

Л. А. Боднар

І. В. Лепетан

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОТРУБНОМУ ТЕПЛООБМІННИКУ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА

Вінницький національний технічний університет

В роботі проведено дослідження ефективності інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику водогрійного котла, проведено порівняльний аналіз залежностей для розрахунку інтенсивності теплообміну. Досліджено вплив відносного кроку закручування інтенсифікатора  $s/d$  на коефіцієнт тепловіддачі з боку газів та втрати тиску в газотрубному теплообміннику. На основі чисельних розрахунків запропоновано залежність для розрахунку інтенсивності теплообміну в газотрубній частині котла. Показано, що конвективний коефіцієнт тепловіддачі після встановлення інтенсифікаторів збільшується в 1,7...2 рази при зростанні втрат тиску в 1,62...1,9 разів порівняно з варіантом без інтенсифікації теплообміну при цьому коефіцієнт корисної дії котла збільшився на 5 %.

**Ключові слова:** водогрійний котел, інтенсифікація теплообміну, коефіцієнт тепловіддачі, втрати тиску.

### Вступ

Інтенсифікація теплообміну в елементах котла є ефективним способом підвищення надійності та економічності роботи котла. На даному етапі розроблені різні способи і засоби впливу на прикордонний шар [1] Однак, наявні відомості про процеси переносу в прикордонному шарі ще не привели до створення єдиної теорії інтенсифікації з визначеною математичною моделлю [2]. Тому дослідження в цьому напрямку є актуальними. Разом з тим є широкі теоретичні та експериментальні дані про ефекти інтенсифікації, що дозволяють обґрунтувати методи інтенсифікації теплообміну. Основний ефект досягається за рахунок посиленого оновлення середовища в прикордонних шарах, енергійного заміщення одних об'ємів іншими. Ці об'єми мають різний характер розподілення температури і швидкості і виконують роль носіїв кількості руху. Така складна схема обтікання поверхні теплообміну, що підвищує інтенсивність процесу, створюється штучно [3].

**Метою даної роботи** є дослідження впливу відносного кроку закручування інтенсифікатора на коефіцієнт тепловіддачі з боку газів в газотрубному теплообміннику водогрійного котла та на гідравлічний опір.

### Дослідження ефективності інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику водогрійного котла

Огляд інформації, розміщеної на інтернет-сайтах виробників котлів, показав, що для інтенсифікації теплообміну в конвективній частині найбільше використовуються інтенсифікатори у вигляді скручених пластин (рис. 1).

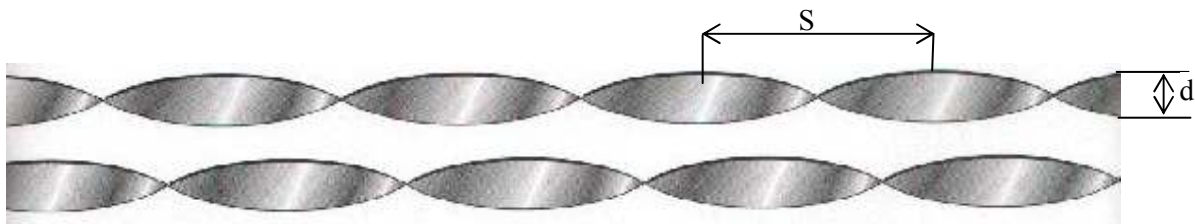


Рис. 1. Інтенсифікатор теплообміну у вигляді скрученої пластини

На інтенсивність теплообміну впливає відносний крок закручування інтенсифікатора  $S/d$ , а також режим руху теплоносія. Як зазначено в роботі [4], в ламінарному потоці інтенсифікація

тепловіддачі створюється за рахунок макродії на весь потік, порушенням усієї структури потоку. Для турбулентного режиму руху найбільш ефективним способом інтенсифікації теплообміну є турбулізація пристінного ламінарного прошарку. Режим руху димових газів в теплообмінниках водогрійних котлів здебільшого ламінарний або перехідний. Тому найбільш дієвим способом підвищення інтенсивності теплообміну в конвективній частині є встановлення інтенсифікаторів, що турбулізують ядро потоку [5].

Для конструкції, запатантованої на кафедрі теплоенергетики [6] розроблено математичну модель котла потужністю 100 кВт для спалювання соломи. Для створення математичної моделі використано рекомендації [1]. Математичну модель реалізовано в MS Excel.

Для дослідження впливу відносного кроку закручування інтенсифікатора на коефіцієнт тепловіддачі з боку газів, проведено огляд залежностей для розрахунку інтенсивності теплообміну.

В роботі [7] для визначення критерію Нуссельта у межах чисел Рейнольдса  $Re = 7700 \dots 17500$  запропоновано залежність (1)

$$Nu = 0,2216 \cdot Re^{0,71} \cdot (s/d)^{-0,41}. \quad (1)$$

В роботі [4] наведено залежності (2) і (3)

$$Nu = 1,84 Re^{0,44} Pr^{0,36} (2s/d)^{-0,33}, \quad Re = 1700 \dots 20000, \quad (2)$$

$$Nu = 0,401 Re^{0,6} Pr^{0,43} \left[ 1 + 1,62 \left( \frac{s}{d} \right)^2 \right]^{-0,135}, \quad Re = 600 \dots 30000, \quad (3)$$

де  $Pr$  – критерій Прандтля.

В роботі Щукіна В. К. [4] для  $s/d_{\text{вн}} = 2,5 \dots 11$ ;  $Re \cdot (d_{\text{вн}}/D_{\text{л}})^{0,5} = 50 \dots 8 \cdot 10^3$  запропоновано

$$Nu = 0,3 \cdot Re^{0,6} Pr^{0,43} \cdot (d/D_{\text{л}})^{0,135}, \quad (4)$$

де  $D_{\text{л}} = d \cdot \left( 0,5 + \frac{8}{\pi^2} \cdot \left( \frac{s}{d} \right)^2 \right)$  – діаметр кривизни осьової лінії каналу, утвореного стінками труби і стрічковою вставкою;  $s$  – крок закручування стрічки;  $d$  – внутрішній діаметр каналу. Визначальний розмір – еквівалентний діаметр каналу, визначальна температура – середня температура потоку.

Для визначення гідравлічного опору закрученого потоку В. К. Щукін запропонував формулу

$$\xi = \frac{6,34}{Re^{0,474}} \cdot \left( \frac{d}{D_{\text{л}}} \right)^{0,26} + \frac{25,6}{Re}. \quad (5)$$

Еквівалентний діаметр каналу із скрученою стрічкою В. К. Щукіним запропоновано записати у вигляді

$$d_{\text{е}} = \frac{d \cdot (\pi \cdot d - 4 \cdot \delta)}{\pi \cdot d + 2 \cdot (d - \delta)}, \quad (6)$$

де  $\delta$  – товщина інтенсифікатора.

За результатами розрахунку котла без інтенсифікації теплообміну отримані такі показники: температура відхідних газів  $t_{\text{вг}} = 250$  °С, ККД котла  $\eta_{\text{к}} = 85\%$ , критерій Рейнольдса в теплообміннику  $Re = 1385$ , конвективний коефіцієнт тепловіддачі з боку газів  $\alpha_{\text{г}} = 10,4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Для різного кроку закручування інтенсифікатора  $s/d$  проведено розрахунки теплообмінника котла з використанням залежностей (1-4). Результати розрахунку впливу  $s/d$  на коефіцієнт

тепловіддачі з боку газів наведено на рис. 2. Як видно з рис. 2, найбільш близькими за значеннями коефіцієнтами тепловіддачі є отримані за формулами (3) і (4). Такі розходження між значеннями пояснюються тим, що залежність (1) отримана автором для повітря при турбулентному русі. Залежність (2) отримана при дослідженні інтенсифікації теплообміну водяних потоків. Залежність (3) автором запропоновано для розрахунку інтенсивності теплообміну від повітря.

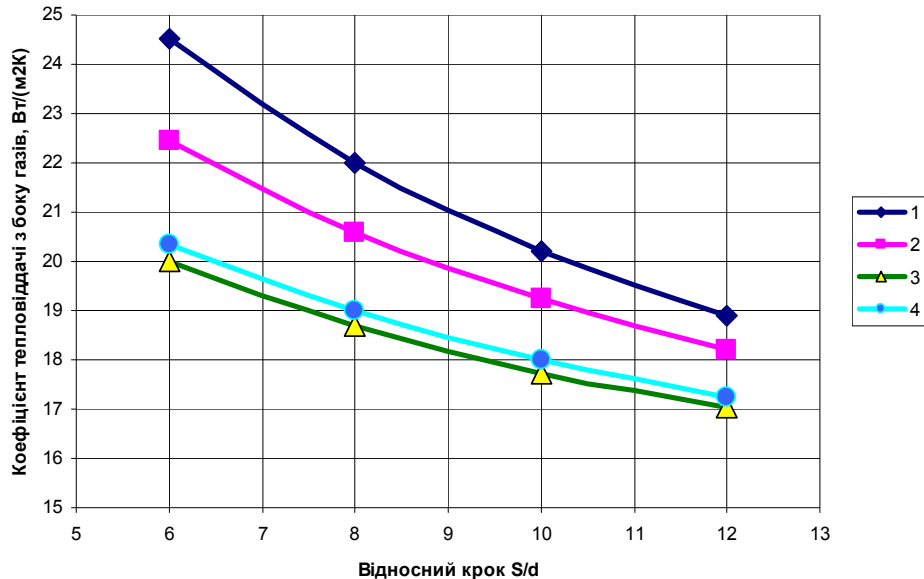


Рис. 2. Результати розрахунку коефіцієнта тепловіддачі за залежностями (1-4)

залежно від кроку закручування інтенсифікатора

Тому для подальшого використання беремо формулу Щукіна В. К.

Коефіцієнт корисної дії котла при номінальному навантаженні в разі встановлення інтенсифікаторів знаходиться в межах 88 – 91%, а температура відхідних газів 160 – 185 °С. На рис. 3 наведено залежність зростання втрат тиску, розрахованих за формулою (5) від кроку закручування інтенсифікатора.

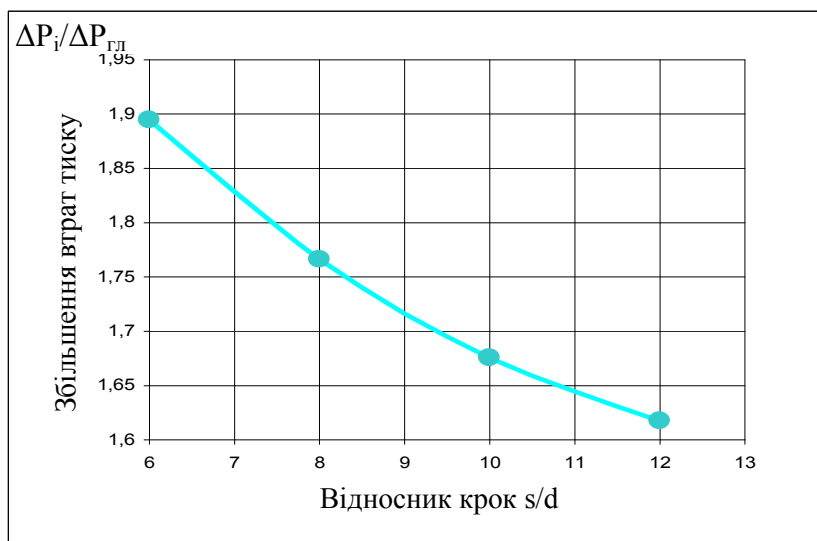


Рис. 3. Результати розрахунку збільшення втрат тиску в теплообміннику з інтенсифікацією  $\Delta P_i$  до втрат тиску в гладкотрубному теплообміннику  $\Delta P_{гд}$  залежно від кроку закручування інтенсифікатора

Як показали результати розрахунків, конвективний коефіцієнт тепловіддачі після встановлення інтенсифікаторів збільшується в 1,7 – 2 рази при зростанні втрат тиску в 1,62 – 1,9 разів порівняно з базовим варіантом (без інтенсифікації теплообміну). Остаточне прийняття рішення по вибору раціонального кроку закручування інтенсифікатора може бути прийняте після аеродинамічного розрахунку всіх елементів котла та оцінки додаткового збільшення потужності вентилятора чи

димососа.

Авторами також досліджено вплив відносного кроку закручування інтенсифікатора на температуру відхідних газів залежно від навантаження котла. Результати розрахунку показано на рис. 4.

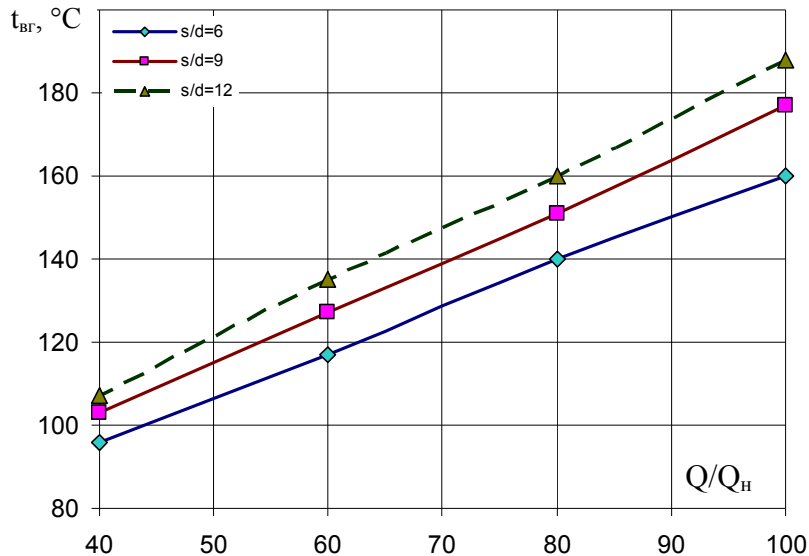


Рис. 4. Дослідження впливу параметру  $s/d$  на температуру відхідних газів  $^{\circ}\text{C}$ , залежно від навантаження котла

Зі збільшенням відносного кроку закручування інтенсифікатора  $s/d$  від 6 до 9 на всьому діапазоні зміни навантаження котла відбувається підвищення температури відхідних газів, що пов'язано зі зменшенням ефекту інтенсифікації теплообміну і відповідним зменшенням коефіцієнту тепловіддачі з боку газів. Це призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії котла. Для діапазону потужностей 40...60 % від номінальної відбувається зниження температури відхідних газів нижче  $120^{\circ}\text{C}$ . Оскільки до складу соломи в незначній кількості може входити сірка [9], то значне зниження температури відхідних газів може привести до конденсації оксидів сірки в теплообміннику та димоході. В зв'язку з цим, при виборі способу інтенсифікації теплообміну в котлі на твердому паливі та параметрів інтенсифікаторів, необхідно провести детальний тепловий і аеродинамічний розрахунок при зміні теплової потужності котла і оцінити діапазони раціональної роботи, за яких виключатиметься значне охолодження димових газів, а ефект від встановлення інтенсифікаторів буде перевищувати затрати на подолання додаткового гідравлічного опору в теплообміннику.

### Висновки

- Проведено дослідження впливу відносного кроку закручування інтенсифікатора на коефіцієнт тепловіддачі з боку газів в газотрубному теплообміннику водогрійного котла та на гідравлічний опір.
- Конвективний коефіцієнт тепловіддачі після встановлення інтенсифікаторів збільшується в 1,7 – 2 рази при зростанні втрат тиску в 1,62 – 1,9 разів порівняно з базовим варіантом (без інтенсифікації теплообміну).
- Проведено огляд залежностей для розрахунку інтенсивності теплообміну в разі встановлення в канал теплообмінника інтенсифікатора у вигляді скрученої стрічки і на основі порівняльних розрахунків запропоновано використовувати формулу Щукіна В. К. Коефіцієнт корисної дії котла після встановлення інтенсифікаторів збільшився з 85 % до 88 – 91 %, температура відхідних газів для номінального навантаження зменшилась від  $250^{\circ}\text{C}$  до  $160$  –  $185^{\circ}\text{C}$ , залежно від кроку закручування інтенсифікатора. Збільшення відносного кроку закручування інтенсифікатора  $s/d$  від 6 до 9 на всьому діапазоні зміни навантаження котла призводить до підвищення температури відхідних газів.
- При виборі способу інтенсифікації теплообміну в котлі та параметрів інтенсифікаторів

необхідно провести детальний тепловий і аеродинамічний розрахунок котла при зміні його теплової потужності і оцінити діапазони раціональної роботи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Степанов Д. В. Энергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності. Монографія / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2011 – 151 с.
2. Коваленко Л. М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л. М. Коваленко, А. Ф. Глушков. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 238 с.
3. Гухман А. А. Интенсификация конвективного теплообмена и проблема сравнительной оценки теплообменных поверхностей / А. А. Гухман // Теплоэнергетика. – 1977. – № 4. – С. 5–8.
4. Петренко В. П. Інтенсифікація теплообміну в апаратах харчових виробництв та холодильних машин / В. П. Петренко. – К.: НУХТ, – 2010 – 170 с.
5. Боднар Л. А. Ефективні методи інтенсифікації теплообміну в круглих каналах / Л. А. Боднар, Д. В. Степанов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 3 – С. 73 – 78.
6. Пат. 102615 України, МПК7 F24H1/00. Водогрійний котел / Боднар Л. А., Степанов Д. В., Робак М. Г.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. університет. – № 201504315; опубл.10.11.2015, Бюл. №21.
7. Колядин Е. А. Исследование и научное обоснование интенсификации теплообмена в судовых газотрубных утилизационных котлах : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»/ Е. А. Колядин. – Астрахань, 2007. – 20 с.
8. Щукин В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил / В. К. Щукин. – М. : Машиностроение, 1980. – 240 с.
9. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Аналитическая Записка БАУ №7 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.uabio.org/img/files/docs/Position-paper-uabio-7-ru.pdf>

**Боднар Лілія Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

**Лепетан Іван Васильович** – студент Вінницького національного технічного університету.

**L. Bodnar**

**I. Lepetan**

## RESEARCH EFFICIENCY INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN THE GAS PIPE HEAT EXCHANGER WATER HEATERS

Vinnitsia National Technical University

*The paper studied the effectiveness of intensifying heat exchanger in the boiler gas pipe, a comparative analysis of dependencies to calculate the intensity of heat transfer. The influence of the relative tightening step intensifier  $s/d$  by the coefficient of heat from the gases and loss of pressure in the gas pipe heat exchanger. Based on numerical calculations suggested dependent to calculate the intensity of heat transfer in the gas pipe of the boiler. It is shown that convective heat transfer coefficient increases after installation intensifiers 1.7 ... 2 times with increasing pressure losses 1.62 ... 1.9 times compared to the version without intensifying heat exchange with boiler efficiency increased by 5%.*

**Keywords:** hot water boiler, intensification of heat transfer, heat transfer coefficient, pressure loss.

**Bodnar Lilia** – Ph.D, associate professor of power engineering, Vinnitsia National Technical University.

**Lepetan Ivan** – a student of the Vinnitsia National Technical University.

**Л. А. Боднар**

**И. В. Лепетан**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ГАЗОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ**

Винницкий национальный технический университет

*В работе проведено исследование эффективности интенсификации теплообмена в газотрубных теплообменнике водогрейного котла, проведен сравнительный анализ зависимостей для расчета интенсивности теплообмена. Исследовано влияние относительного шага закручивания интенсификатора  $s/d$  на коэффициент теплоотдачи со стороны газов и потери давления в газотрубных теплообменнике. На основе численных расчетов предложено зависимость для расчета интенсивности теплообмена в газотрубных части котла. Показано, что конвективный коэффициент теплоотдачи после установки интенсификаторов увеличивается в 1,7 ... 2 раза при росте потерь давления в 1,62 ... 1,9 раза по сравнению с вариантом без интенсификации теплообмена при этом коэффициент полезного действия котла увеличился на 5%.*

**Ключевые слова:** водогрейный котел, интенсификация теплообмена, коэффициент теплоотдачи, потери давления.

**Боднар Лилия Анатольевна** – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики Винницкого национального технического университета.

**Лепетан Иван Васильевич** – студент Винницкого национального технического университета.