transfer, Taylor & Francis, 2005.