

УДК 536.24

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТА З ШАХОВИМ ТА КОМПАКТНИМ РОЗТАШУВАННЯМ ТРУБ В ТРУБНОМУ ПУЧКУ

Троханяк В.І., аспірант<sup>\*</sup>,

Горобець В.Г., д.т.н.

*Національний університет біоресурсів і природокористування  
України*

Тел. (044) 527-80-97

**Анотація** – запропоновано та розроблено нову конструкцію кожухотрубного теплообмінного апарата з компактним розташуванням труб у трубних пучках. Виконано моделювання процесів тепло- і масопереносу в каналах теплообмінника з шаховим та компактним розміщенням пучків труб. В статті проведено порівняння місцевого коефіцієнта тепловіддачі на поверхні труб в трубних пучках різної конструкції використовуючи пакет прикладних програм ANSYS Fluent. Здійснено порівняльний аналіз масогабаритних характеристик запропонованої і відомої конструкцій теплообмінників.

**Ключові слова** – математичне моделювання, процеси тепло- і масопереносу, місцевий коефіцієнт тепловіддачі, компактне розміщення труб.

*Постановка проблеми.* В літературі розглянуто багато робіт із визначенням коефіцієнта тепловіддачі. Однак недостатньо робіт, де вивчалось комп'ютерне математичне моделювання трубного пучка з компактним розміщенням при перехресному току теплоносіїв та виведення місцевого коефіцієнта тепловіддачі по периметру труби для нових конструкцій використовуючи математичне моделювання процесів переносу теплоти і маси в цих конструкціях.

*Аналіз останніх досліджень.* Важливу роль в енергетичному устаткуванні відіграють теплообмінні апарати різного призначення. Для кожухотрубних теплообмінників тепловіддача пучків труб в значній мірі залежить від умов обтікання. Для труб, що знаходяться у першому ряду пучка, умови обтікання відрізняються від умов обтікання для одиночної труби, що обумовлено наявністю інших труб в ряду, а також впливом труб наступного (другого) ряду. Тому тепло-

віддача труби в першому ряду дещо відрізняється від тепловіддачі одиночної труби. У глибинному ряду пучка труби омиваються потоком з підвищеним ступенем турбулентності, що призводить до збільшення тепловіддачі. Важливу роль при вивченні фізичного механізму тепловіддачі в системах пучків труб при поперечному їх обтіканню відіграють роботи, присвячені дослідженню місцевої тепловіддачі по периметру окремих труб в пучку.

Одну з перших методик по визначенні місцевої тепловіддачі на поверхні одиночного циліндра запропонували Г. Н. Кружиліном і В. А. Швабом в роботі [1]. Михайловим Г. А. в роботі [2] детально вивчено зміну тепловіддачі по периметру труб в пучку в умовах поперечного обтікання труб повітряним потоком. Експериментальні дослідження тепловіддачі пучків труб при шаховому їх розташуванні показали, що розподіл локальних значень коефіцієнта теплообміну по периметру труб, які знаходяться в глибинних рядах, цілком ідентичний розподілу цих значень для одиночної труби з максимумом тепловіддачі в лобовій точці. В той же час при обтіканні коридорних пучків труб в між трубному просторі спостерігається зони із слабкою циркуляцією теплоносія, як наслідок, інтенсивність тепловіддачі в лобовій і кормовій частинах труб незначна. Знайдено, що для коридорних пучків, на відміну від шахових, найвищі значення локального теплообміну спостерігається при кутах близьких до  $50^\circ$  починаючи з лобової точки.

При конструюванні кожухотрубних теплообмінників традиційними є шахове або коридорне розташування труб в трубному пучку. Перші експериментальні дослідження показали, що більш ефективним, з точки зору інтенсивності тепловіддачі пучків труб, є їх шахове розташування порівняно з коридорним.

Дана робота представляє результати комп'ютерного математичного моделювання процесів тепло- і масообміну в пучках труб з шаховим розташуванням [3], крок яких становить  $1,5 \times 1,5$  ( $s_1/d_s \times s_2/d_s$ ) та нових конструкцій з компактним розташуванням труб в пучках [4] за допомогою ANSYS Fluent. Дано рекомендації по методиці розрахунку локальних значень місцевого коефіцієнта тепловіддачі на поверхні труб в трубних пучках досліджуваних конструкцій.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Розробка нових конструкцій кожухотрубних теплообмінників з компактним розміщенням пучків гладких труб при поперечному їх обтіканні теплоносіями та чисельне моделювання процесів тепло- і масопереносу в каналах теплообмінника таких конструкцій. Для визначення місцевого коефіцієнта теплообміну на поверхнях труб трубного пучка використано пакет прикладних програм ANSYS Fluent.

*Основні матеріали досліджень.* Розглянемо кожухотрубний теплообмінник із кожухом прямокутного перерізу, в якому розміщено пучки труб компактної конфігурації при поперечному їх обтіканні (рис. 1). У теплообмінному апараті застосовано таке розташування труб, при якому сусідні трубки дотикаються між собою та зміщені одна відносно одної по осі ординат на відстань  $K$ , де  $0 < K < \sqrt{3}D/2$ , а відстань  $C$  відповідає умові  $C \geq D + 5 \text{ мм}$ , що обумовлено тим фактом, що технологія виготовлення пучків значно ускладнюється при відстанях між трубами менше 5 мм.

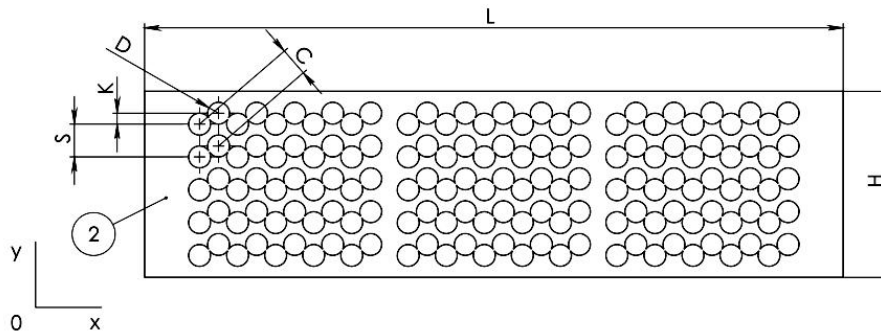


Рис. 1. Трубна дошка з компактним розташуванням труб (вигляд зверху)

Проведено чисельне моделювання процесів тепло- і масопереносу в каналах теплообмінника компактної конфігурації, використовуючи пакет прикладних програм САПР ANSYS Fluent.

В основі математичної моделі лежать рівняння Нав'є-Стокса та рівняння конвективного переносу енергії. У розглянутому випадку вибрано стандартну  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності (KES).

Масова витрата повітря на вході в теплообмінний апарат становить 1,25 кг/с з початковою температурою  $T_{\text{Inlet}} = 40^\circ\text{C}$ . Висота труб – 1 м, їх зовнішній діаметр  $d_3 = 10$  мм. Товщина стінки 1 мм. Температура на внутрішній поверхні труб в першій секції починаючи від входу трубного пучка  $11,46^\circ\text{C}$ , другої та третьої секції  $10,88^\circ\text{C}$  і  $10,3^\circ\text{C}$  відповідно. Загальна кількість труб у теплообміннику становить 150 шт. Моделювання проведено як для шахового, так і для компактного розташування труб у трубному пучку теплообмінного апарата з однаковими граничними умовами для двох різних конструкцій.

Із результатів чисельних розрахунків отримано локальні розподіли коефіцієнта тепловіддачі для шахового розташування труб (див. рис. 2).

На рис. 2 показано особливості зміни локальних розподілів по периметру труб для шахового пучка в першому, другому та глибинних рядах. Як видно з рисунка, характер розподілу локальних значень коефіцієнта теплообміну для труб першого ряду практично аналогіч-

ний характеру теплообміну для одиночної труби. На лобовій частині труб другого ряду, внаслідок натікання потоку теплоносія і впливу підвищеної турбулентності потоку, інтенсивність теплообміну вища, ніж для труб першого ряду. При протіканні теплоносія через два перші ряди труб потік турбулізується, що знаходить своє відображення на характері теплообмінних процесів. Інтенсивність теплообміну по периметру труб третього ряду є більшою порівняно з теплообміном на поверхні труб другого ряду. В наступних рядах пучка теплообмін стабілізується і практично співпадає з теплообміном для труб третього ряду. Максимальне значення коефіцієнта теплообміну в лобовій точці труб третього ряду становить  $535,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С}$ .

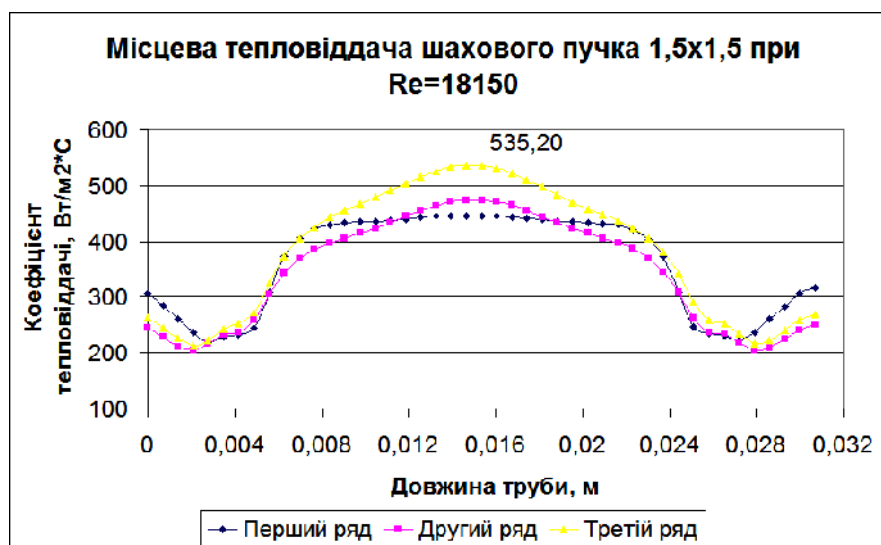


Рис. 2. Місцева тепловіддача шахового пучка  $1,5 \times 1,5$  при  $Re=18150$

Відрив межового шару залежить від величини числа  $Re$ . Для труб першого ряду відрив відбувається при куті близькому до  $\varphi \approx 120^\circ$ , а для другого та глибинних рядів він лежить в межах  $\varphi \approx 140-150^\circ$ .

Розподіл місцевого коефіцієнта теплообміну по периметру труби відображає характер гідродинамічної течії в межовому шарі на поверхні труби. Аналізуючи закономірності цього розподілу можна отримати найбільш оптимальні геометричні розміри розташування труб у пучку та отримати для них узагальнюючі залежності для розрахунку місцевого коефіцієнта теплообміну.

Місцева тепловіддача труби в пучку має ті ж закономірності, що й місцевий теплообмін для одиночної труби. Розподіл локального коефіцієнта теплообміну по поверхні труб визначається особливостями обтікання труб у цьому пучку, які багато в чому залежать від характеру його конфігурації. Початкова і кінцева розрахункова точка по периметру труби, де розраховувались локальні значення коефіцієнту тепловіддачі наведені на рис. 3.

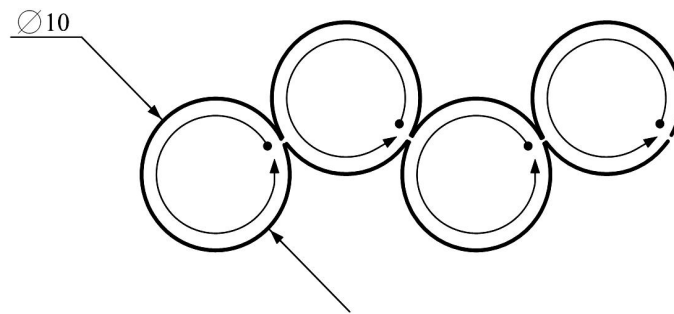


Рис. 3. Початкова і кінцева розрахункова точка по периметру труби пучка

На рис. 4 розглянуто особливості розподілу місцевого коефіцієнта тепловіддачі по поверхні труб, що знаходяться в першому, другому і глибинному рядах пучка труб з компактним розташуванням.

Аналіз отриманих графічних залежностей показує (рис. 4), що максимальні значення коефіцієнта тепловіддачі спостерігаються на трубах другого та третього рядів, причому їх значення становлять близько  $920 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ . Характерно, що локальні максимуми на поверхні цих труб спостерігаються при куті  $\varphi=150^\circ$ , що відображає той факт, що максимальні значення швидкості потоку теплоносія мають місце на поверхні бокової частини труб і обумовлені складною гідродинамічною картиною потоку повітря в цих областях. Для ділянок поверхні труби, які знаходяться за локальними максимумами спостерігається зменшення коефіцієнтів тепловіддачі, що викликано ростом товщини межового шару.

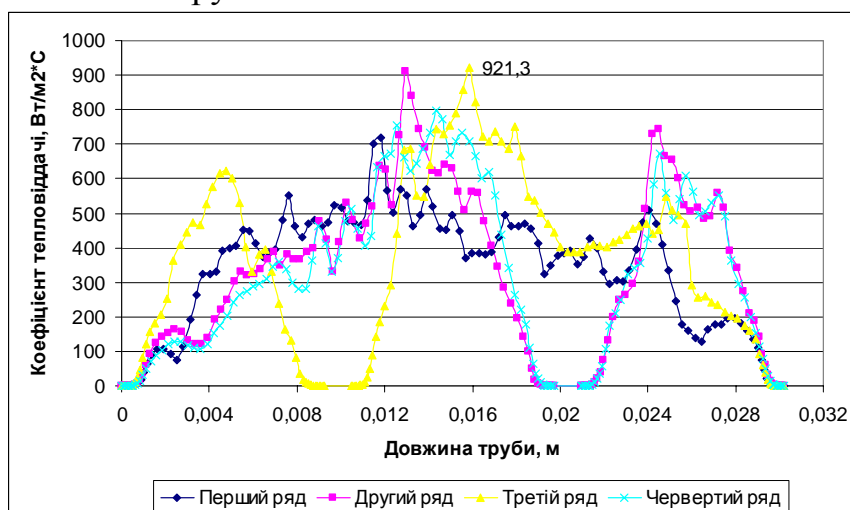


Рис. 4. Розподіл місцевих значень коефіцієнта тепловіддачі по периметру труб компактного пучка при  $Re=18150$

Як витікає з рисунка характер тепловіддачі труб в цих рядах відрізняється від характеру тепловіддачі для труб першого ряду. Відмінності є і в локальних значеннях коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  в лобо-

вій точці труб першого ряду, де величина  $\alpha$  не перевищує  $720 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ . Отриманий складний розподіл локальних значень коефіцієнта тепловіддачі для труб першого і наступних рядів викликаний складною гідродинамічного потоку в міжтрубних каналах.

Для першого і третього рядів труб для областей при  $\varphi \approx 290^\circ$  спостерігаються локальні максимуми коефіцієнтів тепловіддачі, що викликано наявністю відривних зон у вказаних областях.

Результати порівняння масогабаритних показників для кожухотрубного теплообмінного апарата з шаховим розташуванням (1,5×1,5) та теплообмінника нової конструкції з компактним розташуванням пучків труб, які отримані при чисельному моделюванні наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння масогабаритних показників кожухотрубного теплообмінного апарата з шаховим (1,5×1,5) та компактним розташуванням пучків труб.

Основний параметр теплообмінника	Традиційний теплообмінник	Запропонований теплообмінник
Кількість теплоти переданої від повітря до води, кВт	5,20	5,00
Температура повітря на вході з теплообмінника, $^\circ\text{С}$	40,0	40,0
Температура повітря на виході з теплообмінника, $^\circ\text{С}$	19,3	20,1
Масова витрата повітря, кг/с	0,25	0,25
Коефіцієнт тепловіддачі для повітря, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$	314	306
Перепад тисків на вході та виході теплообмінника, кПа	3,80	7,00
Довжина теплообмінника, м	0,530	0,278
Висота трубного пучка, м	0,20	0,20
Кількість труб, шт	150	150
Маса теплообмінника, кг	16,6	15,2

З таблиці видно, що вхідні параметри теплоносія та потужність теплообмінників практично однакова, а відмінність в значеннях усереднених по поверхні труб коефіцієнтів тепловіддачі для цих конструкцій не перевищує 3%. При цьому габаритні розміри теплообмінника нової конструкції на 48%, а маса 10% менші порівняно з традиційною конструкцією. При цьому величина перепаду тиску на вході і виході, якщо порівнювати обидві конструкції, для запропонованого теплообмінника збільшується на 46%.

*Висновки.* Запропоновано та розроблено нову конструкцію кожухотрубного теплообмінного апарату з компактним розташуванням труб у трубних пучках. Проведено комп'ютерне математичне моделювання процесів тепло- і масопереносу в каналах теплообмінника при компактному та шаховому (1,5×1,5) розміщенні труб із використанням програмного комплексу ANSYS Fluent. Отримано поля швидкостей, температур та тисків у досліджуваних каналах. Знайдено локальні розподіли місцевого коефіцієнта тепловіддачі по периметру труби для трубних пучків різної конструкції.

Проведено порівняльний аналіз масогабаратних характеристик запропонованої і відомої конструкцій теплообмінників при однаковій тепловій потужності та знайдено, що габаритні показники перших знижені на 48%, а маса на 10%.

#### *Література*

1. *Кружилин Г. Н.* Исследование поля на поверхности круглого цилиндра, омываемого поперечным потоком воздуха, в интервале значений критерия Рейнольдса  $21 \cdot 10^3$  / *Г.Н. Кружилин, В.А. Шваб.* – М.: ЖТФ, 1935. – Т. 5, № 4. – С. 707-710.

2. *Михайлов Г. А.* Конвективный теплообмен в пучках труб. Советское котлотурбостроение / *Г. А. Михайлов.* – М., 1939. – №12. – С. 434-437.

3. *Троханяк В.І.* Визначення коефіцієнта тепловіддачі при чисельному моделюванні трубного пучка / *В.І. Троханяк.* – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – Вип. 15. – Т. 2. – С. 332-337.

4. *Горобець В.Г.* Чисельне моделювання процесів переносу при поперечному обтіканні компактних пучків труб у кожухотрубних теплообмінниках / *В.Г. Горобець, В.І. Троханяк.* – Науковий вісник НУБіП України. – К.: ВЦ НУБіП України, 2015. – №209, ч. 1. – С. 42-49.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ШАХМАТНЫМ И КОМПАКТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ТРУБ В ТРУБНОМ ПУЧКЕ**

В.И. Троханяк, В.Г. Горобец

**Аннотация** – предложено и разработано новую конструкцию кожухотрубного теплообменного аппарата с компактным расположением труб в трубных пучках. Выполнено моделирование процессов тепло- и массопереноса в каналах теплообменника с шахматным и компактным размещением пучков труб. В статье

**проведено сравнение местного коэффициента теплоотдачи на поверхности труб в трубных пучках различной конструкции используя пакет прикладных программ ANSYS Fluent. Осуществлен сравнительный анализ массогабаритных характеристик предлагаемой и известной конструкций теплообменников.**

**MATHEMATICAL MODELING OF HEAT-EXCHANGE APPARATUS WITH STAGGERED AND COMPACT ARRANGEMENT OF TUBES IN THE TUBE BUNDLE**

V. Trokhanyak, V. Gorobets

*Summary*

**Proposed and developed a new design of shell and tube heat exchanger with a compact arrangement of tubes in tube bundles. Modeling of heat and mass transfer in the channels of the heat exchanger with staggered and compact placement of tube bundles. The article compared the local heat transfer coefficient on the surface of tubes in tube bundles of various designs using the software package ANSYS Fluent. The comparative analysis of weight and size characteristics of the proposed structures and the known heat exchangers.**