

Технічні науки

УДК 536.24:621.184.5

Фіалко Наталія Михайлівна

*доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України, завідувача відділу
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Fialko Nataliia

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member NAS of Ukraine, Head of the Department
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Навродська Раїса Олександрівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Navrodska Raisa

*Candidate of Technical Sciences,
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Шевчук Світлана Іванівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Shevchuk Svitlana

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Гнедаш Георгій Олександрович

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Gnedash Georgii

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Сбродова Галина Олександрівна

*кандидат фізико-математичних наук, доцент,
старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Sbrodova Galyna

*Candidate of Physic & Mathematic Sciences,
Associate Professor, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ОРЕБРЕННЯ ТРУБ КОНДЕНСАЦІЙНИХ
ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК
OPTIMIZATION OF TUBE FINNING PARAMETERS FOR CONDENSING
HEAT RECOVERY EXCHANGERS OF BOILER PLANTS**

***Анотація.** Наведено результати розрахункових досліджень щодо визначення оптимальних геометричних параметрів оребрень трубних пучків водогрійного теплоутилізаторів котлів за умов глибокого охолодження димових газів. Параметри отримано на основі мінімізації відносної металоемності теплообмінної поверхні теплоутилізатора. Встановлено залежності для розрахунку оптимальних безрозмірних значень: висоти ребра H , міжреберного кроку S та товщини ребра B .*

***Ключові слова:** водогрійний теплоутилізатор, глибоке охолодження димових газів, біметалеві труби.*

***Summary.** The results of calculation studies on determining the optimal geometric parameters of tube bunds finning of water-heating heat recovery*

exchanger boilers under conditions of exhaust gases deep cooling are presented. The parameters were obtained based on minimizing the relative metal capacity of the heat exchange surface of the heat recovery exchanger. Dependencies have been established for calculating optimal dimensionless values: fin height H , inter-fin step S , and fin thickness B .

Key words: *water-heating heat recovery exchanger, deep cooling of exhaust gases, bimetallic tubes.*

Одним із напрямів енергозбереження в децентралізованій енергетиці є підвищення ефективності використання палива в котлоагрегатах шляхом утилізації теплоти відхідних газів. Втрати тепла з відхідними газами в сучасних вітчизняних газоспоживальних котлах становлять в номінальному режимі 16 – 18 % при розрахунках за вищою теплотою згоряння палива і являють собою основну частину втрат теплоти в котельних агрегатах. Даний рівень втрат відповідає температурі відхідних газів 140 – 160 °С, що на протязі тривалого часу вважалось оптимальною межею. Однак, наразі спостерігається стійка тенденція до зниження температури відхідних газів нижче точки роси. Тобто фактично йдеться вже про глибоку утилізацію теплоти відхідних газів, коли використовується не тільки явне тепло (близько 7 – 8 %), але і прихована теплота (біля 10 %) пароутворення водяних парів, що містяться в димових газах [1, 2].

Вказана глибока утилізація теплоти зазвичай здійснюється із застосуванням водогрійних конденсаційних апаратів. Їхня теплообмінна поверхня здебільшого компонується із пучків оребрених труб [3]. Зважаючи на необхідність антикорозійного захисту поверхні труб в умовах конденсації на ній кислого конденсату широкого застосування при конструюванні конденсаційних теплоутилізаторів набули оребрені біметалеві труби (сталева основа і алюмінієве оребрення). З огляду на це,

актуальним є визначення раціональних геометричних параметрів ребрення для теплообмінників вказаного призначення.

Одним з основних техніко-економічних показників теплообмінників є, як відомо, їх відносна металоємність:

$$M_{\text{від}} = M_{\text{м}} / Q,$$

де $M_{\text{м}}$ - маса металу, т; Q - кількість утилізованої теплоти, МВт.

Мета роботи полягає у встановленні оптимальних геометричних параметрів ребрених біметалевих труб на основі мінімізації відносної металоємності теплообмінної поверхні конденсаційного теплоутилізатора.

Основні завдання дослідження полягали у визначенні теплових показників конденсаційного теплоутилізатора котельної установки та встановленні закономірностей зміни відносної металоємності цього теплоутилізатора за різних значень параметрів ребрення (рис. 1).

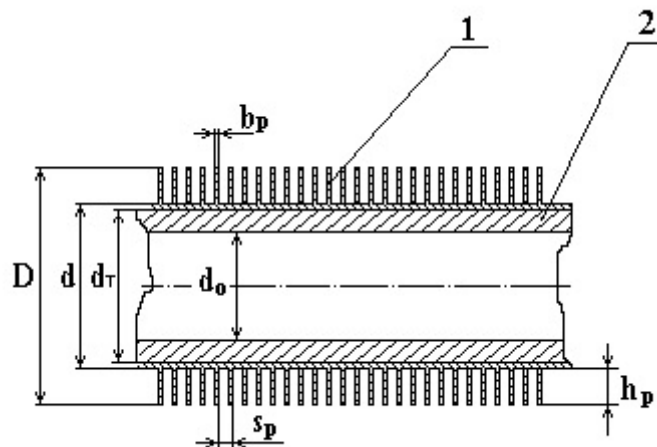


Рис. 1. Схема ребреної біметалевої труби:
1 – ребрення з алюмінію; 2 – сталеві труба

Поверхню теплообміну конденсаційного теплоутилізатора можна умовно розділити на дві частини. В першій відбувається охолодження димових газів до їхньої точки роси. Цей процес характеризується суто конвективним ("сухим") теплообміном, без зміни вологовмісту газового потоку. В другій частині трубного пучка відбувається більш глибоке

охлаждения продуктов сгорания (ниже $60 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) с конденсацией водяной пары, яку містять відхідні гази. Конвективний теплообмін при цьому супроводжується і масообміном. Цей процес дістав назву теплообміну з конденсацією (або "мокрого" теплообміну).

Очевидно, що параметри оребреної труби повинні забезпечувати ефективне передавання тепла як при "сухому", так і при "мокрому" теплообміні, бо між ними не існує чіткої межі.

При визначенні Q коефіцієнти теплопередачі при "сухому" теплообміні знаходились за методиками, викладеними в [4]. В основу розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі з газового боку в конденсаційному режимі роботи покладені дослідні дані, одержані автором в експериментальних дослідженнях [5].

Розглядався пучок з 10 рядів оребрених труб, розташованих в шаховому порядку по 5 і 6 труб в ряду. В розрахунках приймалися рівними відносні поздовжній та поперечний кроки $S_1 = S_2 = 1$, а варіювались значення h_p , b_0 и s_p та температура води на вході в теплообмінник, котра в "сухому" режимі приймалась рівною $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в конденсаційному – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахунки виконані для температури газів на вході $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, а значення критерія Re змінювались від 5000 до 12000.

Характерні результати теплових розрахунків стосовно описаного трубного пучка подані на рис. 2, де представлено залежності $M_{\text{від}}$ від безрозмірних значень висоти ребра H ($H = h_p/d$), міжреберного кроку S ($S = s_p/d$) та товщини ребра B ($B = b_0/d$). Аналіз результатів свідчить, що оптимальні значення безрозмірної висоти ребра при "сухому" теплообміні знаходяться в межах $0,15 - 0,4$ в залежності від міжреберного кроку S . При "мокрому" теплообміні екстремуми функції зсуваються в бік збільшення висоти ребра і знаходяться в діапазоні $0,3 - 0,6$ за тих же значень S .

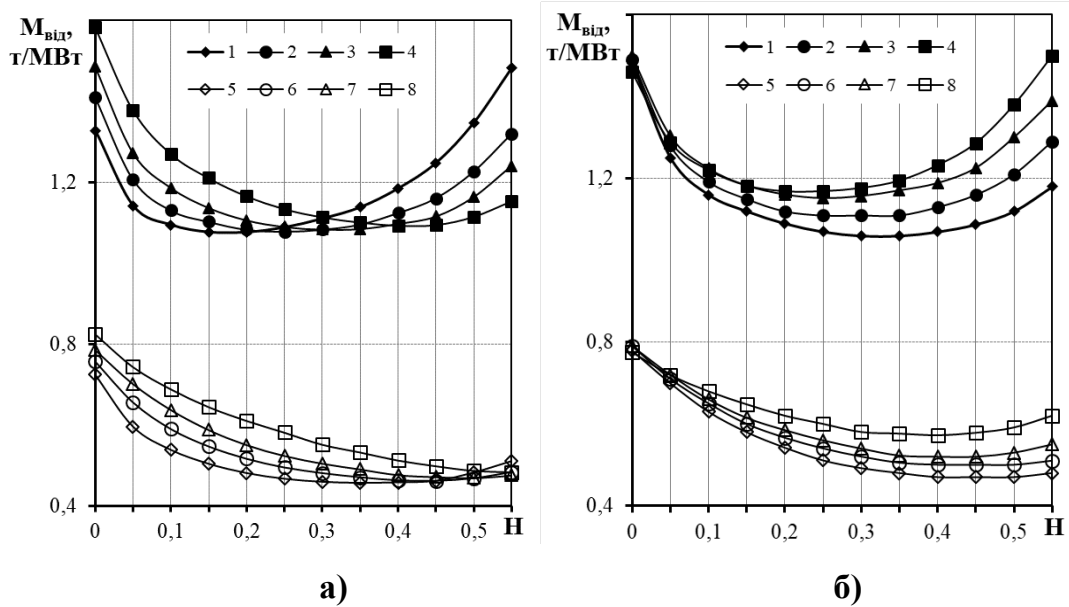


Рис. 2. Залежність відносної металоємності пучка з біметалевими трубами з алюмінієвим оребренням від безрозмірної висоти ребра H для “сухого” (1-4) і “мокрого” (5-8) теплообміну:

а) $B = 0,014$: 1, 5 – $S = 0,09$; 2, 6 – $S = 0,12$; 3, 7 – $S = 0,16$; 4, 8 – $S = 0,22$;

б) $S = 0,16$: 1, 5 – $B = 0,013$; 2, 6 – $B = 0,016$; 3, 7 – $B = 0,010$; 4, 8 – $B = 0,025$

Слід зазначити, що екстремальні значення безрозмірної висоти ребра меншою мірою залежать від величини B . В діапазоні значень B від 0,01 до 0,025 оптимальні значення $H_{\text{опт}}$ знаходяться в межах 0,2 – 0,3 при “сухому” і 0,3 – 0,4 при “мокрому” теплообміні. Аналіз результатів показав, що потоншення ребра в дослідженому практичному діапазоні значень B призводить до зменшення питомої металомісткості.

Розрахункові дослідження показали ще менш суттєву, ніж від величини B , залежність $H_{\text{опт}}$ від числа Re і температури газів t_g на вході, хоч екстремальне значення $M_{\text{від}}$ може суттєво змінюватись.

Зіставлення результатів свідчить, що найбільш раціональні значення безрозмірної висоти ребра H для всієї теплообмінної частини (“сухої” та “мокрої” зон) конденсаційних апаратів знаходяться в межах 0,3 – 0,4.

За результатами даних виконаних обчислювальних експериментів визначено також діапазон раціональних значень S : він становить для зони

“сухого” теплообміну 0,12 – 0,3, а для конденсаційної зони - 0,09 – 0,22. Доречно, однак, зазначити, що в практиці для області “мокрого” теплообміну безрозмірний міжреберний крок S повинен прийматись не менше 0,15. Ця вимога обумовлена необхідністю запобігання “залипання” міжреберного простору в умовах стікання конденсатної плівки і значного збільшення аеродинамічного опору.

В результаті досліджень запропоновано співвідношення для визначення оптимального значення безрозмірної висоти ребра $H_{\text{опт}}$ від величин B і S для труб з поперечним оребренням в умовах застосування конденсаційних теплоутилізаторів:

для зони “сухого” теплообміну

$$H_{\text{опт}} = a_0 + m_0 S + (n_0 + g_0 S) B, \quad (1)$$

для зони “мокрого” теплообміну

$$H_{\text{опт}} = a_1 + a_2 e^{m_1 S} + n_1 B. \quad (2)$$

Тут всі геометричні характеристики віднесені до діаметру оребреної труби d , а константи $a_0, a_1, a_2, g_0, m_0, m_1, n_0, n_1$ залежать від матеріалу розвинутої поверхні. Для сталевих труб з алюмінієвим оребренням: $a_0 = 0,07$; $a_1 = 0,555$; $a_2 = -3,5$; $g_0 = -35,67$; $m_0 = 2,04$; $m_1 = -35$; $n_0 = 1,64$; $n_1 = -6,6$. Залежності (1), (2) апроксимують дані обчислювальних експериментів. Максимальна відносна похибка при розрахунках $H_{\text{опт}}$ при $S = 0,15 - 0,3$; $B = 0,01 - 0,025$ та $H = 0,3 - 0,4$ не перевищує 2 %.

Слід наголосити, що виконаний аналіз результатів стосується використання біметалевих труб з алюмінієвим оребренням і сталюю основою (рис. 2). Застосування алюмінієвого оребрення доцільно не лише з точки зору підвищення теплової ефективності ребра, але і з міркувань його корозійної стійкості до вуглекислоти, яка утворюється при розчиненні в конденсаті двоокису вуглецю та азоту з димових газів [6].

Висновок. Виконані розрахункові дослідження дозволили встановити розрахункові залежності для визначення оптимальних геометричних параметрів оребrenних біметалевих труб в конденсаційних теплоутилізаторах газоспоживальних котельних установок.

Література

1. Fialko N., Navrodska R., Presich G., Gnedash G., Shevchuk S., Stepanova A. Kombinovani teploutylizatsiini systemy dlia gazospozhyvalnykh kotliv komunalnoi teploenergetyky [Combined heat recovery systems for gas-fired boilers of communal heat energy]. Kiev: Printing house "About format". 2019. 192 p.

2. Navrodska R. O., Fialko N. M., Gnedash G. O., Sbrodova G. O. Energy-efficient heat recovery system for heating the backward heating system water and blast air of municipal boilers. *Industrial heat engineering*. 2017. 39(4). P. 69-75. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.10>

3. Терех О. М., Семеняко О. В., Рогачов В. А., Баранюк О. В., Багрій П. І. Теплоаеродинамічна ефективність шахового розташування пучків труб з поперечними ребрами. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*. 2012. 2 (8(56)). С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.3773>

4. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-ореbренных труб. Киев: Альтерпрес. 2004. 244 с.

5. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., Shevchuk S.I. Study of heat recovery systems for heating and moisturing combustion air of boiler units. *Nauka innov*. 2020. 16(3). P. 47-53. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>

6. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Гнедаш Г.О., Новаківський М.О., Сбродова Г.О. Використання та відведення кислого водяного конденсату у

газоспоживальних котельнях. *Муниципальное хозяйство міст.* 2021. Т.4, № 164. С. 24-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-24-30>