

УДК 536.25

Г. С. МАРШАЛОВА^{1,2,4}, А. Б. СУХОЦКИЙ^{1,2,4}, Е. С. ДАНИЛЬЧИК^{1,2,4},
М. С. ЛИРА¹, Р. Г. КАДЫРОВ³, Д. В. ОСТРОВСКАЯ²

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ РЕБРА НА ТЕПЛООТДАЧУ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ, ОСНАЩЕННЫХ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

¹Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский государственный технологический университет

³Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ

⁴Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

(Поступила в редакцию 02.08.2023)

Представлены результаты численного исследования теплообменных процессов в двухрядном оребренном трубном пучке теплообменников воздушного охлаждения. Получены обобщающие аппроксимированные уравнения для расчета средней теплоотдачи оребренной поверхности труб к воздуху. Установлено, что наибольшей теплоотдачей, отнесенной к полной оребренной поверхности труб, характеризуется гладкий пучок, что связано с возрастающим аэродинамическим сопротивлением. В то же время теплоотдача, отнесенная к поверхности труб по основанию ребер, увеличивается с ростом высоты ребра. Показано, что для теснооребранных труб влияние увеличения коэффициента оребрения более существенно, чем влияние снижения коэффициента теплоотдачи с ростом высоты оребрения.

Введение. В настоящее время в химической, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей промышленности все большее применение находят холодильники и конденсаторы с воздушным охлаждением, которые в качестве охлаждающего агента используют воздух.

Применение таких устройств несет в себе следующие преимущества: снижение количества охлаждающей воды и сточных вод; экономия дорогостоящих легированных сталей, необходимых для защиты теплообменного оборудования от накипей и солей; уменьшение расходов на организацию обратного водоснабжения; неограниченность запасов воздуха как агента охлаждения; экологичность за счет отсутствия сброса в водоемы кислот, хлоридов, фенолов и т. п. [1].

Недостатком теплообменников с воздушным охлаждением (ТВО) являются сравнительно низкие коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха. Для устранения данного недостатка наружная поверхность труб выполняется оребренной, что увеличивает площадь поверхности теплообмена.

Типичные ТВО состоят из секции теплообмена, внутри которой расположен пучок оребренных труб, вентилятора с приводом, а также ограждающих и опорных конструкций.

В настоящее время самой распространенной компоновкой труб в пучках ТВО является шахматная равносторонняя с шагом $S_1 = 0,064$ м [2].

На теплоотдачу ТВО влияют геометрические характеристики пучка оребренных труб, а также режим течения воздуха: вынужденный, где воздух нагнетается вентиляторами, свободный, где используется естественная тяга, или смешанный, который организуется с помощью устройств, повышающих тягу, например, вытяжная шахта. При этом переход на режим свободной или смешанной конвекции без потери тепловой мощности ТВО осуществляется при определенных точно установленных температурах окружающего воздуха, в связи с чем необходимо наличие достоверных данных по теплообмену оребренных пучков.

Влиянию компоновочных параметров пучка, геометрических характеристик вытяжной шахты на теплоотдачу в режиме смешанной конвекции посвящены работы [3–6]. В [3] проведены экспериментальные исследования средней теплоотдачи однорядных оребренных трубных пучков в режиме смешанной конвекции, по результатам которых получено, что максимум теплоотдачи наблюдается при наименьшем относительном шаге $\sigma_1 = S_1 / d = 1,036$, где d – диаметр трубы с оребрением. Работа [4] посвящена комплексному исследованию средней теплоотдачи аппаратов воздушного охлаждения, оснащенных вытяжной шахтой, со следующими параметрами пучка: число рядов $z = 1–4$, поперечный шаг $S_1 = 0,058$ м, коэффициент оребрения труб $\phi = 21$.

В [5; 6] для четырехрядных пучков, состоящих из оребренных труб, аналогичных исследуемым в [3; 4], изучено влияние поперечного шага установки труб на теплоотдачу аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой. Авторами получены критериальные уравнения для расчета средней теплоотдачи пучков и определены оптимальные диапазоны параметров вытяжной шахты эффективного применения этих пучков в режиме смешанной конвекции. Также установлено, что с увеличением поперечного шага теплоотдача растет и достигает максимума при $S_1 > 0,07$ м.

Исследования влияния высоты ребра на теплоотдачу ТВО с вытяжной шахтой проведены лишь в [7; 8], где для однорядного пучка определена эффективная высота оребрения $h = 8$ мм. Но [4; 8] показывают наличие существенных отличий между закономерностями для однорядных и многорядных пучков в режиме смешанной конвекции, что свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований в данном вопросе.

При этом получение экспериментальных данных по теплообмену в режимах свободной и смешанной конвекции вызывает трудности, связанные с организацией измерений, не вызывающих нарушений самого процесса теплообмена. Поэтому для расширения диапазона экспериментальных данных применяется численное моделирование.

Цель исследования – численное исследование влияния высоты ребра на теплоотдачу двухрядных оребренных трубных пучков ТВО с вытяжной шахтой.

Материалы и методы исследования. Объект исследования – двухрядный шахматный оребренный пучок с поперечным шагом – $S_1 = 0,064$ м, относительным шагом – $\sigma_1 = S_1 / d = 1,13$, состоящий из труб следующих параметров: наружный диаметр трубы с оребрением $d = 0,0264–0,0568$ м; высота ребра $h = 0–0,0152$ м; межреберный шаг $s = 0,00243$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0,0264$ м; толщина ребра $\Delta = 0,00055$ м; коэффициент оребрения $\varphi = 1–21$, высота вытяжной шахты – $H = 0,52$ м, диаметр выходного отверстия вытяжной шахты – $d_{\text{отв}} = 0,205$ м.

Коэффициент оребрения трубы равен [1]

$$\varphi = 1 + \frac{2h}{s d_0} (d_0 + h + \Delta). \quad (1)$$

В зависимости от высоты ребра было исследовано 5 различных типов пучков.

Применяемый метод исследования – численное моделирование. Расчетная сетка с достаточным числом конечных элементов и требуемым качеством была подготовлена в пакете Ansys Meshing. Численное моделирование проводилось в пакете Ansys Fluent 19.1 со средним временем расчета порядка 3 ч.

Для достижения поставленной цели решались стационарные уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу, уравнение неразрывности и уравнение энергии.

В качестве граничных условий на внутренней поверхности трубы задавалось значение теплового потока из условия согласования с экспериментом, на выходе из расчетной области – равенство нулю градиентов рассчитываемых величин. Стенки шахты изолированные. В начале расчета по всей расчетной области установлены следующие начальные параметры: статическое давление $P = 101325$ Па, и температура воздуха $T_{\text{вх}} = t_0$. Для моделирования передачи тепла от ребер к воздуху решалась сопряженная задача.

Зависимости теплофизических характеристик газа – воздуха (плотность, теплопроводность и динамическая вязкость) от температуры задавались в виде законов: для плотности – по закону идеального газа, для теплопроводности – полиномом, динамическая вязкость рассчитывалась по Сазерленду.

В процессе решения сходимость задачи контролировалась уровнем погрешности: для давления и скоростей с помощью уравнения Навье–Стокса и неразрывности, при этом минимальный уровень погрешности составлял 10^{-3} ; для температуры с помощью уравнения энергии – 10^{-5} . Обычно расчеты прекращались по достижению погрешности для поправок давления 10^{-4} , для температуры – 10^{-8} .

При численном моделировании учитывалось, что число Рейнольдса Re , построенное по высоте ребра и скорости на входе в межреберный канал, изменялось в диапазоне 100–950. В этом случае течение – ламинарное, однако для разрешения

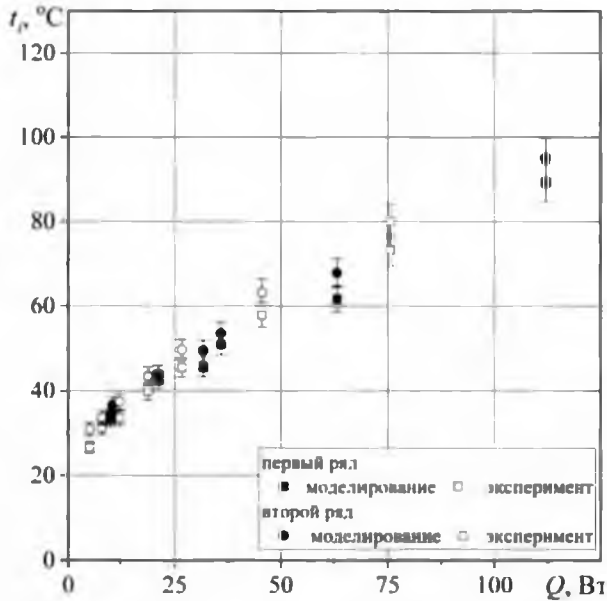


Рис. 1. Сравнение экспериментального и численного исследования для $\sigma_1 = 1,13$ при $h = 0,0152$ м, $H = 0,52$ м, $d_{отв} = 0,205$ м

формирующейся за трубами отрывной зоны использовалась $k-\omega$ SST модель турбулентности [9]. Случай максимального расхода соответствовал переходному режиму от ламинарного течения к турбулентному.

Подробное описание используемого численного алгоритма представлено в [10; 11].

Верификация расчетных алгоритмов для численного моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований [4; 7] проводилась для двухрядных шахматных пучков ТВО с вытяжной шахтой при $S_1 = 64$ мм, $\phi = 21$, $h = 15,2$ мм и $h / s = 6,26$.

Сравнение экспериментального и численного исследования проведено сопоставлением данных о температуре оснований центральных труб каждого ряда t_b , °C, при различной тепловой мощности, подаваемой на трубу, Q , Вт, для $\sigma_1 = 1,13$ при $h = 0,0152$ м, $H = 0,52$ м, $d_{отв} = 0,205$ м (рис. 1).

Получено согласование экспериментальных и численных данных с погрешностью в пределах 5 %, что позволяет использовать разработанный алгоритм численного исследования для определения теплоотдачи и визуализации структуры течения в двухрядных пучках труб с вытяжной шахтой при различных высотах ребра.

Результаты и их обсуждение. Численное исследование теплоотдачи ТВО с вытяжной шахтой проведено для пяти типов (таблица) двухрядных шахматных пучков с различной высотой ребра труб $h = 0-0,0152$ м при относительных шагах $\sigma_1 = S_1 / d = 1,13$.

Значения постоянных A , n в уравнении (2) и диапазоны применимости по Gr для теплоотдачи двухрядных пучков ТВО с вытяжной шахтой

| Тип пучка | Параметры труб пучка | | | | Коэффициенты для (2) | | Диапазон $Gr \cdot 10^3$ |
|-----------|---------------------------|-------|--------|------------------|----------------------|------|--------------------------|
| | $h \cdot 10^3, \text{ м}$ | h/s | ϕ | $S_r, \text{ м}$ | A | n | |
| I | 0,0152 | 6,26 | 21 | 0,064 | 0,01235 | 0,46 | 0,38–1,9 |
| II | 0,0117 | 4,8 | 15 | 0,056 | 0,0178 | 0,45 | 0,4–2,0 |
| III | 0,0078 | 3,2 | 9 | 0,047 | 0,025 | 0,44 | 0,45–2,4 |
| IV | 0,004 | 1,64 | 5 | 0,039 | 0,076 | 0,36 | 0,55–3,4 |
| V | 0 | 0 | 1 | 0,0298 | 1,33 | 0,2 | 0,2–2,0 |

Численное моделирование позволило визуализировать температурное поле и поле скоростей на оребренном пучке, оснащенный вытяжной шахтой (рис. 2) при плотности теплового потока $q = 1895 \text{ Вт/м}^2$.

При описании движения воздуха в пучке будем фокусировать внимание на центральных трубах, так как шахматное расположение привело к наличию во втором ряду свободного пространства, в котором, за счет отсутствия аэродинамического сопротивления, воздух имеет области повышения скорости.

Атмосферный воздух за счет разности температур засасывается в пучок огибая лобовую часть пучка. В межтрубном сечении пучка происходит разгон потока, и максимальная скорость фиксируется на выходе из первого ряда. Далее поток воздуха сталкивается с трубами второго ряда и теряет скорость движения. Затем огибает трубу второго ряда, разгоняется в межтрубном сечении. Максимальной скорости поток достигает в зоне перехода воздуха в вытяжную шахту.

Для труб с большой высотой оребрения воздух, движущийся в межреберном пространстве, обладает одинаково невысокой скоростью в обоих рядах. Интенсивным движением обладают верхние половины труб второго ряда. Здесь организованная с помощью вытяжной шахты тяга способствует созданию отрывных потоков и в межреберном пространстве, которые смешиваются в шахте с потоками в межтрубном сечении пучка. Причем из-за обратных, запирающих течений холодного внешнего воздуха в горловину шахты, направление поднимающихся теплых потоков периодически прижимается к боковым стенкам шахты (рис. 2, в и г).

Численные данные по теплоотдаче двухрядного пучка с $\sigma_1 = 1,13$ при различных высотах оребрения (рис. 3) обобщены функцией вида

$$Nu = AGr^n, \quad (2)$$

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}, \quad Gr = \frac{g\beta(t_{ст} - t_0)d_0^3}{\nu^2},$$

где Nu – число Нуссельта; Gr – число Грасгофа; α – коэффициент теплоотдачи пучка, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$; λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$; g – ускорение свободного паде-

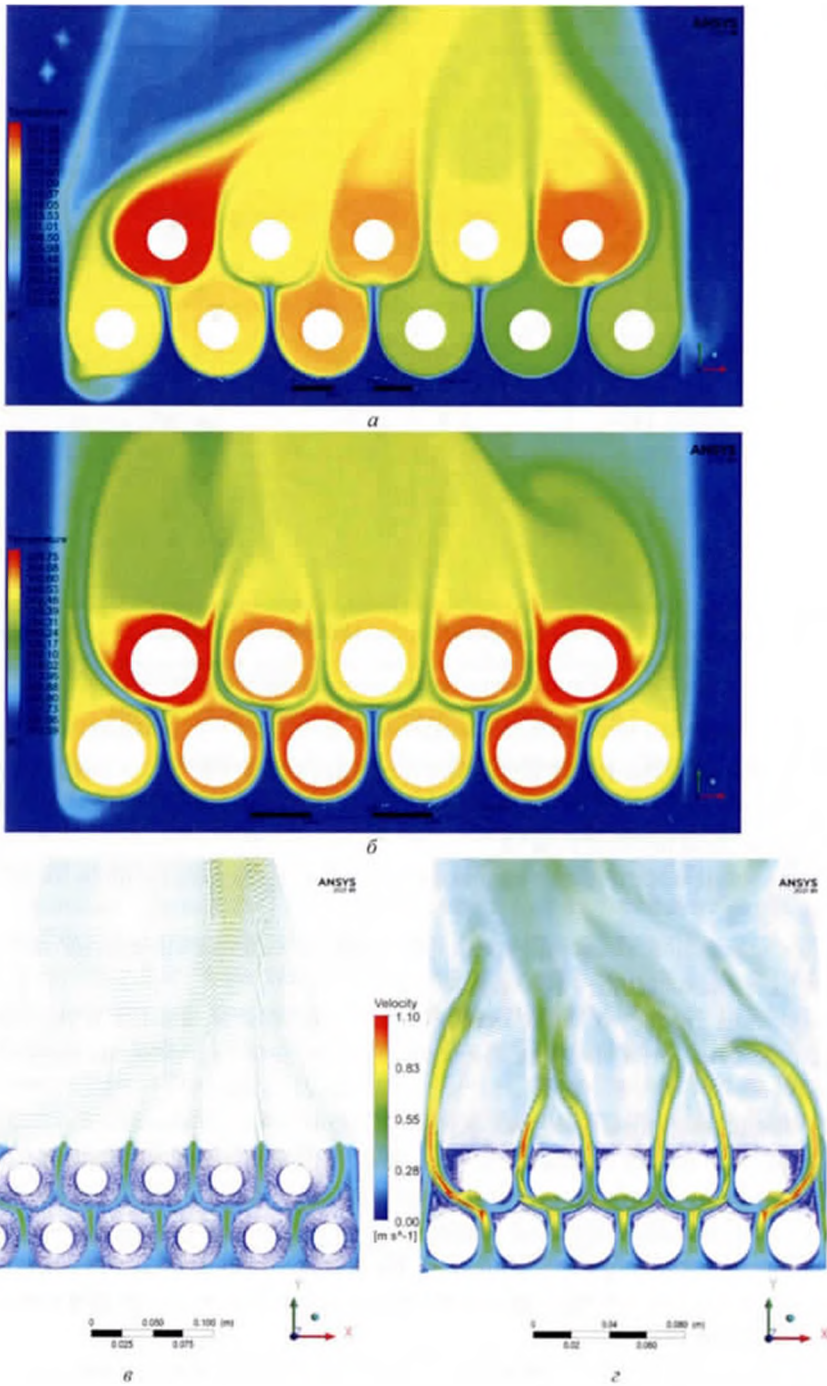


Рис. 2. Распределение температуры при *a*) $h/s = 6,26$ и *б*) $h/s = 1,64$ и поле скоростей при *в*) $h/s = 6,26$ и *г*) $h/s = 1,64$ для двухрядного оребренного пучка, оснащенного вытяжной шахтой

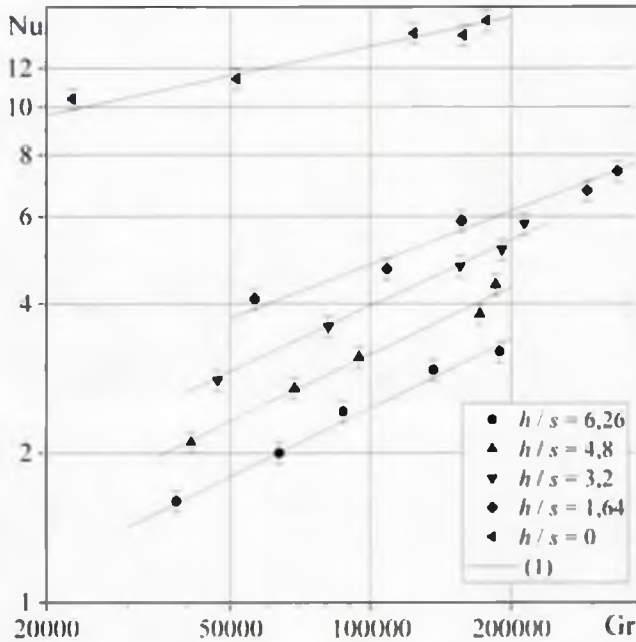


Рис. 3. Теплоотдача двухрядного оребренного пучка ТВО с вытяжной шахтой при различных высотах ребра

ния, $\text{м}^2/\text{с}^2$; β – коэффициент объемного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $t_{\text{ст}}$ – температура стенки трубы у основания, $^{\circ}\text{C}$; t_0 – температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Отклонение экспериментальных данных от предложенной функции (2) не превысило $\pm 5\%$.

Определяющей температурой для расчета теплофизических параметров является t_0 , определяющим размером – d_0 .

В таблице представлены значения постоянных A , n в (2), а также диапазоны применимости по Gr для теплоотдачи двухрядных пучков, оснащенных вытяжной шахтой.

Из представленных на рис. 3 и в таблице данных максимальной теплоотдачей характеризуется гладкий пучок (тип V). Это объясняется тем, что для небольших шагов оребрения повышение высоты ребра приводит к возрастанию аэродинамического сопротивления за счет эффекта «запирания» воздуха в пространстве между ребрами. Данный эффект согласуется с результатами проведенного численного моделирования пучков оребренных труб в режиме свободной конвекции [9].

Для исследованного шага $\sigma_1 = 1,13$ при повышении высоты до 0,004 м, $h/s = 1,64$ теплоотдача уменьшается в 3,1 раза, а увеличение высоты до 0,0154 м, $h/s = 6,26$ – более чем в 5 раз. При этом с увеличением числа Грасгофа, т. е. раз-

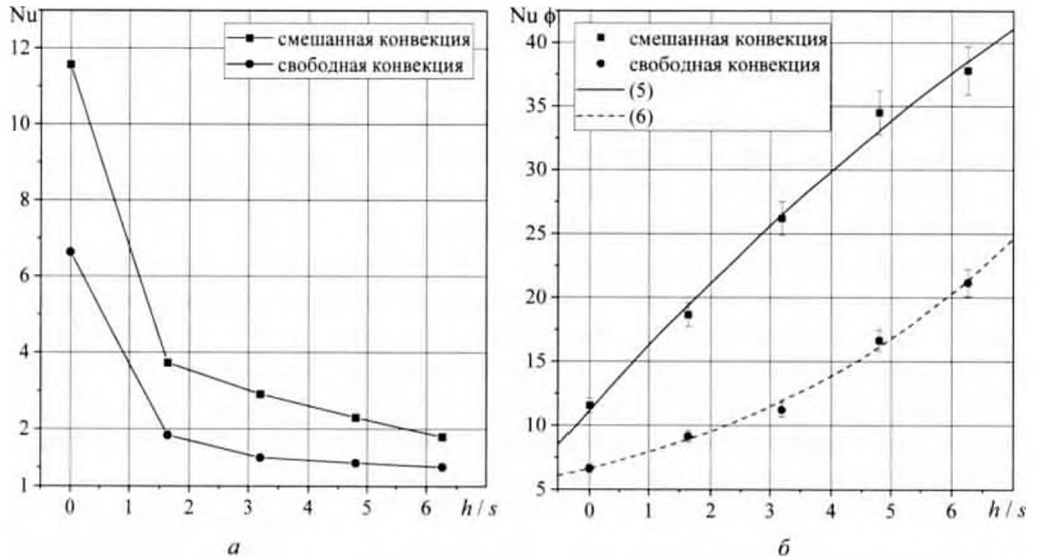


Рис. 4. Влияние высоты ребра на интенсивность теплоотдачи двухрядного пучка ТВО для свободной и смешанной конвекции: а) отнесенной к полной оребренной поверхности труб и б) к поверхности труб по основанию ребер при $Gr = 100\ 000$

ности температур, подаваемой на пучок, снижение теплоотдачи становится меньше. Это связано с тем, что коэффициент n в (1), отвечающий за степень роста функции $Nu = f(Gr)$, с повышением высоты ребра увеличивается, графики при этом начинают сближаться. Так при $Gr = 100\ 000$ увеличение высоты ребра с 0 до 0,0154 м снижает теплоотдачу в 5,3 раза, а при $Gr = 300\ 000$ – в 4 раза.

Однако тепловая мощность ТВО определяется как теплоотдачей, так и площадью теплообменной поверхности. Поэтому для анализа влияния относительной высоты ребра труб h/s на теплоотдачу двухрядного пучка ТВО в режимах свободной [9] и смешанной конвекции и сопоставления различных типов пучков по тепловой эффективности при постоянном числе Грасгофа $Gr = 100\ 000$, были построены зависимости $Nu = f(h/s)$, $(Nu \phi) = f(h/s)$, представленные на рис. 4.

Зависимости, представленные на рис. 4, б, с погрешностью, не превышающей 5 %, аппроксимированы уравнениями вида: для смешанной конвекции

$$Nu \phi = 94,9 - 83,72 \exp(-0,0632h/s),$$

для свободной конвекции

$$Nu \phi = 0,80237 + 5,82773 \exp(0,201h/s).$$

Как видно из рис. 4, а средняя по поверхности оребрения теплоотдача экспоненциально уменьшается с ростом высоты оребрения как при свободной, так и при

смешанной конвекции. Это обусловлено увеличением объема неподвижного воздуха в пограничных слоях теснооребрённых труб. При этом влияние свободноконвективных течений столь незначительно, что характер зависимости $Nu \phi = f(h/s)$ идентичен $\phi = f(h/s)$. Однако наличие в смешанной конвекции более интенсивных вынужденных, обусловленных внешними источниками, потоков приводит к частичному разрушению пограничных слоев, что выражается изменением вида зависимости $Nu \phi = f(h/s)$ при смешанной конвекции.

Заключение. В результате численного моделирования теплообменных процессов в двухрядном пучке оребрённых труб определены особенности течения потоков воздуха при свободной и смешанной конвекции. Получены обобщающие аппроксимированные уравнения для расчета средней теплоотдачи оребрённой поверхности труб к воздуху. Показано, что для теснооребрённых труб влияние увеличения коэффициента оребрения более существенно, чем влияние снижения коэффициента теплоотдачи с ростом высоты оребрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Т21РМ-019 и № Ф21МС-011), Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-58-04002) и проекта «Создание и развитие научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» (соглашение № 075-15-2022-312).

Литература

1. Бессонный А. И., Кунтыш В. Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Кунтыш В. Б. и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 1. С. 14–19.
3. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 19. С. 3–11.
4. Маршалова Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2019. – 153 л.
5. Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С., Скрыттик А. И. // Вестн. Фонда фундам. исслед. 2020. № 1. С. 46–53.
6. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С., Маршалова Г. С. // Вестн. Фонда фундам. исслед. 2020. № 2. С. 160–169.
7. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 4. С. 336–348.
8. Данильчик Е. С. Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2022. – 195 л.
9. Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
10. Маршалова Г. С., Баранова Т. А., Жукова Ю. В. и др. // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2022. Т. 67, № 3. С. 298–306.
11. Маршалова Г. С., Лира М. С., Данильчик Е. С. и др. // Вестн. Фонда фундам. исслед. 2022. № 3. С. 47–54.

*G. S. MARSHALOVA, A. B. SUKHOTSKII, M. S. LIRA, E. S. DANIL'CHIK,
R. A. KADIROV, D. V. OSTROVSKAYA*

**NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF FIN HIGH
ON THE HEAT TRANSFER FOR AIR-COOLED HEAT EXCHANGERS
WITH AN EXHAUST SHAFT**

Summary

The article presents the results of a numerical study of heat exchange processes in a double-row finned tube bundle of air-cooled heat exchangers. Generalizing approximated equations for calculating the average heat transfer of the finned surface of tubes to air have been obtained. It is established that the smooth bundle is characterized by the greatest heat transfer related to the full finned surface of the tubes, because of increasing aerodynamic drag. At the same time, the heat transfer related to the tube surface at the base of the fins increases with growth fin's height. It is shown that for closely finned tubes, the effect of an increase in the finning coefficient is more significant than the effect of a decrease in the heat transfer coefficient with growth in finning height.