

УДК 621.565.93/.95

Исследование процессов свободной конвекции в трубчатом оребренном теплообменнике

Петрушин Кирилл Александрович

petrushin9ka@mail.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

patrol8@yandex.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Представлено численное моделирование процессов свободной конвекции в трубчатом оребренном теплообменнике, используемом в системах воздушного охлаждения. Исследованы условия эксплуатации теплообменника с вытяжной шахтой и без нее и их влияние на тепловую эффективность устройства. Полученные результаты показали, что применение вытяжной шахты позволяет значительно повысить коэффициент теплоотдачи. Численные расчеты, выполненные в Ansys CFX, продемонстрировали достаточную точность и согласованность с расчетными методиками, подтверждая корректность подхода. Данные исследования могут быть полезны для проектирования более эффективных систем воздушного охлаждения.

Ключевые слова: теплообменник, конвекция, вытяжная шахта, интенсификация теплообмена, воздушное охлаждение

Теплообменники с оребренными трубами получили широкое распространение в системах воздушного охлаждения благодаря их высокой эффективности и компактности. Эти устройства позволяют эффективно отводить тепло за счет теплообмена с окружающим воздухом, что делает их востребованными в различных промышленных и энергетических установках. Цель данной работы заключается в исследовании процессов свободной и смешанной конвекции в трубчатом оребренном теплообменнике, а также в анализе эффективности использования вытяжной шахты для интенсификации теплообмена. Рассмотрены различные условия эксплуатации теплообменников, направленные на повышение их тепловой эффективности и снижение энергозатрат.

Воздухоохлаждаемые теплообменники функционируют в различных режимах конвекции: свободной, смешанной и вынужденной. В режиме свободной конвекции движение воздуха происходит за счет естественной циркуляции, вызванной разницей температур [1]. В условиях смешанной конвекции процесс также включает элементы принудительного потока, который создается с помощью внешних устройств, таких как вытяжная шахта.

В данной работе исследованы два основных режима работы теплообменника: свободная конвекция, при которой процесс охлаждения осуществляется без дополнительного оборудования, и смешанная конвекция.

Объектом исследования является теплообменный аппарат, представленный четырехрядным шахматным пучком, состоящим из биметаллических оребренных труб со спирально накатанными ребрами, имеющий угол наклона к горизонтальной плоскости $\varphi = 60^\circ$. Геометрические параметры трубок:

диаметр по основанию $d_0 = 26$ мм; диаметр по оребрению $d_n = 57$ мм; шаг ребер $s = 3,24$ мм; высота ребер $h = 15$ мм; толщина ребра $\Delta = 0,27$ мм; длина трубок $l = 2,5$ м; поперечный шаг $s_1 = 58$ мм; продольный шаг $s_2 = 50$ мм; коэффициент оребрения $\varphi = 16$.

Переход к режиму свободной конвекции был осуществлен путем установки вытяжной шахты высотой $H = 1,8$ м над теплообменником. Шахта усиливает естественную тягу, что способствует увеличению потока воздуха через теплообменник и интенсификации процесса теплоотдачи.

Для каждого из режимов работы были заданы значения температур. В режиме без вытяжной шахты температура окружающего воздуха за теплообменником составила $t_0 = 29,2$ °С, а температура стенки трубки $t_{ст} = 47,2$ °С. В режиме с вытяжной шахтой температура окружающего воздуха за теплообменником составила $t_0 = 21$ °С, а температура стенки трубки $t_{ст} = 43,3$ °С.

Свободно-конвективная теплоотдача теплообменного аппарата без шахты рассчитана на основе методики приведенной в работе [2]. Число Нуссельта определялось по формуле:

$$Nu = A Ra^n (1 - \exp(-B/Ra)), \quad (1)$$

где коэффициенты A , n , B определялись по таблице в соответствии с углом наклона трубок к горизонтальной плоскости.

$$Ra = GrPr;$$

$$Gr = \frac{g\beta d_0^3(t_{ст} - t_0)}{\nu^2};$$

$$Pr = \frac{\nu}{a},$$

где ν , λ , α , β — теплофизические свойства воздуха, которые определяли по температуре t_0 ; $\beta = \frac{1}{t_0 + 273}$, К⁻¹.

Коэффициент теплоотдачи составил $\alpha = 0,246$ Вт/(м²·К).

Для определения числа Нуссельта в режиме с использованием конвективной шахты была использована формула, приведенная в работе [3].

$$Nu = (0,00313 + 0,07693 \cdot 0,45^Z)(1,1 - \exp(-1,69Z^{0,72}\chi_{ш})) \times \\ \times (1,3 - \exp(-7,65 \cdot 10^{-4}Z^{0,72}H/d_3))Gr^{0,48}, \quad (2)$$

где $\chi_{ш} = F_{ш}/F_{сж}$ — коэффициент сужения площади сечения выходной шахты по отношению к сжатому сечению пучка; Z — число рядов в пучке.

Эквивалентный диаметр сжатого поперечного пучка определяется по формуле

$$d_3 = \frac{2s}{2h+s}s_1\chi, \quad (3)$$

где $\chi = 1 - \frac{1}{s_1}\left(d_0 + 2\frac{h\Delta}{s}\right)$ — коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха.

С помощью вычисленного значения Nu по формуле (4) находят средний коэффициент теплоотдачи пучка:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_0} = 1,01. \quad (4)$$

Для случая с использованием конвективной шахты также были произведены численные исследования в пакете численного моделирования Ansys CFX [4]. Расчетная сетка подготавливалась с помощью Ansys Meshing, встроенного в Ansys инструмента, предоставляющего широкий выбор возможностей при создании сетки. В результате расчета получено значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 0,915 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, который отличается от полученного при расчетах на 10,38 %. В результате расчета получена картина распределения температур в теплообменнике, представленная на рис. 1.

В результате расчета получено распределение линий тока, представленное на рис. 2.

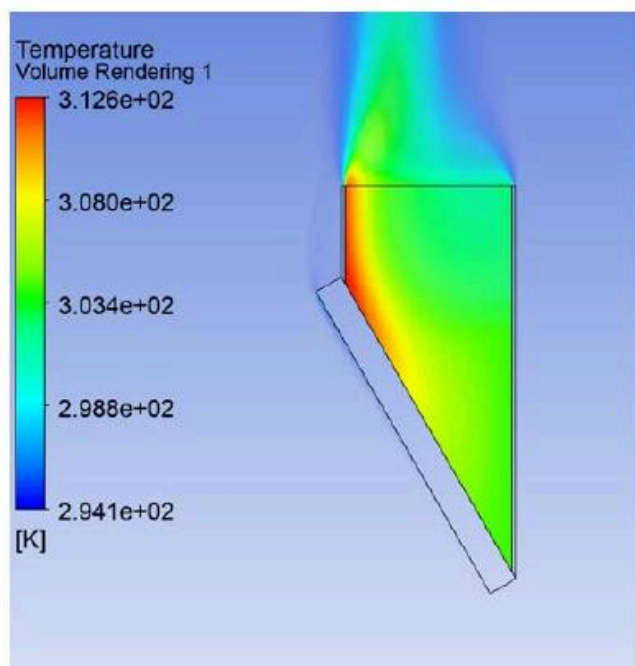


Рис. 1. Распределение температур в теплообменнике

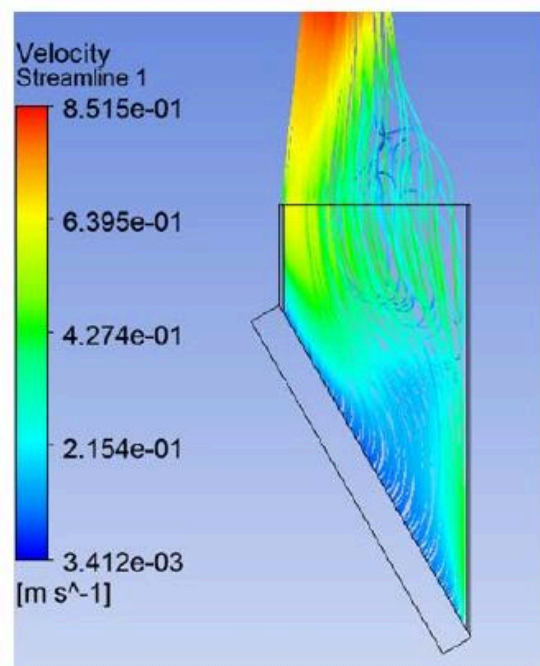


Рис. 2. Распределение линий тока

Из рисунка видно область, в которой происходит подсос снаружи холодного воздуха. В некоторый момент условие неустойчивого равновесия нарушается и под действием разряжения происходит подсос снаружи холодного плотного воздуха в шахту через край его боковой стенки [5].

Проведенное исследование процессов свободной конвекции в трубчатом оребренном теплообменнике позволило выявить значительное влияние использования вытяжной шахты на его тепловую эффективность. Численные исследования, выполненные с использованием Ansys CFX, продемонстриро-

вали соответствие расчетных данных результатам моделирования, что подтвердило корректность выбранных методик. Применение вытяжной шахты привело к улучшению характеристик теплоотдачи. Полученные данные позволяют рекомендовать использование вытяжной шахты для интенсификации теплообмена в системах воздушного охлаждения, обеспечивая повышение общей эффективности работы теплообменника.

Литература

- [1] Ерофеев В.Л. *Теплотехника. Т. 1. Термодинамика и теория теплообмена*. Москва, Юрайт, 2023, 308 с.
- [2] Самородов А.В. *Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками*. Дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 1999, 172 с.
- [3] *Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения с вытяжной шахтой*. URL: <https://chemtech.ru/inzhenernyj-metod-teplovogo-rascheta-apparata-vozdushnogo-ohlazhdenija-s-vytjazhnoj-shahtoj/> (дата обращения 26.10.2024).
- [4] *Официальный сайт Ansys*. URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения 26.10.2024).
- [5] Сухоцкий А.Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 92, № 3, с. 619–625.

Study of free convection processes in a tubular finned heat exchanger

Petrushin K.A. petrushin9ka@mail.ru

Ilyichev V.Y. patrol8@yandex.ru

BMSTU (KB), Kaluga, Russia

The article presents numerical modeling of free convection processes in a tubular finned heat exchanger used in air-cooling systems. The operating conditions of the heat exchanger with and without an exhaust shaft and their effect on the thermal efficiency of the device are studied. The results show that the use of an exhaust shaft can significantly increase the heat transfer coefficient. Numerical calculations performed in Ansys CFX demonstrated sufficient accuracy and consistency with calculation methods, confirming the correctness of the approach. These studies can be useful for designing more efficient air-cooling systems.

Keywords: heat exchanger, convection, exhaust shaft, heat exchange intensification, air cooling