Технічні науки

УДК 536.24:621.184.5

Фіалко Наталія Михайлівна
доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України, завідувач 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

Гнєдаш 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

РАЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ОРЕБРЕНИХ ТРУБ КОНДЕНСАЦІЙНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ ОПАЛЮВАЛЬНИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК
FINNED TUBES RATIONAL PARAMETERS OF CONDENSATION HEAT RECOVERY EXCHANGERS HEATING BOILER PLANTS

Анотація. *Наведено результати розрахункових досліджень щодо встановлення меж раціональних значень висоти ребра труб теплоутилізаторів, призначених для нагрівання зворотної тепломережної води котлів за умов глибокого охолодження димових газів. Дослідження виконувались для трубних пучків зі сталевим і алюмінієвим оребренням. Показано, що алюмінієве оребрення має переваги стосовно реалізації конденсаційного режиму теплоутилізатора.*

Ключові слова: *глибоке охолодження димових газів, матеріал оребрення трубних пучків, температура і висота ребра.*

Summary. *The results of calculation studies on establishing the limits of rational values for the height of heat recovery exchanger tube fins designed to*

heat return heat-network water of boilers under conditions of exhaust gases deep cooling are presented. The studies were performed for bundles tube with steel and aluminum fins. It is shown that aluminum finning has advantages in terms of implementing the condensation mode of the heat recovery exchanger.

Key words: *exhaust gases deep cooling, bundle tube finning material, temperature and fin height.*

Перелік позначень: b – товщина ребра, м; $B = b / d$ – безрозмірна товщина ребра; D – діаметр оребрення труби, м; d – діаметр труби, м; $M_м$ – маса металу, т; Q – утилізована потужність, кВт. h – висота ребра, м; $H = h / d$ – безрозмірна висота ребра; $s_р$ – крок оребрення, м; $S = s_р / d$ – безрозмірний крок оребрення; t – температура, °С; $T = t / t_н$ – безрозмірна температура; $\alpha_г$ – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м^2 К); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К); $\Theta = t / t_н$ – безрозмірна температура води; $\Theta_{max} = t_{max} / t_н$ – безрозмірна температура вершини ребра. χ – коефіцієнт надміру повітря. **Індекси:** вер – вершина; max – максимальний; від – відносний н – насичення; опт – оптимальний; р – ребро.

Ефективність систем утилізації скидної теплоти паливоспоживальних котельних установок визначається глибиною охолодження димових газів [1; 2]. Зниження температури цих газів нижче точки роси з випаденням конденсату на поверхнях теплообміну та використанням теплоти відповідного фазового переходу реалізується в конденсаційних теплоутилізаторах. У разі застосування для опалювальних котельних установок комбінованих систем теплоутилізації з нагріванням зворотної води та дуттьового повітря використовуються відповідні конденсаційні теплообмінники-теплоутилізатори [1; 2]. Водогрійні теплоутилізатори зазвичай компонуються з пучка оребрених труб. Визначенню раціональних геометричних параметрів оребрення для теплообмінників вказаного призначення присвячено низку досліджень, зокрема [3; 4]. Робота [4] стосується визначення оптимальних параметрів

поперечно оребрених труб конденсаційних теплоутилізаторів за показником їх відносної металоємності $M_{\text{від}}$ $\left(M_{\text{від}} = M_{\text{від}} / Q\right)$.

За результатами досліджень в [4] запропоновано співвідношення для визначення оптимального значення безрозмірної висоти ребра $H_{\text{опт}}$ для конденсаційної зони трубного пучка теплоутилізатора.

$$H_{\text{опт}} = a_1 + a_2 e^{m_1 S} + n_1 B, \quad (1)$$

Тут константи a_1, a_2, m_1, n_1 залежать від матеріалу розвиненої поверхні.

Однак, при виборі раціональних параметрів оребрення необхідно враховувати температуру ребра, яка суттєво залежить від температури теплоносія на вході в теплоутилізатор. Це особливо важливо у разі використання конденсаційних апаратів опалювальних котлів. У цій ситуації значення температури води на вході в теплоутилізатор змінюється від 30 до 70 °С відповідно до графіка роботи теплових мереж. За максимальної температури води в зворотній магістралі котельні вся поверхня трубного пучка експлуатується в режимі без конденсації пари з димових газів. При зниженні ж температури води на певній ділянці поверхні теплообміну відбувається перехід до конденсаційного режиму.

Мета роботи полягає у визначенні максимальної температури ребра та раціональних значень висоти оребрення за умов використання конденсаційних теплоутилізаторів для опалювальних котлів.

Основні завдання дослідження полягали у встановленні для конденсаційного водогрійного теплоутилізатора опалювального котла закономірностей зміни теплових показників теплоутилізатора та температури оребрення труб пучка в різних режимах експлуатації.

Виникнення конденсаційного режиму в досліджуваному теплоутилізаторі зумовлено зменшенням температури на поверхні ребра нижче точки роси $t_{\text{н}}$ водяної пари. Значення $t_{\text{н}}$ визначається початковим

вологовмістом димових газів, який залежить від величини коефіцієнта надміру повітря χ. Значення χ для газових котлів зазвичай знаходиться в межах від 1,1 до 1,7, що відповідає температурам $t_н$ від 58 до 50 °С.

Очевидно, що для забезпечення конденсаційного режиму на теплообмінній поверхні необхідно, щоб його максимальна температура (температура вершини ребра) не перевищувала температуру точки роси $t_н$. Ця обставина визначає ефективну висоту ребра h. Подальше збільшення h призводить до збільшення питомої металоємності теплообмінної поверхні. Отже, температура поверхні ребра суттєво впливає на інтенсивність теплообміну при глибокому охолодженні парогазових сумішей.

Для круглих поперечних ребер прямокутного профілю температура вершини ребра може бути визначена при певних допущеннях аналітичним шляхом за модифікованими функціями Бесселя та з використанням значень коефіцієнта тепловіддачі α в конденсаційному режимі [2].

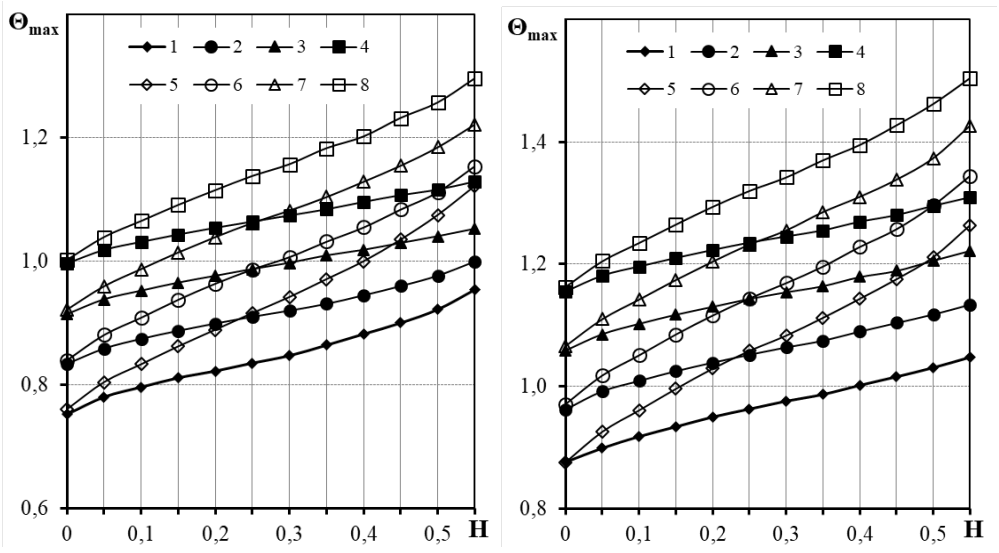
Якщо знехтувати теплообміном з торцевої поверхні вершини ребра, температуру на кінці ребра можна знайти з виразу:

$$t_{вер} = t_0 \frac{I_0(\beta \cdot r_{вер}) \cdot K_1(\beta \cdot r_{вер}) + I_1(\beta \cdot r_{вер}) \cdot K_0(\beta \cdot r_{вер})}{I_0(\beta \cdot r_0) \cdot K_1(\beta \cdot r_{вер}) + I_1(\beta \cdot r_{вер}) \cdot K_0(\beta \cdot r_0)}, \quad (2)$$

де $\beta = (2\alpha_г / \lambda_р b_р)^{0,5}$; I_0, I_1 - модифіковані функції Бесселя І-го роду нульового і першого порядків; K_0, K_1 - модифіковані функції Бесселя ІІ-го роду нульового і першого порядків. Значення функцій Бесселя можна визначити за допомогою формул або таблиць [5].

Доцільно розглянути залежність безрозмірної температури ребра Θ_{max} від геометрії оребрення і безрозмірної температури нагріваної води T. На рис. 1а,б наведено результати визначення за співвідношенням (2) температури Θ_{max} трубного пучка в залежності від безрозмірної температури T для двох видів оребрення – алюмінієвого та стального.

Із наведених результатів випливає, що у разі алюмінієвого оребрення (рис. 1а) за безрозмірної висоти ребра до 0,4 максимальна температура на его поверхні не перевищує точку роси водяної пари ($\Theta_{max} < 1$) в достатньо широкому діапазоні температур води T за значень коефіцієнта надміру повітря χ = 1,1 ($t_н$ = 58 °С). При збільшенні χ ефективність теплообміну знижується і досягнення режиму конденсації може реалізуватись при коротших ребрах і нижчих температурах води (рис. 1б). Тому область використання формули (1) для визначення оптимальної висоти ребра обмежується значенням 0,4 за χ = 1,1 і 0,2 за χ = 1,7.



а) **б)**

Рис. 1. Залежність максимальної температури ребра Θ_{max} від його висоти H для алюмінієвого (*1-4*) і стального (*5-8*) оребрення за різних значень коефіцієнтів надлишку повітря χ :

а) χ = 1,1 та $t_н$ = 58 °С; б) χ = 1,7 та $t_н$ = 50 °С;

***1, 5* – *T* = 0,69; *2, 6* – *T* = 0,78; *3, 7* – *T* = 0,86; *4, 8* – *T* = 0,95**

Використання пучків труб з алюмінієвим оребренням, як показали дослідження, не призводить до помітного підвищення Θ_{max}, незважаючи на деяке зменшення коефіцієнта ефективності ребра. Це зумовлено тим, що в сумі термічних опорів теплопередаванню домінуючим є опір від газів до

оребреної поверхні, так що деяке збільшення термічного опору біметалевого ребра не призводить до відчутного зростання Θ_{max}.

Інша ситуація має місце у разі сталевого оребрення. Тут термічний опір власне ребра значно вище і має місце помітне зростання Θ_{max}. Досягнення конденсаційного режиму у цьому разі можливе за низьких коефіцієнтів надміру повітря (χ = 1,1 – 1,2) і коротких ребрах (H < 0,2).

Вищевикладене дозволяє зробити висновок, що для конденсаційних теплоутилізаторів доцільно використовувати в першу чергу труби з алюмінієвим оребренням або сталеві ребристі труби з алюмінієвим покриттям.

Висновок. За результатами виконаних розрахункових досліджень встановлено максимальну температуру ребра та раціональні межі для його безрозмірної висоти в конденсаційній зоні трубного пучка водогрійного теплоутилізатора опалювального котла за різних матеріалів оребрення та умов експлуатації теплоутилізатора.

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/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). P. 31–37. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.3773

4. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнєдаш Г. О., Сбродова Г. О. Оптимізація параметрів оребрення труб конденсаційних теплоутилізаторів котельних установок. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука".* 2025. № 11. DOI: https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-11-11621

5. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребренных труб. Киев: Альтерпрес, 2004. 244 с.