

УДК 621.18

Д. В. Степанов, к. т. н. доц.;

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.;

Л. А. Боднар, асп.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКОВАНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ЖАРОТРУБНОМУ ВОДОГРІЙНОМУ КОТЛІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Створено експериментальний стенд для дослідження інтенсифікації теплообміну в жаротрубному елементі водогрійного котла малої потужності. Обґрунтовано доцільність застосування інтенсифікаторів теплообміну в жаротрубному елементі водогрійного котла. Запропоновано вставки оригінальної конструкції та досліджено їх ефективність. Проаналізовано результати експериментів.*

### Вступ. Постановка задачі

Теплообмінні апарати широко застосовуються в енергетиці та інших областях техніки. Зменшення їх маси і габаритів є актуальною проблемою. Перспективним шляхом створення компактних теплообмінних апаратів є інтенсифікація теплообміну в каналах. Досвід створення та експлуатації різних теплообмінних пристроїв показав, що розроблені на даний момент методи інтенсифікації теплообміну забезпечують зниження габаритів і металомісткості цих пристроїв в 1,5...2 рази і більше в порівнянні з аналогічними серійними пристроями за умов однакової теплової потужності і витрат енергії на прокачування теплоносіїв [1].

Відомо багато способів інтенсифікації теплообміну в каналах [2, 3]. Про необхідність інтенсифікації теплообміну в жаротрубних водогрійних котлах малої потужності зазначалось в роботах [4, 5]. На сьогодні з цією метою застосовують перфоровані поверхні, багатошарові конвективні поверхні, оребрення, а також вставки різної конфігурації (пластина, дротова вставка, скручена стрічка). Для інтенсифікації теплообміну в жаротрубних елементах (ЖЕ) водогрійних котлів авторами розроблені вставки оригінальної конструкції [6, 7]. Аналіз літературних джерел вказує на відсутність інформації щодо раціональних методів інтенсифікації теплообміну в умовах ламінарного режиму руху димових газів, тому *метою даної роботи* є виявлення раціональних методів інтенсифікації теплообміну в жаротрубному елементі водогрійного котла малої потужності та визначення їх ефективності.

### Дослідження інтенсифікації теплообміну

Для дослідження інтенсифікації теплообміну в ЖЕ створено експериментальний стенд з реальним водогрійним котлом малої потужності. Обладнання стенду, методика проведення дослідів і показники газоаналізатора під час випробувань описані в роботі [4].

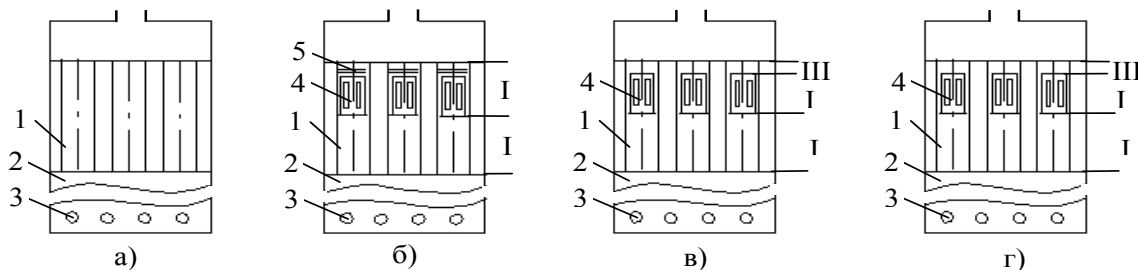


Рис. 1. Схема розташування елементів під час проведення експериментальних досліджень: 1 — жаротрубний елемент; 2 — топка котла; 3 — блок пальників; 4 — вставка оригінальної конструкції; 5 — шайби.

Водогрійний котел потужністю 32 кВт складається з топки, блоку пальників, жаротрубного пучка, димоходу. Жаротрубний пучок набраний з 24 жаротрубних елементів внутрішнім діаметром 41 мм довжиною 410 мм (рис. 1). Для інтенсифікації теплообміну в ЖЕ застосовані вставки оригіна-

льної конструкції [7]. Авторами рекомендується встановлювати вставки у верхній або середній частині жаротрубного елемента в області низьких теплових потоків. Висота топки для дослідів (рис. 1а, б, в) складає 235 мм, а для досліду рис. 1г — 254 мм.

На основі показників газоаналізатора, проведені детальні теплотехнічні розрахунки котла з метою виявлення ефекту інтенсифікації теплообміну в ЖЕ з використанням вставок. Розрахунок теплообміну в елементах котла виконано на основі залежностей з нормативного методу (НМ) теплового розрахунку котлоагрегатів [8] в середовищі Microsoft Excel.

Таблиця 1

Основні результати експерименту та розрахунку котла

Назва величини	Розмірність	Номер досліду					
		1 (рис. 1а)	2 (рис. 1б)		3 (рис. 1в)	4 (рис. 1г)	
			а	б		а	б
Експериментальна температура відхідних газів	°С	366	93	91	158	171	188
ККД котла	%	65,5	94,2	94,25	90,08	89,2	88,28
Експериментальна теплова потужність пального	кВт	37,57	37,52	37,52	37,52	38	38
Теплова потужність котла	кВт	24,6	35,3	35,4	33,8	33,91	33,56
Коефіцієнт зайвину повітря в топці		2,41	1,54	1,56	1,55	1,56	1,53
Розрахункова температура димових газів на виході з топки	°С	534	453	457	454	492	485,6
Розрахункова потужність топки	кВт	18,3	26,6	26,4	26,5	25,8	26,2

Порівняння результатів досліду 1 з розрахунками показали недостатню відповідність нормативного методу теплових розрахунків котлоагрегатів умовам роботи котла. Для оцінки отриманих результатів була введена відповідна поправка.

Досліди із встановленням в ЖЕ вставки із щілинами та двома шайбами 2а і 2б (табл. 1) показали високу ефективність інтенсифікаторів оригінальної конструкції, оскільки температура відхідних димових газів зменшується до 91...93 °С, збільшуючи при цьому потужність котла з 24,6 кВт до 35,3...35,4 кВт, а ККД котла — з 65,5 % до 94,2...94,25 %.

Початковими даними для розрахунку тепловіддачі в ЖЕ є розрахована температура димових газів на виході з топки, витрата та експериментальне значення температури димових газів на виході з котла. Для досліду 2 (рис. 1б) під час розрахунку довжина ЖЕ розбивається на дві ділянки: I — ділянка без інтенсифікації теплообміну довжиною  $L_1 = 0,26$  м; II — з інтенсифікацією (вставка і дві шайби)  $L_2 = 0,15$  м. Для дослідів 3 і 4 (рис. 1в і 1г) ЖЕ розбиваємо на 3 ділянки: I, III — без інтенсифікації теплообміну  $L_1 = 0,26$  м,  $L_3 = 0,05$  м; II — із вставкою  $L_2 = 0,1$  м.

Для ділянок I і III коефіцієнти тепловіддачі від газів до стінки  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  визначаються за відомими залежностями [9]. А середні значення коефіцієнтів тепловіддачі на ділянці із інтенсифікацією  $\alpha_2$  за тепловим балансом

$$\bar{\alpha}F_{\Sigma}\Delta\bar{t} = \alpha_1F_1\Delta\bar{t}_1 + \alpha_2F_2\Delta\bar{t}_2 + \alpha_3F_3\Delta\bar{t}_3, \quad (1)$$

де  $\bar{\alpha}$  — середнє значення коефіцієнта тепловіддачі по довжині ЖЕ;  $F_{\Sigma}$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  — відповідні значення площі поверхні ЖЕ в цілому, та ділянок ЖЕ;  $\Delta\bar{t}$ ,  $\Delta\bar{t}_1$ ,  $\Delta\bar{t}_2$ ,  $\Delta\bar{t}_3$  — відповідні значення температурного напору по довжині ЖЕ та на його ділянках.

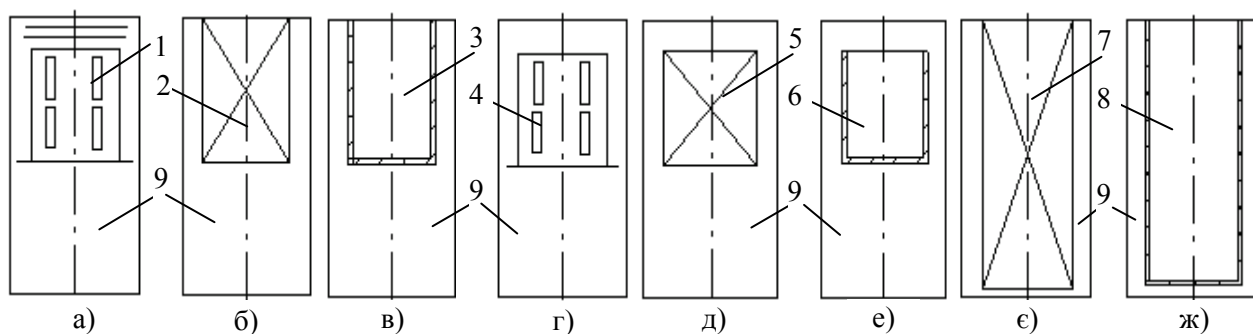


Рис. 2. Варіанти інтенсифікації теплообміну в ЖЕ: 1 — вставка оригінальної конструкції з двома шайбами довжиною  $L=0,15$  м; 2 — пластина  $L=0,15$  м; 3 — циліндрична вставка  $L=0,15$  м; 4 — вставка оригінальної конструкції без шайб  $L=0,1$  м; 5 — пластина  $L=0,1$  м; 6 — циліндрична вставка  $L=0,1$  м; 7 — пластина  $L=0,4$  м; 8 — циліндрична вставка  $L=0,4$  м; 9 — жаротрубний елемент  $L=0,41$  м

На рис. 2 показані схеми встановлення інтенсифікаторів, для яких проведені розрахунки коефіцієнтів тепловіддачі від газів до стінки. Для схем на рис. 2а, 2г — за експериментальними даними, для інших схем — числові експерименти, причому коефіцієнти тепловіддачі для ділянок інтенсифікації останніх схем проведені за відомими залежностями [9].

Результати розрахунків (табл. 2) показали, що найбільші коефіцієнт тепловіддачі отримані в районі інтенсифікатора оригінальної конструкції в діапазоні 98...103 Вт/(м<sup>2</sup>К).

Таблиця 2

Значення розрахункових та експериментальних даних тепловіддачі на ділянках жаротрубного елемента

Варіанти інтенсифікації	Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м <sup>2</sup> К)	Номер досліду					
		1 (рис. 1а)	2 (рис. 1б)		3 (рис. 1в)	4 (рис. 1г)	
			а	б		а	б
1. Вставка оригінальної конструкції (рис. 2а, г)	$\alpha_1$		12,6	12,7	12,8	13,28	13,22
	$\alpha_2$		97,8	103,4	81,76	71,12	62,11
	$\alpha_3$				16,83	17,3	17,76
	$\bar{\alpha}$	13,05*	44,5	46,2	30,72	28,37	25,7
	$\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\text{дослід}}_1$	<b>1</b>	<b>3,41</b>	<b>3,56</b>	<b>2,35</b>	<b>2,17</b>	<b>1,97</b>
2. Пластина (рис. 2б, д)	$\alpha_1$		12,58	12,68	12,8	13,28	13,2
	$\alpha_2$		22,06	22,3	26,2	26,72	26,82
	$\alpha_3$				19,11	19,43	19,03
	$\bar{\alpha}$	13,05*	16,37	16,28	17,13	17,7	19,2
	$\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\text{дослід}}_1$	<b>1</b>	<b>1,25</b>	<b>1,247</b>	<b>1,31</b>	<b>1,35</b>	<b>1,47</b>
3. Циліндрична вставка (рис. 2в, е)	$\alpha_1$		12,58	12,68	12,8	13,28	13,2
	$\alpha_2$		41,71	41,99	50,24	51,1	51,26
	$\alpha_3$				17,95	18,1	18,15
	$\bar{\alpha}$	13,05*	23,55	23,57	22,97	23,81	23,56
	$\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\text{дослід}}_1$	<b>1</b>	<b>1,8</b>	<b>1,806</b>	<b>1,76</b>	<b>1,82</b>	<b>1,805</b>
4. Пластина на всю довжину ЖЕ (рис. 2е)	$\bar{\alpha}$	13,05*	18,86	19	19,5	20,03	20,11
	$\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\text{дослід}}_1$	<b>1</b>	<b>1,44</b>	<b>1,45</b>	<b>1,49</b>	<b>1,53</b>	<b>1,54</b>
5. Циліндрична вставка на всю довжину ЖЕ (рис. 2ж)	$\bar{\alpha}$	13,05*	40,7	40,77	43,03	43,91	45
	$\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{\text{дослід}}_1$	<b>1</b>	<b>3,1</b>	<b>3,12</b>	<b>3,29</b>	<b>3,36</b>	<b>3,45</b>

Примітка: 13,05\* — експериментальне значення коефіцієнта тепловіддачі для ЖЕ без вставки (рис. 1а).

Авторами визначена металомісткість інтенсифікаторів. Виявлено, що маса вставок оригінальної конструкції складає 6...15 % від маси жаротрубного пучка, а для циліндричних вставок — до 37 %.

## Висновки

На основі фізичних та числових експериментів отримані експериментальні та розрахункові значення основних показників водогрійного котла малої потужності з використанням інтенсифікації теплообміну в жаротрубних елементах котла. З метою інтенсифікації теплообміну використані вставки оригінальної конструкції з різними способами організації теплообміну. Використання таких вставок суттєво знижує температуру газів на виході з котла, збільшуючи при цьому ККД котла на 5...16 %. Значний коефіцієнт тепловіддачі (98...103 Вт/(м<sup>2</sup>К)) в районі вставки, на думку авторів, пов'язаний з ефектом закручування потоку, внаслідок струменевого витікання димових газів із прямокутних щілин на вставці. Інші інтенсифікатори теплообміну (пластина, циліндрична вставка) дають збільшення коефіцієнта тепловіддачі в порівнянні з ЖЕ без інтенсифікатора в 1,5...2 рази. Використання інтенсифікаторів теплообміну в ЖЕ котла дозволяє збільшувати потужність котла на 29 — 43 % зі збільшенням маси жаротрубного елемента на 6...37 %.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дрейцер Г. А. Проблемы создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. — 2006. — № 4, С. 31—38.
2. Коваленко Л. М., Глушков А. Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 238с.
3. Калинин Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1990. — 206 с.
4. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й., Боднар Л. А. Експериментальні дослідження теплообміну в жаротрубному водогрійному котлі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — № 1. — С. 23—28.
5. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й., Боднар Л. А. Математичне моделювання теплообмінних процесів у жаротрубному елементі водогрійного котла малої потужності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 76 — 79.
6. Пат. № 21404, F28F1/10 Україна. Вставка для теплообмінної труби / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А. — Опубл. 15.03.2007, Бюл. №3.
7. Пат. № 19637, F28F1/00, Україна. Вставка для теплообмінної труби / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А. — Опубл. 15.12.2006, Бюл. №12.
8. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод). — СПб: НПО ЦКТИ, 1998. — 256 с.
9. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — Энергоиздат, 1981. — 412 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 18.03.08  
Рекомендована до друку 02.04.08

**Степанов Дмитро Вікторович** — доцент, **Ткаченко Станіслав Йосипович** — завідувач кафедри, **Боднар Лілія Анатоліївна** — аспірантка.

Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет