

УДК 536.24

Л. А. Боднар, к. т. н., доц.; Д. В. Степанов, к. т. н., доц.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ТА АЕРОДИНАМІКИ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ

У роботі оцінено інтенсифікацію теплообміну та збільшення втрат тиску в разі застосування в круглому каналі газо-водяного теплообмінника турбулізуючих вставок із круглими та прямокутними отворами. Проведено експериментальні дослідження, запропоновано залежності для розрахунку інтенсифікованого теплообміну.

Ключові слова: інтенсифікація, втрати тиску, критерій Нуссельта, тепловіддача.

Вступ

Системи з мікроструменевими елементами (імпактними струменями) досить ефективні для систем охолодження. Струменевий обдув забезпечує за оптимальних умов зростання інтенсивності теплообміну в 3 – 5 разів порівняно з повздовжнім обтіканням поверхні за відносно невеликих затрат потужності. Ці системи використовують для охолодження деталей газових турбін, а також в інших галузях техніки. Дослідження структури потоку в таких системах засвідчили існування парновихревих структур, які генеруються в шарах змішування струменя у вигляді вихорових шнурів і далі руйнуються внаслідок своєї нестабільності, приймаючи синусоподібну форму. Усе це сприяє інтенсифікації теплообміну, як показано в роботах Дибана Є. П. [1].

Актуальним є питання про застосування такого методу для конструювання різних теплообмінних елементів, зокрема для інтенсифікації теплообміну в теплообмінниках водогрійних котлів малої потужності на природному газі чи біогазі.

Метою цієї роботи є експериментальні дослідження ефективності оригінальних способів інтенсифікації теплообміну – вставок із прямокутними щілинами та круглими отворами.

Результати досліджень

Авторами перевірено ефективність запатентованих ними вставок оригінальної конструкції [2]. Проведено дві серії експериментів по дослідженню ефективності вставок з круглими отворами та прямокутними щілинами (рис. 1).

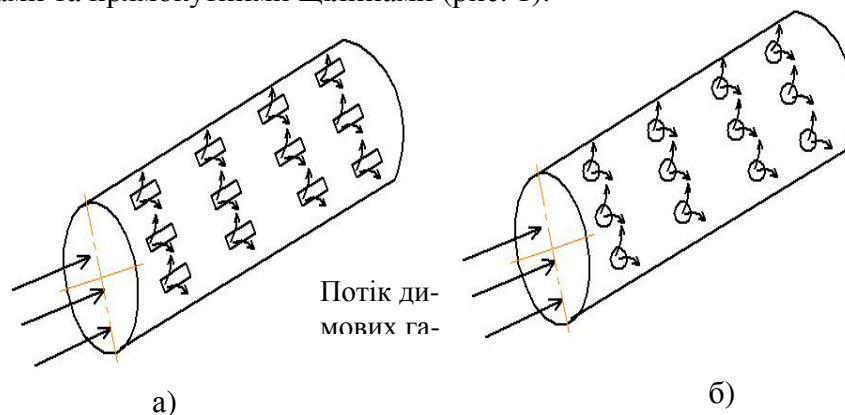


Рис. 1. Інтенсифікатори теплообміну з: а) прямокутними щілинами та б) круглими отворами

Експериментальний стенд

Установка, принципова схема якої зображена на рис. 2, складається з таких основних частин: повітропідігрівника і теплообмінного елемента. Повітря вентилятором 1 подають у повітропідігрівник, який складається з камери нагріву повітря 2 та електричного нагрівника 3. Напругу на нагрівник подають і регулюють через блок живлення ЛІПС-68, навантаження контролюють лабораторним амперметром Э59 і вольтметром Щ4313. Витрату повітря регулюють шаровим краном 5, який встановлено перед повітропідігрівником, і вимірюють ротаметрами РМ4 і РМ04. Нагріте в повітропідігрівнику до потрібної температури повітря повітропроводом 6, який виготовлений із труби $\text{du}32$, подають у теплообмінний елемент, який складається з вертикального круглого каналу 7 внутрішнім діаметром 42 мм, по якому рухається повітря, і водяної сорочки 8 з еквівалентним діаметром для проходу води 11 мм. У вертикальний канал 7 закріплюють інтенсифікатори теплообміну 15. Холодну воду у водяну сорочку подають через нижній штуцер 9 з мережі, потім вона, нагріваючись, виходить через верхній штуцер 10. Витрату мережної води регулюють краном 11 і вимірюють за допомогою мірного бака. Температуру повітря на вході і виході з теплообмінного елемента вимірюють термометрами 12 із ціною поділки $0,1^\circ\text{C}$, які встановлені до й після теплообмінного елемента. Втрати тиску повітря в теплообмінному елементі вимірюють за допомогою мікроманометра 13 типу ММН з діапазоном вимірювання $5 \dots 1960 \text{ Па}$. Для зменшення падіння температури повітря в повітропроводах через втрати теплоти в навколишнє середовище вони вкриті шаром ізоляції 16 товщиною 9 мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,038 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

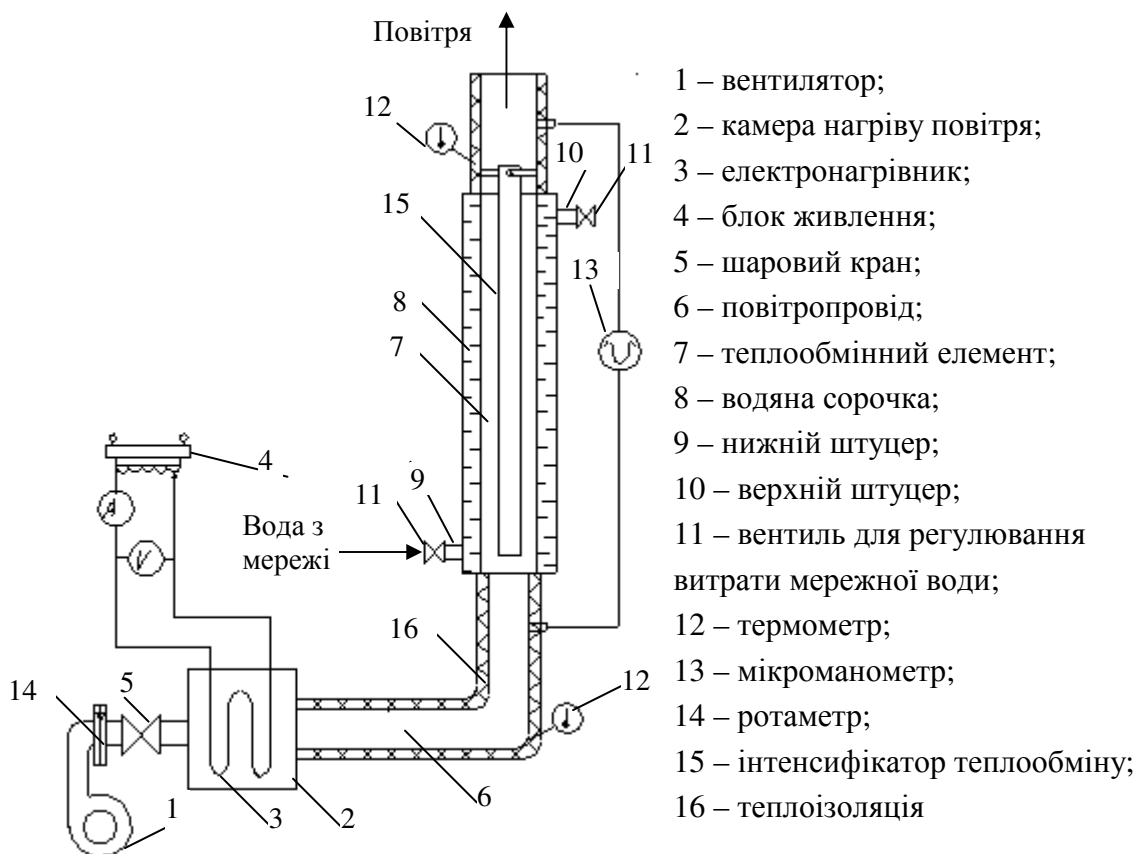


Рис. 2. Схема дослідної установки

Досліди проводили в такому діапазоні зміни параметрів: температурний напір $22,8 \dots 80^\circ\text{C}$; витрата повітря $0,26 \dots 12 \text{ м}^3/\text{год}$; витрата мережної води $0,02 \dots 0,16 \text{ кг/с}$; температура

повітря на вході 75 – 135 °С; температура повітря на виході 16 – 67 °С; число Рейнольдса $Re = 300 – 5500$.

Проведено дві серії експериментів із дослідження ефективності вставок з круглими отворами та прямокутними щілинами (рис. 3, рис. 4). Вставки встановлено у верхній ділянці теплообмінної труби. Співвідношення довжини вставки з прямокутними щілинами до довжини труби складає $L_{вст}/L_{тр}=0,4$; для вставки з круглими отворами цей показник становить $L_{вст}/L_{тр}=0,59$.

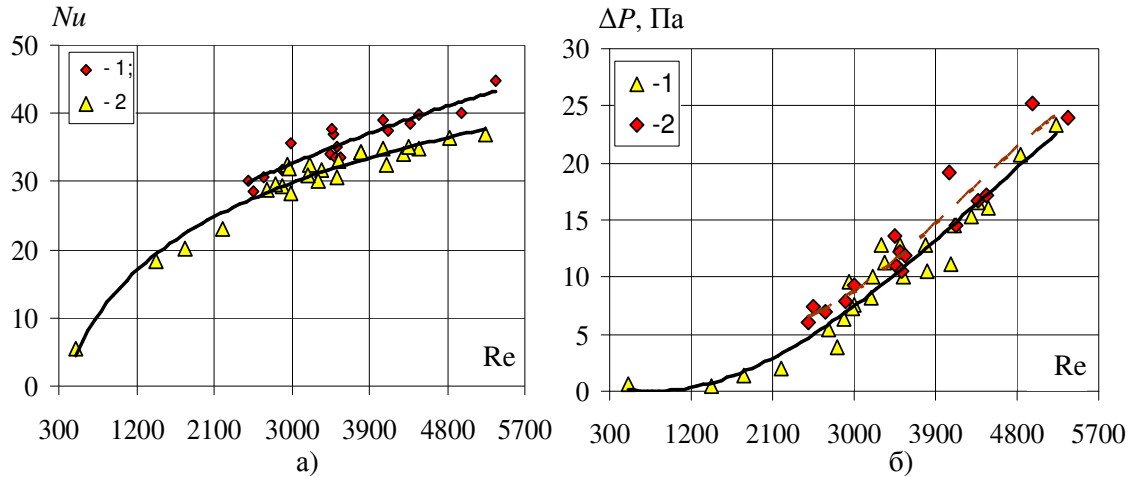


Рис. 3. Залежність критерію Нуссельта (а) та втрат тиску в теплообмінному елементі (б) від критерію Рейнольдса для вставок з круглими отворами:
1 – $d = 8$ мм; 2 – $d = 9$ мм

Кількість круглих отворів в експериментах становить 24. Вставки з меншим діаметром отворів $d = 8$ мм ефективніші з погляду теплообміну (див. рис. 3). З збільшення площі перерізу отворів в 1,27 раза (з $d = 8$ мм до $d = 9$ мм) втрати тиску зменшилися в 1,07 – 1,2 раза, а значення критерію Nu – в 1,09 – 1,18 раза.

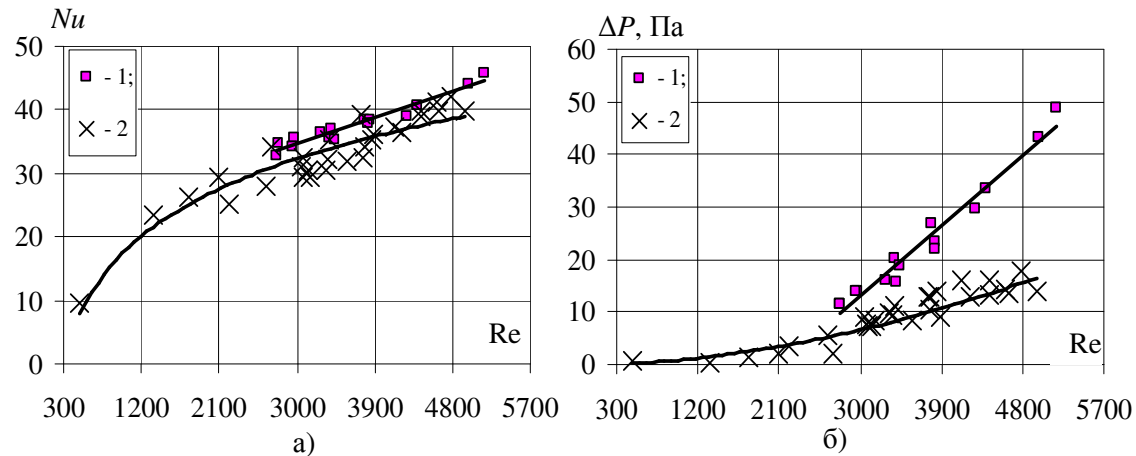


Рис. 4. Залежність критерію Нуссельта (а) та втрат тиску в теплообмінному елементі (б) від критерію Рейнольдса для вставок з прямокутними щілинами:
1 – $s \times h = 1 \times 37$ мм; 2 – $s \times h = 2 \times 50$ мм

Вставки з прямокутними щілинами мають такі параметри: у верхній і нижній частині розміщено по 4 прямокутні щілини розмірами 1×37 мм загальною площею поверхні $2,98 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, у другій серії експериментів розміри щілин збільшили до 2×50 мм. У другій серії дослідів критерій Нуссельта зменшився в 1,04 – 1,12 раза, а втрати тиску – у 2 – 2,6 рази (див. рис. 4).

На рис. 5 представлені ефект інтенсифікації теплообміну та підвищення опору для труб із вставкою з прямокутними щілинами 2×50 мм та вставкою із отворами $d = 9$ мм порівняно із гладкою трубою.

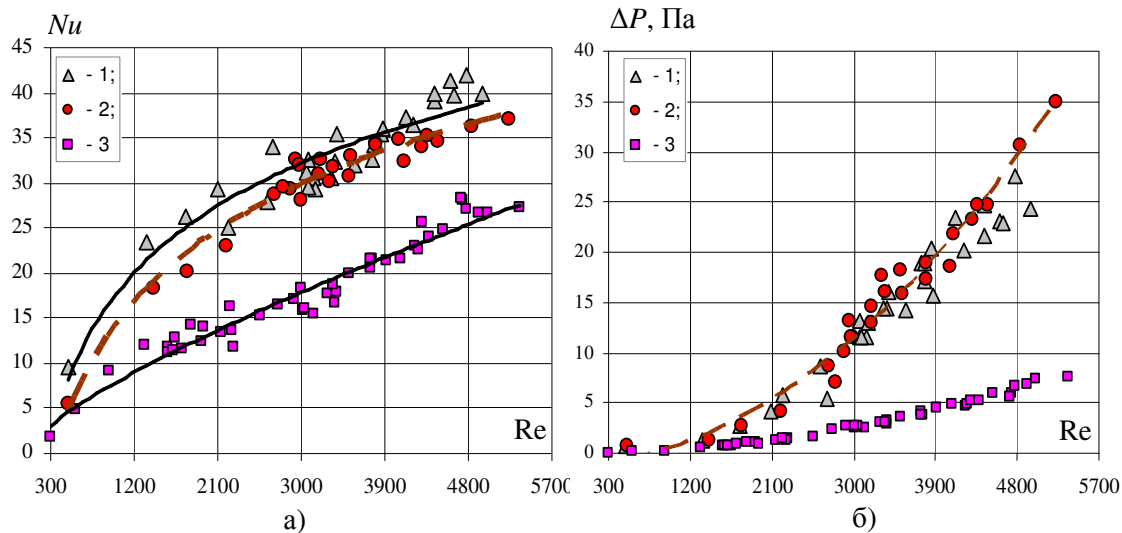


Рис. 5. Інтенсивність теплообміну (а) та втрати тиску (б) для гладкої труби та труби із інтенсифікатором залежно від числа Рейнольдса: 1 – труба із вставкою зі щілинами 2×50 мм; 2 – із вставкою з отворами $d = 9$ мм; 3 – гладка труба

Як видно з рис. 5, вставки із щілинами 2×50 мм і отворами $d = 9$ мм забезпечують майже однакову інтенсифікацію теплообміну. У ламінарному режимі вставки зі щілинами збільшують тепловіддачу порівняно із гладкою трубою в 1,98 – 2,11 рази за збільшення опору у 2,77 – 6,7 разів, а в перехідному режимі збільшення інтенсивності тепловіддачі в 1,49 – 2,11 за збільшення опору в 3,26 – 3,8 рази відповідно.

Для вставок з отворами збільшення числа Нуссельта в ламінарній області порівняно з гладкою трубою становить 1,12 – 1,685 рази за збільшення опору в 2,77 – 7,8, а для перехідного режиму збільшення інтенсивності тепловіддачі складає 1,37 – 1,685 рази за збільшення опору у 2,77 – 4,57 рази відповідно.

Експериментальні дані дослідження ефективності вставки оригінальної конструкції з круглими отворами описують емпіричною залежністю з коефіцієнтом детермінації $R = 0,92$

$$Nu = 0,407 \cdot Re^{0,56} \cdot Pr^{0,43} . \quad (1)$$

Для вставок з прямокутними щілинами з коефіцієнтом детермінації $R = 0,93$ отримано залежність

$$Nu = 0,586 \cdot Re^{0,52} \cdot Pr^{0,43} . \quad (2)$$

Визначальним розміром у залежностях (1) – (2) є діаметр труби, визначальною температурою – середня температура потоку, визначальною швидкістю – середня швидкість потоку без урахування загромождження інтенсифікатором.

Отже, застосування вставок із круглими отворами та прямокутними щілинами є ефективним способом інтенсифікації теплообміну. Ефект можна пояснити струменевим витіканням повітря з отворів (щілин), що спричиняє інтенсивну турбулізацію потоку в прикордонному шарі «повітря – стінка» теплообмінника.

У високотемпературних теплообмінниках тепловідбір збільшиться ще й за рахунок випромінювання від вставок. Їх застосування є доцільним у водогрійних котлах малої потужності, особливо з вимушеною тягою.

Висновки

Дослідження інтенсифікації тепловіддачі на моделях теплообмінників дозволяє отримати з невеликими матеріальними витратами надійні вихідні дані для розробки більш ефективних конструкцій теплообмінних апаратів. У роботі досліджено теплогідродинамічну ефектив-

ність інтенсифікаторів теплообміну в ламінарному і перехідному режимах руху теплоносія, що характерно для жаротрубних водогрійних котлів малої потужності (до 100 кВт). Вставки з прямокутними щілинами та круглими отворами ефективно інтенсифікують теплообмін під час значного зростання гідравлічного опору. У ламінарному режимі вставки із щілинами збільшують тепловіддачу порівняно із гладкою трубою в 1,98 – 2,11 рази за збільшення опору у 2,77 – 6,7 рази, а в перехідному режимі збільшення інтенсивності тепловіддачі в 1,49 – 2,11 за збільшення опору в 3,26 – 3,8 рази відповідно. Для вставок з отворами збільшення числа Нуссельта в ламінарній області порівняно з гладкою трубою становить 1,12 – 1,685 рази за збільшення опору у 2,77 – 7,8, а для перехідного режиму збільшення інтенсивності тепловіддачі складає 1,37 – 1,685 рази за збільшення опору в 2,77 – 4,57 рази відповідно, тому застосування таких вставок можливе в котлах із вимушеною тягою. Застосовуючи такі вставки у високотемпературних теплообмінниках (жаротрубних котлах із вимушеною тягою), можна очікувати збільшення тепловіддачі за рахунок випромінювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дыбан Е. П. Теплообмен при взаимодействии системы струй с перфорированной поверхностью / Е. П. Дыбан, А. И. Мазур // Промышленная теплотехника. – 1991. – Т. 13, № 1. – С. 3 – 9.
2. Пат. 21404 України, МПК⁷ F 28 F 1/10. Вставка для теплообмінної труби / Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200610176 ; заявл. 25.09.06 ; опубл. 15.03.2007, Бюл. №3.
3. Коваленко Л. М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л. М. Коваленко, А. Ф. Глушков. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 238 с.
4. Долинский А. А. Теплообмен и гидродинамика при конфузorno – диффузornoм течении воздуха в плоском щелевом канале / Ю. Е. Дыбан, А. А. Долинский // Промышленная теплотехника. – 1991. – Т. 13, № 3. – С. 33 – 40.

Боднар Лілія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, тел.598339, Vodnar06@ukr.net.

Степанов Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, тел.598339, StepanovDV@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.