

УДК 536.25

Г. С. МАРШАЛОВА¹, М. С. ЛИРА², Е. С. ДАНИЛЬЧИК¹,
А. А. МИРОНОВ³, Р. Г. КАДЫРОВ³

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ РЕБРА НА ТЕПЛОТДАЧУ ДВУХРЯДНЫХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

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

²Белорусский государственный технологический университет

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

(Поступила в редакцию 05.07.2022)

В статье представлены результаты численного исследования влияния высоты ребра на теплоотдачу двухрядных оребренных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции при различных шагах установки труб, на основании которых получены критериальные уравнения расчета теплоотдачи в виде зависимостей $Nu = f(Gr)$. Численное моделирование проводилось с использованием газодинамического решателя Ansys Fluent. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась $k-\omega$ -модель переноса сдвиговых напряжений Менгера. Установлено, что наибольшей теплоотдачей характеризуется гладкий пучок. При этом максимальная теплоотдача, отнесенная к поверхности труб по основанию ребер, характерна для пучка с наибольшей относительной высотой ребра и коэффициентом оребрения.

Широкое применение атмосферного воздуха как доступного теплоносителя для охлаждения в различных отраслях промышленности предопределило появление ряда аппаратов воздушного охлаждения (АВО), которые по назначению делятся на охладители и конденсаторы. АВО применяются в нефтехимической, химической, газовой промышленности [1], на атомных электростанциях [2], в холодильной технике [3], в качестве калориферов в целлюлозно-бумажной промышленности [4], а также как теплообменники в системах вентиляции и отопления зданий и сооружений [5].

По данным [6] в странах СНГ эксплуатируется порядка 55000 аппаратов, установленная мощность электропривода вентилятора которых составляет около 2 млн кВт. Это свидетельствует о большом потенциале для повышения энергоэффективности за счет сокращения электропотребления АВО.

В [7; 8] для повышения эффективности работы аппаратов предлагается частичное отключение вентиляторов при снижении температуры окружающего

воздуха до определенных значений с сохранением заданного теплового режима, т. е. перевод их в режим эксплуатации при свободной конвекции. Однако существенным недостатком такого режима являются небольшие коэффициенты теплопередачи, для повышения которых используется оребрение.

Изучению теплоотдачи в режиме свободной конвекции посвящены работы [8; 9], в которых экспериментально исследованы шахматные и коридорные компоновки оребренных трубных пучков (с числом рядов $z = 1-6$) с коэффициентом оребрения $\phi = 16,8$ при различных шагах установки труб $S_1 = S_2' = 0,058-0,1$ м. В [10] рассмотрены равносторонние горизонтальные пучки ($z = 1-4$) с $\phi = 21$ при шаге $S_1 = S_2' = 0,058$ м без учета влияния шага расположения труб в многорядных пучках.

В [11] исследовано влияние высоты ребра на теплоотдачу однорядного пучка с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1 / d = 1,14 = \text{const}$ (d – диаметр трубы с оребрением) в режиме свободной конвекции.

В [8] установлено, что характер зависимости теплоотдачи однорядных трубных пучков от поперечного шага принципиально отличается от качественно более или менее схожих зависимостей для пучков с другим числом рядов.

Таким образом, в существующих исследованиях свободноконвективного режима не дана оценка влияния высоты ребра на теплоотдачу многорядных трубных пучков, которая будет существенно отличаться от однорядных пучков.

Цель работы – численное исследование влияния высоты ребра на теплоотдачу двухрядных оребренных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции при различных шагах установки труб.

Численные исследования проводились для шахматного двухрядного пучка, состоящего из оребренных 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 $d_0 = d - 2h = 0,0264$ м; толщина ребра $\Delta = 0,00055$ м; коэффициент оребрения $\phi = 1-21$. Исследования проводились для различных относительных поперечных шагов $\sigma_1 = S_1 / d = 1,02-1,23$; $\sigma_2 = S_2 / d = 0,88-1,07$ (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Характеристики двухрядных пучков различных типов

Тип пучка	Параметры труб пучка			$S_1, \text{ м}$			$S_2, \text{ м}$		
	$h, \text{ мм}$	h / s	ϕ	$\sigma_1 = 1,02$	$\sigma_1 = 1,13$	$\sigma_1 = 1,23$	$\sigma_2 = 0,884$	$\sigma_2 = 0,976$	$\sigma_2 = 1,067$
I	15,2	6,26	21	0,058	0,064	0,070	0,05	0,055	0,061
II	11,7	4,8	15	0,051	0,056	0,061	0,044	0,048	0,053
III	7,8	3,2	9	0,043	0,047	0,052	0,037	0,041	0,045
IV	4	1,64	5	0,035	0,039	0,042	0,03	0,034	0,037
V	0	0	1	0,027	0,0298	0,033	0,023	0,026	0,028

Верификация расчетных алгоритмов для численного моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований проводилась для двухрядных шахматных пучков с поперечными шагами установки труб $S_1 = 58, 64$,

70 мм, в режиме свободной конвекции. Коэффициент оребрения составлял $\varphi = 21$, высота ребра – $h = 15,2$ мм и $h/s = 6,26$ (s – межреберный шаг).

Для подготовки расчетной сетки был использован пакет Ansys Meshing, который позволяет подготовить сетку с необходимым качеством и достаточным количеством конечных элементов. Численное моделирование проводилось при помощи пакета Ansys Fluent 19.1.

Для численного моделирования была использована трехмерная постановка задачи. Размеры расчетной области составляли $8,38 \times 2,5848 \times 0,00972$ м. Вычисления выполнялись на неструктурированной сетке. Для описания расчетной области потребовалось 3517477 ячеек.

В начале по всей расчетной области установлены статическое давление $P = 101325$ Па и температура воздуха $T_{\text{вх}} = t_0$. Для моделирования теплопередачи от ребер труб к воздуху решалась сопряженная задача.

Плотность воздуха задавалась по закону идеального газа, теплопроводность – полиномом, динамическая вязкость рассчитывалась по Сазерленду.

В процессе решения сходимость задачи контролировалась уровнем погрешности: для давления и скоростей (уравнения Навье–Стокса и неразрывности) минимальный уровень погрешности составлял 10^{-3} , для температуры (уравнение энергии) – 10^{-5} . Обычно расчеты прекращались по достижении погрешности для поправок давления 10^{-4} , для температуры (уравнение энергии) – 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 формирующейся за трубами отрывной зоны использовалась $k-\omega$ SST-модель турбулентности [12]. Случай максимального расхода соответствовал переходному режиму от ламинарного течения к турбулентному.

Сравнение численных и экспериментальных данных проводилось по средней температуре на ребре калориметра каждого ряда пучка t_i и представлено на рис. 1.

Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (погрешность не превышает 5 %), и в дальнейшем разработанная методика может быть использована для расширения границ эксперимента и визуализации структуры течения в многорядных пучках труб с различными компоновками.

Численное исследование теплогидравлической эффективности и следа за пучками в режиме свободной конвекции проведено для пяти типов (табл. 1) двухрядных шахматных пучков с различной высотой ребра труб $h = 0-15,2$ мм при относительных шагах $\sigma_1 = S_1/d = 1,02; 1,13; 1,23$.

Полученные численные данные по теплоотдаче двухрядного пучка при различных поперечных шагах установки труб на рис. 2, с отклонением, не превышающим ± 5 %, аппроксимированы функцией вида

$$Nu = A Gr^n, \quad (1)$$

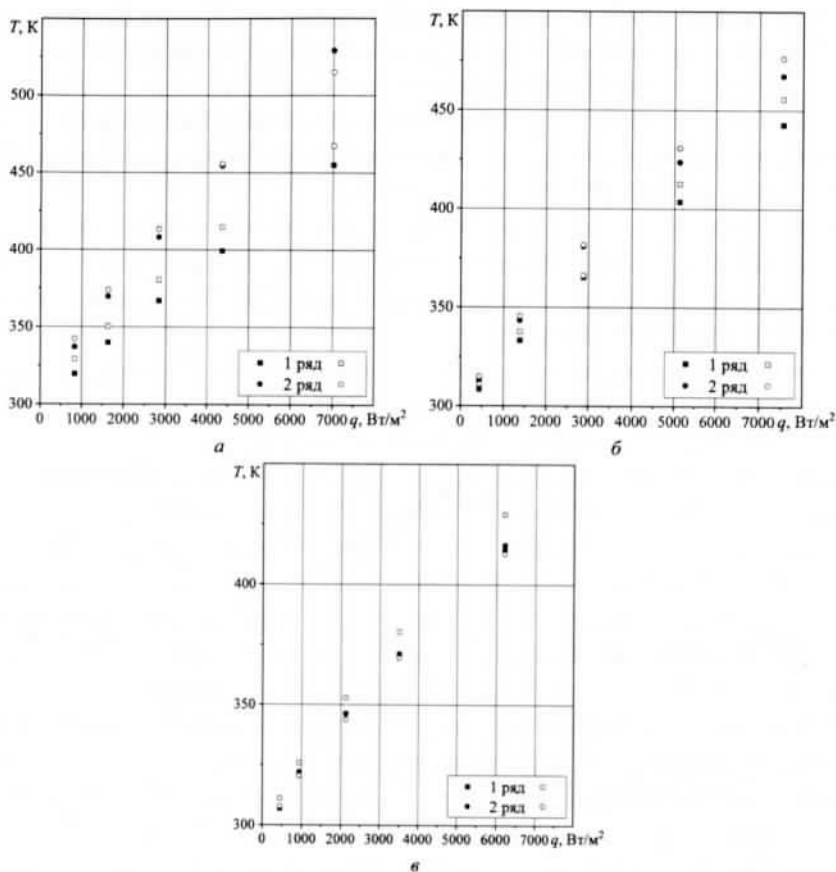


Рис. 1. Сравнение результатов эксперимента (закрашенные точки) и численного моделирования (незакрашенные точки) для а) $\sigma_1 = 1,02$; б) $\sigma_1 = 1,13$; в) $\sigma_1 = 1,23$

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda},$$

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

где Nu – число Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи пучка, $Вт/(м^2\text{°C})$; λ – теплопроводность, $Вт/(м\text{°C})$; Gr – число Грасгофа; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; β – коэффициент объемного расширения, °C^{-1} ; $t_{ст}$ – температура стенки калориметрической трубы у основания, °C ; t_0 – температура окружающего воздуха, °C ; ν – коэффициент кинематической вязкости $м^2/с$.

Определяющей температурой для теплофизических параметров является температура окружающей среды t_0 , определяющим размером – диаметр трубы по основанию d_0 .

Значения постоянных A , n в (1) и диапазоны применимости по Gr для теплоотдачи двухрядных пучков в режиме свободной конвекции представлены в табл. 2. При этом коэффициент A отражает темп роста, а n – изменение темпа роста функции $Nu = Nu(Gr)$.

Т а б л и ц а 2. Значения постоянных A , n в (1) и диапазоны применимости по Gr для теплоотдачи двухрядных пучков в режиме свободной конвекции

Тип пучка	I	II	III	IV	V
$\sigma_1 = S_1 / d = 1,02$					
A	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$
n	0,48	0,4	0,38	0,36	0,3
Диапазон $Gr \cdot 10^{-5}$	1,2–6,1	1,2–6,6	1,1–6,8	1,5–8	1,3–7
$\sigma_1 = 1,13$					
A	0,008	0,0111	0,014	0,058	0,373
n	0,42	0,4	0,39	0,3	0,25
Диапазон $Gr \cdot 10^{-5}$	0,6–5,8	0,71–6,77	0,94–8,55	1,17–7,88	1–8
$\sigma_1 = 1,23$					
A	0,0184	0,0218	0,0325	0,072	0,46
n	0,37	0,36	0,34	0,3	0,25
Диапазон $Gr \cdot 10^{-5}$	0,51–5	0,62–6	0,75–7,4	0,97–10	1,19–12,3

Из представленных на рис. 2 данных видно, что для всех исследуемых шагов наибольшей теплоотдачей характеризуется гладкий пучок (тип V). Это связано с тем, что при малых шагах оребрения наличие ребер приводит к ухудшению обтекаемости труб, а также «запиранию» воздуха в межреберном пространстве, которое возрастает с увеличением высоты ребра.

Полученные в результате исследования данные (рис. 2 и табл. 2) показывают, что больший темп роста и изменение темпа роста характерны для сжатых пучков с высокой относительной высотой оребрения h/s . Это объясняется увеличивающейся подъемной силой пропорциональной разности температур $(t_{ct} - t_0)$, которая неспособна удерживать постоянной степень роста скорости обтекания межреберного пространства из-за усиливающегося аэродинамического сопротивления.

Тепловая эффективность пучка определяется не только теплоотдачей, но и площадью теплообменной поверхности. Поэтому для оценки влияния относительной высоты ребра труб h/s на интенсивность теплоотдачи двухрядного пучка в режиме свободной конвекции и сопоставления различных типов пучков по тепловой эффективности при постоянном числе Грасгофа $Gr = 250000$, были построены зависимости $Nu = Nu(h/s)$, $(Nu \varphi) = Nu\varphi(h/s)$, представленные на рис. 3.

Для всех исследуемых шагов характерно снижение теплоотдачи с повышением высоты ребра. Это связано с предварительным нагревом поступающего воздуха и снижением разности температур между окружающей средой и оребренной

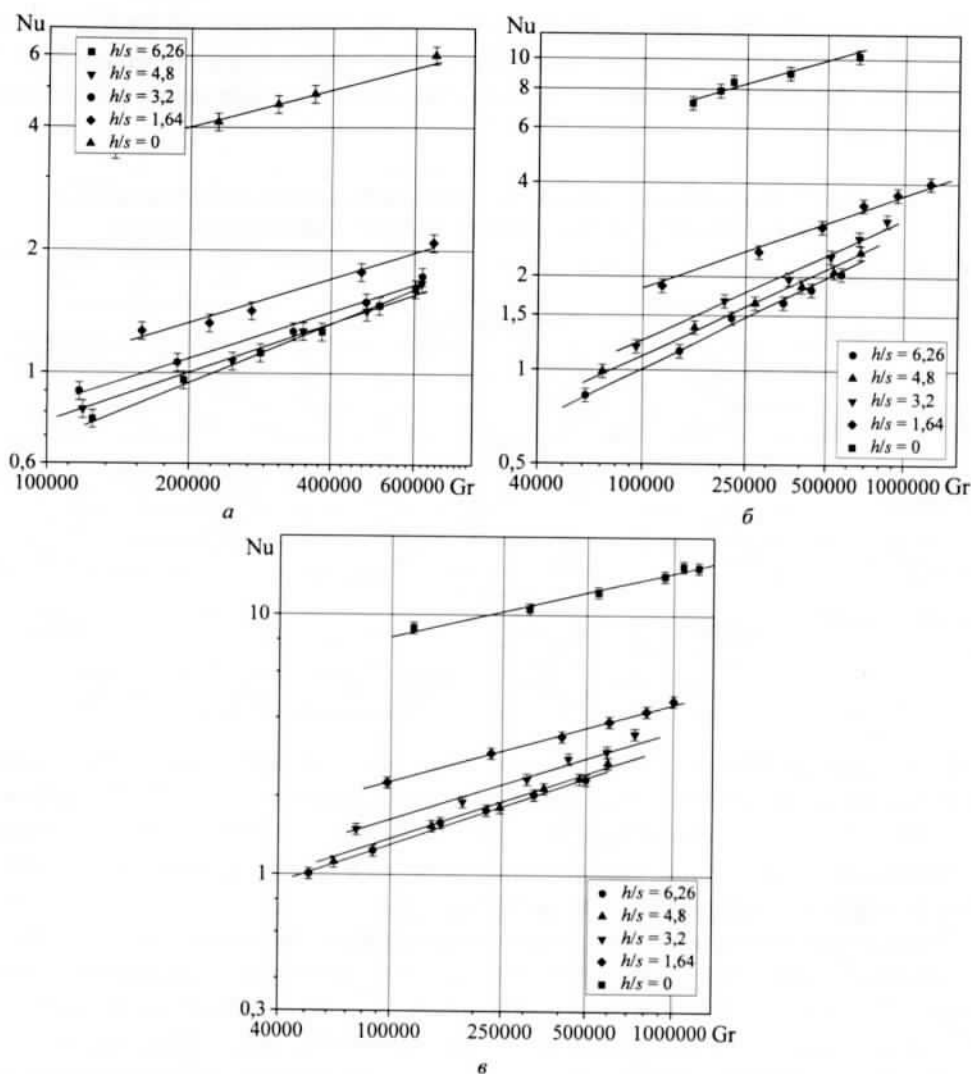


Рис. 2. Теплоотдача двухрядных трубных пучков при различных поперечных шагах установки труб: а) $\sigma_1 = 1,02$, б) $\sigma_1 = 1,13$, в) $\sigma_1 = 1,23$ в режиме свободной конвекции

трубой. Малое расстояние между ребрами усиливает негативное влияние оребрения.

Данные на рис. 3, а свидетельствуют, что для всех шагов характерны стремительное падение теплоотдачи с появлением оребрения, а также плавное снижение при $h/s > 2$ – для $\sigma_1 = 1,02$; $h/s > 3,2$ – для $\sigma_1 = 1,13$; $h/s > 4,8$ – для $\sigma_1 = 1,23$. Таким образом, негативное влияние от повышения относительной высоты оребрения увеличивается с ростом поперечного шага установки труб.

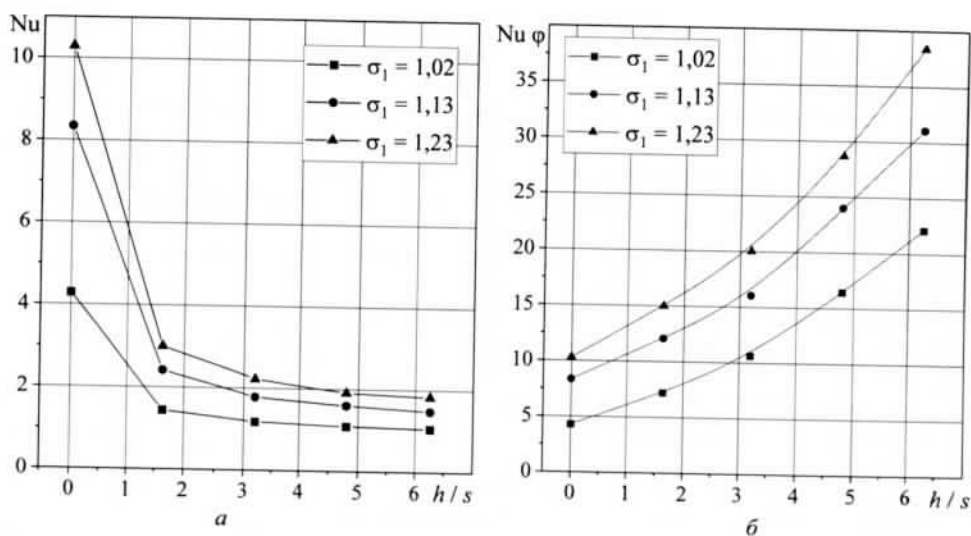


Рис. 3. Влияние относительной высоты ребра на интенсивность теплоотдачи двухрядного пучка в режиме свободной конвекции, отнесенной к полной оребренной поверхности труб (а) и к поверхности труб по основанию ребер при $Gr = 250000$ (б)

Из представленных на рис. 3, б данных получено, что для двухрядного пучка наибольшая теплоотдача, отнесенная к поверхности труб по основанию ребер, характерна для пучка I-го типа с наибольшей относительной высотой ребра и коэффициентом оребрения ($h/s = 6,26$, $\phi = 21$), величина которого больше для пучка II-го типа в 1,2–1,3 раза, III-го типа – в 1,9–2 раза; IV-го типа – в 2,5–3 раза и V-го типа – в 3,7–5,2 раза. При этом для более тесных пучков повышение теплоотдачи, отнесенной к поверхности труб выше, чем для разреженных.

Заключение. Численно исследовано влияние высоты оребрения на теплоотдачу двухрядных оребренных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции. Полученные результаты обработаны в виде $Nu = f(Gr)$.

Для всех исследуемых шагов установлено, что наибольшей теплоотдачей характеризуется гладкий пучок. При этом наибольшая теплоотдача, отнесенная к поверхности труб по основанию ребер, характерна для пучка с наибольшей относительной высотой ребра и коэффициентом оребрения ($h/s = 6,26$, $\phi = 21$).

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № T21PM-019 и Ф21MC-011) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-58-04002).

Литература

1. Бессонный А. Н., Кунтыш В. Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Недра, 1996. – 512 с.

2. Зорин В. М. Атомные электростанции. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 672 с.
3. Thangavel P., Deera D., Somasundaram P., Selvakumar P. // International Review of Mechanical Engineering. 2014. Vol. 8, N 3. P. 530–536.
4. Кунтыш В. Б., Позднякова А. В., Мелехов В. И. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 2. С. 116–121.
5. Гусев В. М., Ковалев Н. И., Попов В. П., Потрошков В. А. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Л., 1981. – 343 с.
6. Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Филатов С. О., Жданович А. Ю. // Химическая техника. 2013. № 1. С. 40–43.
7. Аппарат воздушного охлаждения: полез. модель ВУ 9446 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалиев, В. П. Мулин. – Опубл. 30.08.2013.
8. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 1999. – 176 с.
9. Позднякова А. В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2003. – 19 с.
10. Маршалова Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2019. – 153 с.
11. Данильчик Е. С., Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б. // Изв. высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 5. С. 128–141.
12. 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.

G. S. MARSHALOVA, M. S. LIRA, E. S. DANIL'CHIK, A. A. MIRONOV, R. A. KADIROV

NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF FIN HIGH ON THE HEAT TRANSFER FOR DOUBLE-ROW TUBE BUNDLES OF AIR-COOLED APPARATUSES IN THE FREE CONVECTION

Summary

The article presents the numerical simulation results of the effect of fin high on the heat transfer for double-row tube bundles of air-cooled apparatuses in the free convection at various tube installation steps have been carried out, on the basis of which the criterion equations for calculating heat transfer in the form of dependencies $Nu = f(Gr)$ have been obtained. Numerical simulation used a gas dynamic solver Ansys Fluent. Menter's shear stress transport $k-\omega$ model was invited to close the Reynolds equations. The obtained numerical results allowed us to visualize air flow in the bundle and the exhaust shaft, as well as to establish an inhomogeneous distribution of velocities and temperatures. We established that the bare-tube bundle is characterized by the greatest heat transfer. At the same time, the maximum heat transfer attributed to the tube surface along the base of the fins is characteristic of the bundle with the highest relative fin height and finning coefficient.