

Е.С. Данильчик, доц., канд. техн. наук;
А.Б. Сухоцкий, доц., канд. техн. наук;
Г.С. Маршалова, доц., канд. техн. наук;
Д.В. Островская, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫХ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ ПУЧКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ С КРУГЛЫМИ РЕБРАМИ

Работа над проведением экспериментальной части любого исследования требует четкого понимания алгоритма проведения испытаний, а также выверенной системы фиксации полученных данных. Важным этапом модельного исследования является определение критериев подобия и правил моделирования, выбор условий достоверного переноса результатов модельного исследования на натуру. При этом только удовлетворяющий требованиям теории подобия эксперимент обеспечивает надежные результаты, которые могут быть использованы в проектировании и расчетах рабочих теплообменников. Теория подобия устанавливает, что процессы, воспроизводимые в модели, должны быть подобны процессам, происходящим в образце. Для этого необходимо создание геометрического подобия, подобия условий на границах образца и модели, равенство определяющих критериев [1].

Целью работы является экспериментальное исследование физического подобия процессов в теплообменных пучках с вытяжными шахтами для различных чисел труб в поперечном ряду пучка.

В работе [2] представлены методика и результаты экспериментального исследования двухрядного, шахматного, равностороннего пучка из оребренных труб с установленной над ним вытяжной шахтой высотой $H = 0,52$ м и различными крышками с площадью отверстия $f_{\text{отв}} = 0,0087; 0,0147; 0,0201; 0,033; 0,05; 0,069$ и $0,1185$ м². Пучок и собирался из биметаллических оребренных труб с коэффициентом оребрения $\phi = 21$ и геометрическими параметрами представленными выше. Межтрубный поперечный шаг труб в пучке составлял $S_1 = 70$ мм. Количество труб в поперечном первом ряду – шесть штук, а во втором – пять штук и две необогреваемые полутрубки (рисунок 1, а). Полутрубки устанавливались для обеспечения аэродинамического подобия модели.

Для проведения анализа подобия процессов авторами статьи

были проведены аналогичные исследования для подобного двухрядного пучка с четырьмя трубками в первом ряду и тремя целыми трубами с двумя необогреваемыми полутрубками во втором ряду (рисунок 1, б). Над пучком устанавливалась вытяжная шахта высотой $H = 0,52$ м и различными крышками с площадью отверстия $f_{\text{отв}} = 0,0147; 0,025; 0,033; 0,069; 0,086$ и $0,1185$ м².

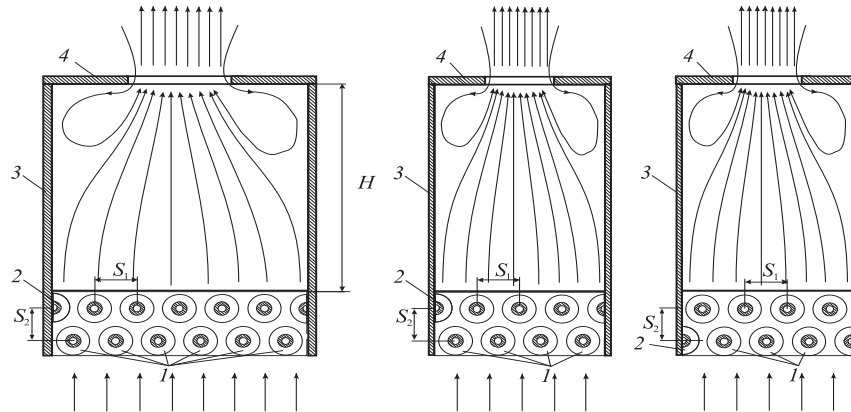


Рисунок 1 – Экспериментальные модели двухрядных пучков труб с шестью а и четырьмя б, в трубами в поперечном ряду (с полутрубками во втором а, б и первом в ряду): 1 – целая обогреваемая труба, 2 – необогреваемая полутрубка, 3 – вытяжная шахта, 4 – крышка с отверстием

Измерительное оборудование и методика экспериментального исследования представлена в работе [2]. Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в различных тепловых режимах обрабатывались и представлялись в виде зависимостей числа Нуссельта от чисел Релея:

$$Nu = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$Ra = \frac{g \beta d_0^3 (t_{\text{ст}} - t_0)}{\nu a}, \quad (2)$$

где α_k – средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности трубы, Вт/(м²·°C); d_0 – диаметр трубы у основания ребра, м; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C); g – ускорение свободного падения, м/с²; $\beta = 1 / (273 + t_0)$ – коэффициент температурного расширения, К⁻¹; $t_{\text{ст}}$ – средняя температура стенки у основания ребер, °C; t_0 – температуре окружающей среды, °C; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; a – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с.

Для апробации установки были проведены экспериментальные исследования четырехтрубной модели двухрядного пучка в условиях

свободной конвекции без вытяжной шахты. Также были проведены экспериментальные исследования четырехтрубной модели однорядного пучка (без необогреваемых полутрубок) с вытяжной шахтой при коэффициенте сужения площади выходного отверстия $\chi_{\text{ш}} \approx 0,75$. На рисунке 2 представлены зависимости числа Нуссельта от числа Релея для четырехтрубного и шеститрубного (полученного в [2]) двухрядных и однорядных пучков.

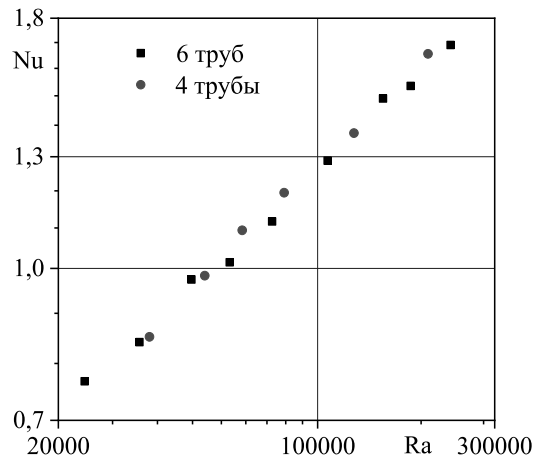


Рисунок 2 – Зависимости числа Нуссельта от числа Релея для шеститрубного и четырехтрубного пучков в условиях свободной конвекции без вытяжной шахты

Как видно, зависимости четырехтрубных и шеститрубных пучков на рисунке 2 *а* и *б* идентичны в пределах погрешности экспериментов и, следовательно, можно утверждать, что соблюдается физическое подобие экспериментов.

Затем были проведены исследования двухрядного четырехтрубного пучка с вытяжной шахтой (рисунок 1, *б*). На рисунке 3 представлены зависимости числа Нуссельта для двухрядных шеститрубного и четырехтрубного пучков с вытяжной шахтой при числе Релея $Ra = 10^5$.

Экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью предложенной в [2]:

$$Nu = Nu_0 \left(1 + \exp \left(- \frac{\chi_{\text{ш}}}{\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} - \chi_{\text{ш}}^0} \right) \left(\frac{\chi_{\text{ш}}^0}{\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}} - 1 \right) \right), \quad (3)$$

где $Nu_0 = 1,278 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ – число Нуссельта без шахты (свободная конвекция); $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}$ – оптимальный коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта максимально ($\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} = 1,0$ – для четырехтрубного, $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} = 0,81$ – для шеститрубного пучка); $\chi_{\text{ш}}^0$ – нулевой коэффициент сужения пло-

щади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта равно его значению при свободной конвекции пучка $Nu = Nu_0$ ($\chi_{ш}^0 = 0,182$ – для четырехтрубного, $\chi_{ш}^0 = 0,167$ – для шеститрубного пучка).

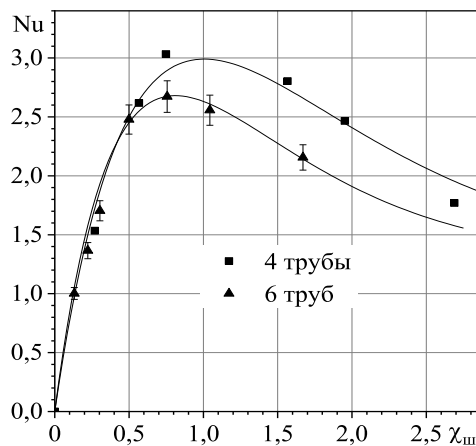


Рисунок 3 – Зависимости числа Нуссельта от коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты для шеститрубного и четырехтрубного пучков с вытяжной шахты при числе Релея $Ra = 10^5$

Как видно, четырехтрубный пучок имеет более высокую теплоотдачу (до 20 %) для крышек с коэффициент сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш} > 0,5$. Было выдвинуто предположение, что данный эффект обоснован влиянием необогреваемых крайних трубок во втором поперечном ряду пучка. Недостаточный обогрев потока воздуха по краям пучка приводит к снижению гравитационной силы у стенок шахты и неравномерности вертикальной скорости потока воздуха по сечению пучка. Таким образом, усиливается поток воздуха через центр пучка в месте нахождения трубы-калориметра. На четырехтрубном, более узком пучке этот эффект проявляется более значительно, что и показали данные экспериментальных исследований.

Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.37, ГБ21-104).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигай В. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В. К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат. – 1987. – 264 с.
2. Данильчик Е. С. Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Е. С. Данильчик. – Минск, 2022. – 194 с.