

УДК 536.2

**РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛО- І МАСОПЕРЕНОСУ ДЛЯ
ТЕПЛООБМІННИКІВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО БУДИНКУ**

В. Г. Горобець, доктор технічних наук

М. Ю. Масюк, студент магістратури

e-mail: gorobetsv@ukr.net

Анотація. *Розроблено нову конструкцію кожухотрубного теплообмінника з компактним розміщенням трубного пучка, який використовується в системі вентиляції енергозберігаючого будинку для охолодження та нагрівання зовнішнього повітря водою підземних свердловин. Проведено математичне моделювання процесів масо- і теплопереносу для нової конструкції теплообмінника. У результаті чисельного моделювання гідродинамічних та теплових процесів з використанням програмного продукту САПР ANSYS Fluent 14.0 отримано розподіли швидкостей, тисків та температур у каналах кожухотрубного теплообмінника. Проведено порівняння характеристик теплообмінників нової конструкції та відомих конструкцій.*

Ключові слова: *теплообмінник, математичне моделювання, тепло- і масоперенос, пучок труб*

Одним з напрямків, пов'язаних з енергозбереженням та створенням оптимального мікроклімату в житлових і громадських будівлях, є використання енергії навколишнього середовища для підігрівання та охолодження зовнішнього повітря в системах вентиляції будівель. Для цього можуть бути використані теплові насоси, які використовують низькопотенційну енергію ґрунту або підземних вод [1]. У літній період часу для охолодження, а в зимовий період для нагрівання зовнішнього повітря може бути використана

вода підземних свердловин. Процес охолодження та нагрівання зовнішнього повітря в системах вентиляції будівель водою підземних свердловин відбувається в рекуперативних теплообмінниках. Такий підхід дає змогу не використовувати для охолодження та нагрівання зовнішнього повітря складні і дорогі системи кондиціонування, як правило, виготовлені зарубіжними виробниками, які вимагають для їх функціонування значних витрат електричної енергії.

Рекуперативні теплообмінники кожухотрубного типу, які можуть бути використані для охолодження або нагрівання припливного повітря у вентиляційних системах, у своїх конструкціях використовують пучки труб з шаховим або коридорним їх розташуванням [2-4]. Такі теплообмінні апарати можуть мати великі розміри та масу. Відомі шляхи покращення масогабаритних характеристик кожухотрубних теплообмінників полягають у використанні оребрення різного типу. Проте теплообмінники з розвиненою поверхнею теплообміну мають великий гідравлічний опір і вимагають значних потужностей насосів або вентиляторів для прокачки теплоносіїв. Крім того, собівартість виготовлення оребрених теплообмінників суттєво підвищується порівняно з конструкціями, які виготовлені з гладких труб. У роботі запропоновано нову конструкцію кожухотрубного теплообмінника з компактним розміщенням труб малого діаметра та проведено його математичне моделювання. Запропонована конструкція теплообмінника має переваги порівняно з відомими конструкціями і може бути використана в системах вентиляції енергозберігаючого будинку, що дає змогу суттєво заощадити енергетичні та економічні ресурси при розробці таких систем.

Мета досліджень – розробка нової конструкції кожухотрубного теплообмінника з компактним розміщенням трубних пучків малого діаметру, що використовується для охолодження та нагрівання зовнішнього повітря водою підземних свердловин та проведення математичного моделювання процесів тепло- і масопереносу в каналах теплообмінника.

Матеріали та методика досліджень. Запропоновано нову конструкцію кожухотрубного теплообмінника рекуперативного типу, яка використовується для охолодження і нагрівання зовнішнього теплого повітря водою підземних свердловин. Нова конструкція відрізняється від відомих конструкцій рекуперативних теплообмінників тим, що використовуються пучки труб малого діаметра, які розташовані у вигляді рядів, в яких сусідні труби дотикаються одна до одної та утворюють канали. Це дає змогу покращити габаритні та масові показники теплообмінників порівняно з існуючими аналогами. Схема розташування труб в пучку показана на рис. 1

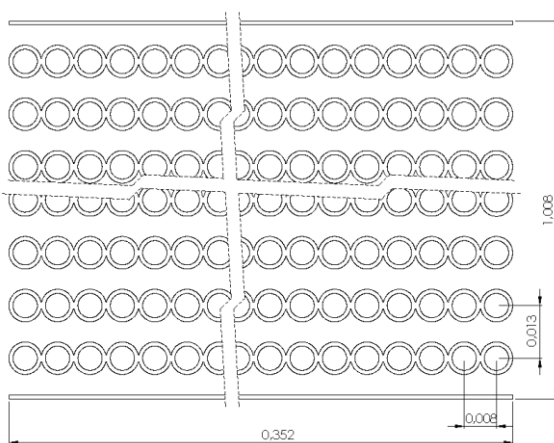


Рис. 1 Схема розміщення трубних пучків з компактним їх розташуванням (вид зверху)

За такого розташування труб у пучку при поперечному їх обтіканні теплоносій у міжтрубному просторі рухається вздовж каналу, а гідравлічний опір при цьому буде суттєво менший порівняно з пучками труб при шаховому або коридорному їх розміщенні.

Розроблено математичну модель процесів, тепло- і масопереносу, що протікають в досліджуваному апараті при двовимірній (2D) постановці. Рівняння конвективного переносу маси і енергії мають вигляд:

рівняння руху і нерозривності

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho w_x}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{ef} \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{ef} \frac{\partial w_x}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial \rho w_y}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho w_y}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{ef} \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{ef} \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho w_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho w_y}{\partial y} = 0;$$

рівняння енергії

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial t}{\partial y} \right). \quad (2)$$

Для моделювання турбулентної течії використовується двохпараметрична диференціальна стандартна $k-\varepsilon$ модель, що складається з двох диференціальних рівнянь переносу кінетичної енергії і швидкості дисипації

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho k}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + c_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \mu_{ef} &= \mu + \mu_t, \lambda_{ef} = \lambda + \lambda_t, \mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, G_k = \mu + \frac{\partial w_x}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} + \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right), \\ c_\mu &= 0.09, c_{\varepsilon 1} = 1.44, c_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3. \end{aligned}$$

Краєві умови

$$w_i(\tau = 0) = 0, w_i(x = 0) = w_{in}, w_i(x_i = x_{CT}) = 0, t|_s = t_{CT}|_s \quad (4)$$

де w – швидкість теплоносія; τ – час; x, y – декартові координати; $i=x, y$ індекс для відповідної координати; in – вхід; t – температура; s – поверхня; CT – стінка.

Проведено чисельне моделювання гідродинамічних та теплових процесів у каналах теплообмінника нової конструкції з використанням програмного продукту САПР ANSYS Fluent 14.0. Побудовано розрахункову сітку в каналах теплообмінника, яка має подрібнення поблизу стінок трубного пучка. Елемент такої сітки наведено на рис. 2.

Як теплоносій, який протікає в міжтрубному каналі вибрано нагріте зовнішнє повітря вентиляційних систем з температурою $T_0=30$ °С на вході в канал, яке охолоджується водою підземних свердловин. Температура стінок трубного

пучка вибрано рівною $T_{ст}=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає тепловим умовам, за яких протікає в трубах холодна вода з підземних свердловин.

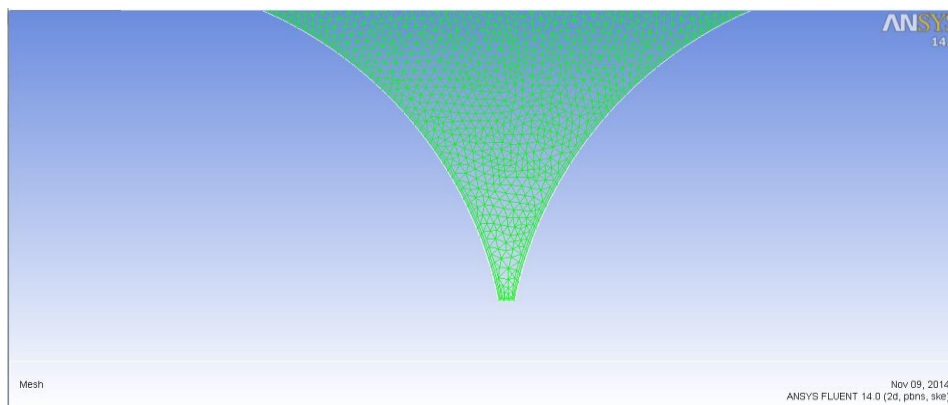


Рис. 2. Елемент розрахункової сітки в елементі каналу між сусідніми трубами

Результати досліджень. Проведений чисельний розрахунок динамічних та теплових характеристик теплоносія в каналах теплообмінника, які представлені на рис. 3-5. На рис. 3 показано розподіл поля температур у каналах теплообмінника. Аналіз розподілу температур у потоці повітря для каналу показує суттєве зниження температури нагрітого зовнішнього повітря на виході з каналів теплообмінника.

На рис. 4 представлено розподіли поля швидкостей в каналах з компактним розташуванням труб. Як впливає з отриманих розподілів швидкості, максимальні їх значення спостерігаються в центральній частині каналу.

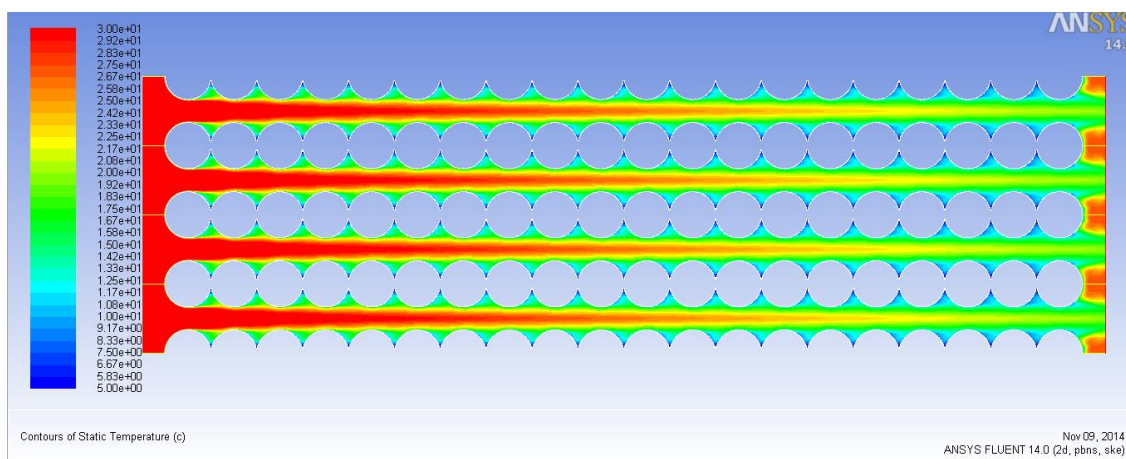


Рис. 3. Зміна температури повітря в каналах теплообмінника

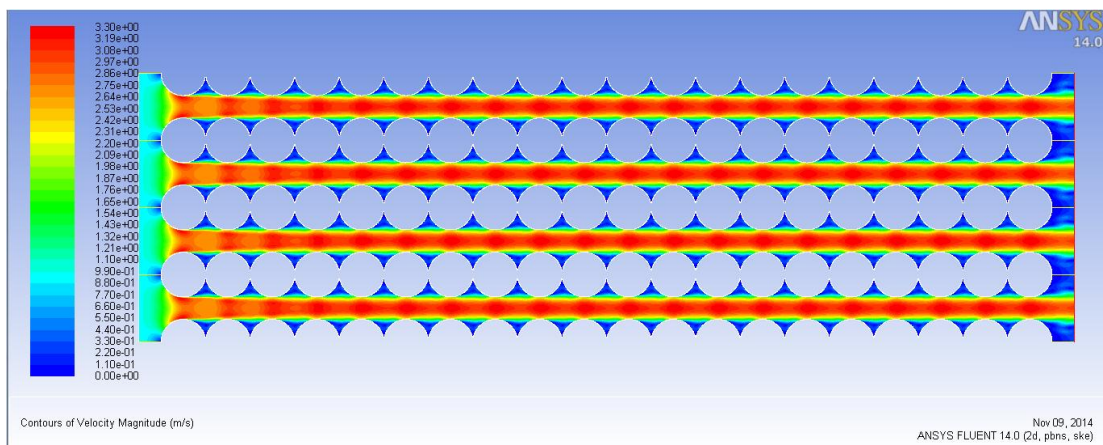


Рис. 4. Розподіл поля швидкостей в каналі

У той же час на ділянках каналу у впадинах між сусідніми трубами величина швидкості суттєво менша. Це обумовлено наявністю зон відриву та завихрення потоку на цих ділянках.

У результаті чисельних розрахунків отримано розподіли локальних тисків у каналах теплообмінника нової конструкції, які наведені на рис. 5. Як випливає з рисунка, має місце падіння тиску на виході з каналів. Разом з тим у кількісному вимірі величина цього падіння незначна, що обумовлено наявністю прямих каналів для потоку теплоносія в міжтрубному просторі теплообмінника. Втрати тиску в досліджуваному теплообміннику суттєво менші, якщо порівнювати з втратами тиску в кожухотрубних теплообмінниках з шаховим або коридорним розташуванням труб.

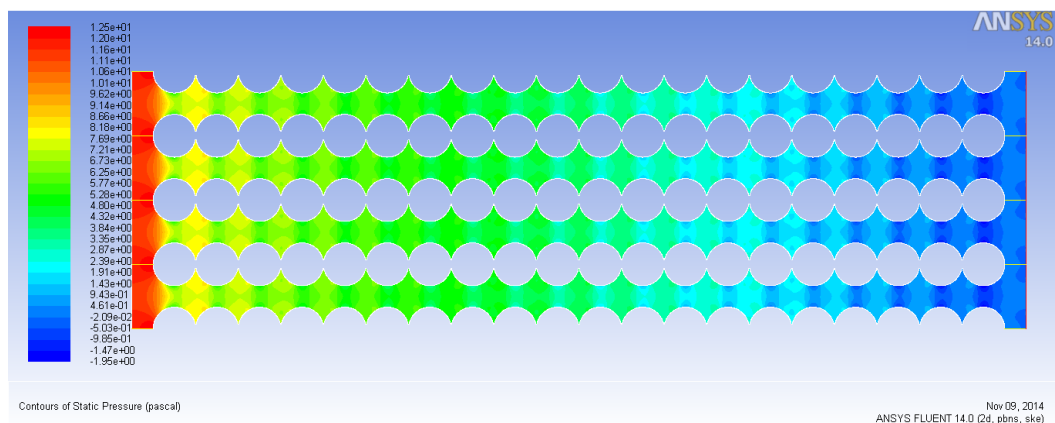


Рис. 5. Зміна тиску в каналах теплообмінника

Порівняння габаритних показників теплообмінників нової конструкції з компактним розташуванням труб та теплообмінників з коридорним розташуванням труб показує, що за однакової тепловій потужності розміри теплообмінника вдосконаленої конструкції майже в два рази менші, а його маса на 10-15 % нижча, що дає знизити вартість теплообмінного апарату.

Висновки

1. Запропоновано нову, ефективну конструкцію кожухотрубного теплообмінника з компактним розташуванням труб, яка використовується для охолодження та нагрівання зовнішнього повітря водою підземних свердловин у системах вентиляції повітря з метою зменшення енергетичних витрат на підтримання оптимального мікроклімату в приміщеннях.

2. Проведено чисельне моделювання процесів тепло- і масопереносу в кожухотрубному теплообміннику нової конструкції за допомогою САПР ANSYS Fluent 14.0.

3. Отримано локальні розподіли поля швидкостей, тисків та температур. Проведено аналіз отриманих розподілів та порівняння характеристик теплообмінника нової конструкції з характеристиками теплообмінників відомих конструкцій.

4. Встановлено, що масогабаритні показники теплообмінника запропонованої конструкції суттєво кращі, ніж характеристики теплообмінників відомих конструкцій.

Список літератури

1. Драганов Б.Х. Теплотехніка / Б.Х. Драганов, О.С. Бессараб, А.А. Долінський та ін. – К., 2005. – 400 с.

2. Виноградов С.Н. Выбор и расчет теплообменников / С.Н. Виноградов, К.В.

Таранцев, О.С. Виноградов . – Пенза, 2001. – 100 с.

3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

4. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообмінниках / А.А. Жукаускас. – М. : Наука, 1982. – 472 с.

**РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ
ТЕПЛООБМЕННИКОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ДОМА**

В.Г. Горобец, М.Ю. Масюк

Аннотация. *Разработана новая конструкция кожухотрубного теплообменника с компактным размещением трубного пучка, который используется в системе вентиляции энергосберегающего дома для охлаждения и нагревания внешнего нагретого воздуха водой подземных скважин. Проведено математическое моделирование процессов массо- и теплопереноса для новой конструкции теплообменника. В результате численного моделирования гидродинамических и тепловых процессов с использованием программного продукта САПР ANSYS Fluent 14.0 получено распределения скоростей, давлений и температур в каналах кожухотрубного теплообменника. Проведено сравнение характеристик теплообменников новой конструкции и известных конструкций.*

Ключевые слова: *теплообменник, математическое моделирование, тепло- и массоперенос, пучок труб*

**DEVELOPMENT OF NEW DESIGN AND MATHEMATICAL
MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER HEAT EXCHANGER
VENTILATION SYSTEMS IN ENERGY HOUSES**

V. Gorobetz, M. Masuk

Annotation. *The new design of compact heat exchanger tube placement tube bundle used in building energy for saving ventilation system to cool and heating the outside air using the underground water wells is proposed. A mathematical modeling*

of mass and heat transfer to the new design of the heat exchanger is developed. As a result of numerical modeling of hydrodynamic and thermal processes using CAD software ANSYS Fluent 14.0 received distributions of velocity, pressure and temperature in the channels and tube heat exchanger. Comparison of characteristics of new designs of heat exchangers and famous designs is conducted.

Key words: *heat exchanger, mathematical modeling, heat and mass transfer, a bunch of tubes*