

УДК 536.25:620.98

А. Б. СУХОЦКИЙ<sup>1</sup>, Е. С. ДАНИЛЬЧИК<sup>2</sup>, Г. С. МАРШАЛОВА<sup>2</sup>

## ВЛИЯНИЕ МЕЖТРУБНОГО ШАГА НА КОНВЕКТИВНУЮ ТЕПЛОТДАЧУ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМОГО ПУЧКА С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 18.05.2020)

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в режиме свободной и смешанной конвекции воздуха для четырехрядных трубных пучков шахматной равносторонней компоновки с поперечными шагами установки труб 58, 64 и 70 мм, на основании которых получены критериальные уравнения в виде зависимостей  $Nu = f(Gr)$ . Установлено, что из-за высокого аэродинамического сопротивления и низкой эффективности верхних рядов теплоотдача в четырехрядном пучке с вытяжной шахтой меньше, чем в однорядном пучке. С увеличением межтрубного шага теплоотдача четырехрядного пучка растет и достигает максимума при  $S_1 > 70$  мм.*

Применение воздухоохлаждаемых теплообменников (ВОТ) в различных отраслях промышленности находит все более активное распространение благодаря их экологичности и отсутствию потребности в охлаждающей воде. ВОТ широко используются в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и пищевой промышленности, также на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях, в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике, на атомных станциях [1].

Тепловая мощность ВОТ во многом определяется характеристиками движения потока охлаждающего воздуха через него, который может быть организован с потреблением электроэнергии посредством вентилятора или в энергосберегающем режиме – свободной конвекцией. К сожалению, область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение ВОТ в условиях свободной конвекции, ограничена. Низкая интенсивность теплообмена по сравнению с вынужденной конвекцией является основным недостатком свободно-конвективного режима, который обычно компенсируется увеличением теплоотдающей площади, а именно увеличением поверхности теплообмена.

При оснащении ВОТ дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию, теплопроизводительность теплообменника может быть значительно увеличена. Одним из таких устройств, не потребляющим

энергию, является вытяжная шахта, установленная над ВОТ для увеличения расхода охлаждающего воздуха.

Однако теплоотдача оребренных трубных пучков в условиях свободной конвекции является недостаточно изученной. Это объясняется сложностью процессов теплообмена при свободной конвекции [2; 3], особенно на ребристых поверхностях, где присутствует сопряженный теплообмен, и по этой причине становится невозможным применение теоретических методов описания и расчета в виду их громоздкости, неточности, сложности и в некоторых случаях неосуществимости [4]. Теплоотдача при свободной конвекции рассмотрена для одиночных гладких труб и гладких пучков [5; 6], одиночных оребренных труб, однорядных и многорядных ребристых пучков [7–11].

Исследования пучков горизонтальных гладких [2–5] труб при свободной конвекции жидкости показали, что течение, создаваемое нижними поверхностями, превращается в течение следа. Скорость следа стремится увеличить теплоотдачу от поверхности, но нагретый след уменьшает эффективную местную разность температур между поверхностью и омывающей ее жидкостью, а это уменьшает теплоотдачу. Таким образом, воздействия скорости течения и температуры противоположны друг другу. Уменьшение поперечного шага, как правило, приводит к снижению теплоотдачи, так как возрастает сопротивление движению жидкости, расход снижается, а температура потока повышается. С увеличением продольного шага растет высота вытесняемой нагретой жидкости, а значит и ее скорость. Пучки с широкими шагами (в два раза больше диаметра) могут примерно рассчитываться по данным одиночной трубы.

В [12] приведены результаты исследования теплоотдачи однорядного горизонтального пучка ребристых труб с коэффициентом оребрения  $\phi = 21$  для межтрубных шагов  $S = 58, 61, 64, 70$  мм ( $S/d = 1,036-1,25$ ) при свободной конвекции и интенсифицированной свободной конвекции (смешанной конвекции) с помощью вытяжной шахты. В результате анализа полученных экспериментальных данных у авторов сформировалась определенная физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный оребренный пучок. Поток воздуха, проходящий через пучок, условно можно разделить на три части: межреберный, обтекающий и межтрубный.

Межреберный поток движется в полостях между ребрами трубы и за счет большой поверхности контакта имеет наибольший отбор тепла и, соответственно, максимальное повышение температуры. При этом он обладает также максимальной подъемной силой, обусловленной низкой весовой плотностью, но из-за малого проходного сечения этот поток воспринимает максимальное сопротивление движению. Обтекающий поток нагревается за счет взаимодействия с поверхностью торцов ребер и смешивается с межреберным потоком. Его поведение и характеристики во многом идентичны с потоком, обтекающим гладкую трубу с диаметром, равным диаметру оребрения экспериментальной трубы. Сопротивление его движению главным образом оказывает взаимодействие с межтрубным

потоком воздуха. Межтрубный поток, по сути, является паразитным, так как практически неподвижен при свободной конвекции, препятствует движению обтекающего потока и непосредственно не участвует в охлаждении трубного пучка. При установке над пучком вытяжной шахты, межтрубный поток движется за счет подъемной тяги, создаваемой ею.

При свободной конвекции воздуха без установки вытяжной шахты максимум интенсивности теплоотдачи достигается при поперечных шагах 61 и 64 мм. При больших поперечных шагах дополнительное аэродинамическое сопротивление движению обтекающего потока создает практически неподвижный межтрубный поток и обтекание трубы воздухом аналогично обтеканию одиночной трубы. При уменьшении шага снижается межтрубное поперечное сечение и соответственно уменьшается влияние паразитного межтрубного потока. При оптимальных шагах (61–64 мм) межтрубный холодный поток отсутствует, обтекающий поток соседних труб объединяется в единый поток. При малых же поперечных шагах обтекающий поток оказывается зажатым между трубами и его расход снижается, что ведет к снижению теплоотдачи ниже, чем теплоотдача у одиночной трубы (при  $S/d \leq 1,036$ ).

Установлено, что теплообменные процессы для интенсифицированной свободной конвекции существенно зависят от аэродинамического сопротивления вытяжной шахты (главным образом диаметра). Например, пучок с шагом  $S_1 = 70$  мм обладает незначительным аэродинамическим сопротивлением, а при установке над ним вытяжной шахты с более высоким аэродинамическим сопротивлением и низкой гравитационной тягой (небольшой высотой) создается подпор, который приводит к росту давления за пучком выше атмосферного, т. е. создаются условия, при которых перепад давления воздуха на пучке становится отрицательным. В результате вытяжная шахта снижает расход межреберного и обтекающего потока воздуха, так что теплоотдача пучка становится ниже, чем теплоотдача при свободной конвекции (без установки над ним шахты). Дальнейшее увеличение высоты шахты приводит к снижению давления за пучком, росту межреберного и обтекающего потока воздуха, увеличению теплоотдачи пучком.

В [8] проведено исследование свободно-конвективной теплоотдачи семи опытных моделей горизонтальных четырехрядных равносторонних шахматных пучков из труб с коэффициентом оребрения  $\phi = 16,8$  (диаметр оребрения  $d = 55,6$  мм) с межтрубными шагами  $S = 58, 61, 64, 70, 76, 86, 100$  мм. Средняя теплоотдача пучков достаточно быстро повышалась в диапазоне шага от 58 до 70 мм (в 2,3 раза), так как разгон потока усиливался из-за уменьшения сопротивления движению воздуха. При шагах от 64 до 100 мм темп роста теплоотдачи (в 1,3 раза) несколько уменьшался. При любом шаге труб, чем больше номер поперечного ряда, тем ниже его теплоотдача. По отношению к первому ряду теплоотдача второго ниже на 6–50 %, третьего – на 15–65 %, четвертого – на 20–80 %. В целом при увеличении шага наблюдается тенденция к выравниванию теплоотдачи по рядам, что объясняется возрастанием скорости потока воздуха и уменьшением его подогрева.

Таким образом, можно сделать вывод, что на основе проведенных исследований [2–12] сформировались ясные представления о влиянии межтрубного шага на теплоотдачу однорядного оребренного пучка без и с вытяжной шахтой. Однако имеющиеся экспериментальные данные не позволяют сформулировать однозначное мнение о влиянии межтрубного шага многорядного оребренного пучка с шахтой на эффективность теплообмена.

Цель настоящей работы – экспериментальные исследования влияния межтрубного шага четырехрядного пучка с вытяжной шахтой на свободно-конвективный теплообмен.

В качестве экспериментальных образцов были выбраны три четырехрядных шахматных пучка с равносторонней компоновкой (межтрубный шаг  $S_1 = 58, 64$  и  $70$  мм), собранные из оребренных труб со следующими параметрами: диаметр винтового оребрения  $d = 0,0568$  м; диаметр трубы по основанию  $d_0 = 0,0264$  м; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно  $h = 0,0152$  м;  $s = 0,00243$  м;  $\Delta = 0,00055$  м; теплоотдающая длина оребрения трубы  $l = 0,3$  м; общая длина оребренной трубы  $0,33$  м. Коэффициент оребрения трубы составил  $\phi = 21$ . Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – сталь.

На первом этапе проводились экспериментальные исследования теплоотдачи свободной конвекцией пучков к воздуху. Схема экспериментальной установки, аппаратное оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [13; 14].

Экспериментальные данные (рис. 1) обрабатывали и представляли в безразмерном виде – в числах Нуссельта  $Nu = \alpha_k d_0 / \lambda$  и Грасгофа  $Gr = \beta g d_0^3 (t_{ct} - t_0) / \nu^2$ , где  $\alpha_k$  – конвективный приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta = 1 / (t_0 + 273)$  – коэффициент температурного расширения воздуха, 1 / °С. Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К) и кинематической вязкости  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с принимали по температуре окружающей среды  $t_0 = 16–25$  °С.

Во время экспериментального исследования средняя температура стенки у основания ребер составляла  $t_{ct} = 34–180$  °С.

В результате обобщения экспериментальных данных с отклонением, не превышающим 5 %, получено уравнение

$$Nu^0 = A Gr^n (1 - \exp(-6,6 \cdot 10^5 / Gr)), \quad (1)$$

где  $A, n$  – коэффициенты пропорциональности и степенной (для  $S_1 = 58$  мм –  $A = 0,00181, n = 0,48$ ; для  $S_1 = 64$  мм –  $A = 0,00449, n = 0,44$ ; для  $S_1 = 70$  мм –  $A = 0,00644, n = 0,43$ ).

Уравнение (1) для четырехрядных пучков действительно в интервале изменения  $Gr = 37500–350000$ .

Для сравнительного анализа влияния поперечного шага установки труб на рис. 2 представлена зависимость  $Nu^0 = f(S_1)$  при  $Gr = 100000$  для однорядного

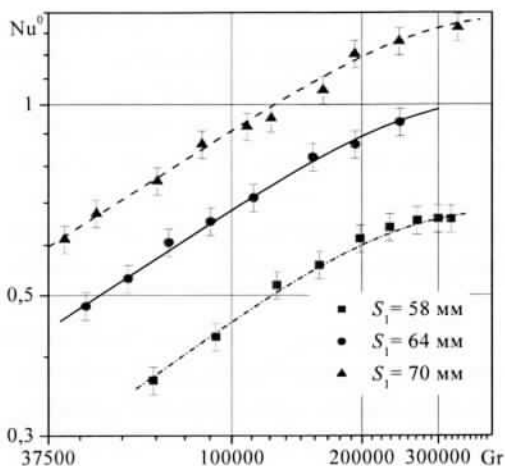


Рис. 1. Теплоотдача в режиме свободной конвекции воздуха четырехрядных горизонтальных пучков с различными поперечными шагами установки ребренных труб

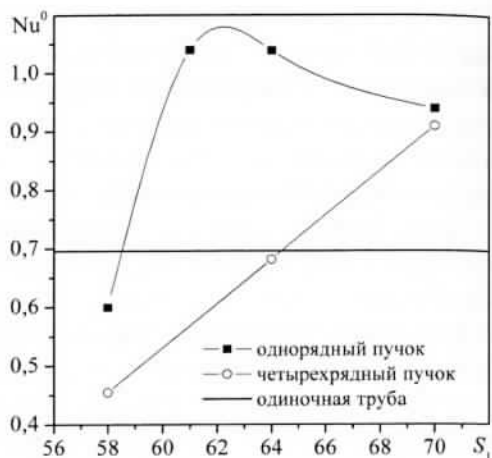


Рис. 2. Влияние на теплоотдачу однорядного и четырехрядного горизонтальных ребренных пучков поперечного шага установки труб в режиме свободной конвекции воздуха

и четырехрядного пучков. Экспериментальные данные для однорядного пучка из исследуемых ребренных труб были получены ранее и представлены в [12]. Пунктирной линией показано значение числа Нуссельта  $Nu^0 = 0,696$  для одиночной ребренной трубы при  $Gr = 100000$  [13; 14].

Как видно из рис. 2, при малых межтрубных шагах число Нуссельта однорядного и четырехрядного пучков ниже, чем у одиночной трубы. Это обусловлено высоким аэродинамическим сопротивлением пучка. При этом при  $S_1 < 70$  мм число Нуссельта четырехрядного пучка меньше, чем у однорядного. При увеличении межтрубного шага теплоотдача растет и достигает максимума (более чем в 1,5 раза по сравнению с одиночной трубой) при  $S_1 = 62$  мм для однорядного пучка и при  $S_1 > 70$  мм для четырехрядного пучка (в пределах исследований максимум не достигнут). При дальнейшем увеличении межтрубных шагов теплоотдающие характеристики труб пучков снижаются и стремятся к характеристикам одиночной трубы  $Nu^0 = 0,696$ .

На втором этапе экспериментальных исследований над пучками устанавливались теплоизолированные вытяжные шахты высотой  $H = 0,52$  м, шириной 0,3 м и длиной, равной габаритной длине пучка (0,348; 0,384; 0,42 м). Для изменения аэродинамического сопротивления вытяжной шахты на шахту устанавливалась крышка с отверстием площадью  $f_{отв}$  (0,0087; 0,0147; 0,02; 0,033; 0,05; 0,069 м<sup>2</sup>). Также проводились исследования с шахтой без крышки. На рис. 3 представлены результаты исследования теплоотдачи четырехрядных равносторонних пучков с различными поперечными шагами: а) для  $S_1 = 0,058$  м; б) для  $S_1 = 0,064$  м; в) для  $S_1 = 0,070$  м.

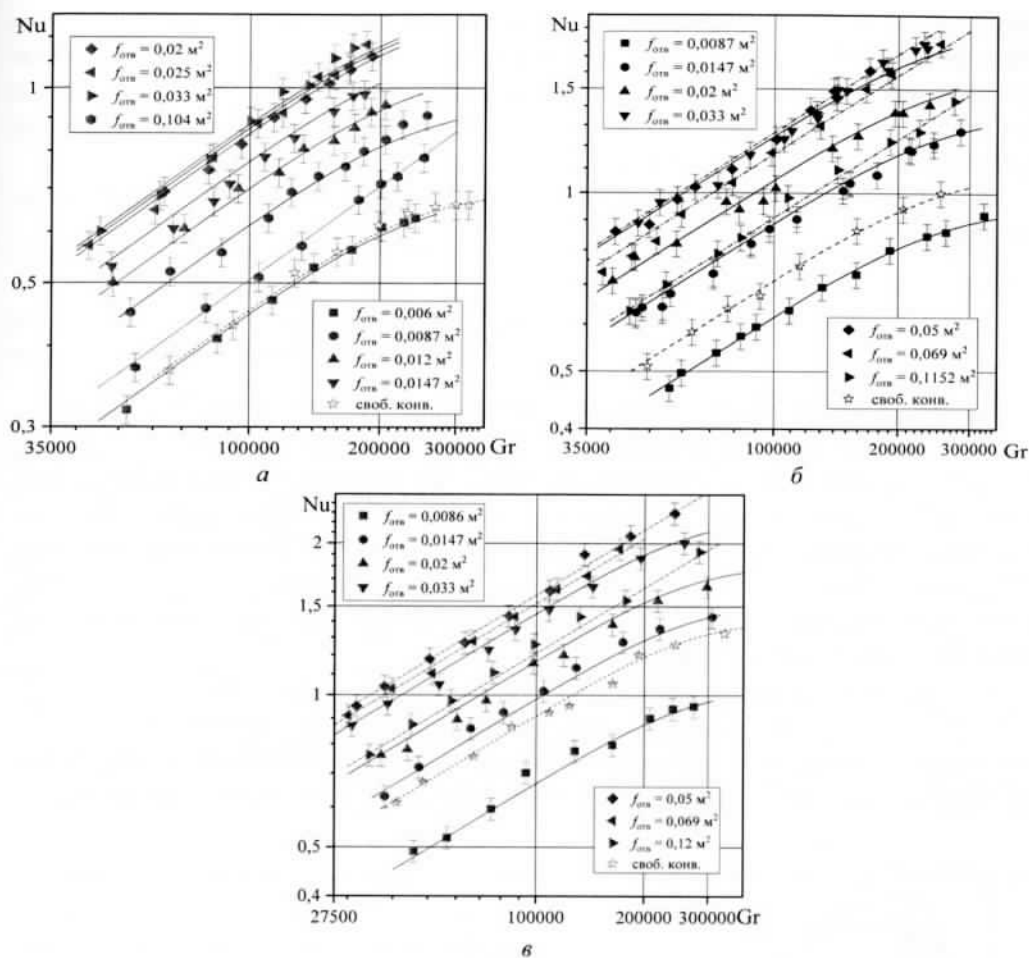


Рис. 3. Теплоотдача четырехрядных равносторонних пучков с различными поперечными шагами в режиме смешанной конвекции: а)  $S_1 = 0,058$  м; б)  $S_1 = 0,064$  м; в)  $S_1 = 0,070$  м при различных диаметрах выходных отверстий вытяжной шахты

На рис. 3 экспериментальные данные аппроксимированы функцией вида

$$Nu = C_S Nu^0 = C_S A Gr^n (1 - \exp(-6,6 \cdot 10^5 / Gr)),$$

$$C_S = Nu / Nu^0 = \left( 1 + \exp\left( -\frac{\chi}{\chi^{opt} - \chi^0} \right) \left( \frac{\chi}{\chi^0} - 1 \right) \right),$$

где  $C_S$  – коэффициент межтрубного шага;  $\chi = f_{отв} / f_{фр}$  – коэффициент сужения площади отверстия крышки;  $f_{фр} = S_1 n l$  – площадь фронтального сечения пучка, м<sup>2</sup>;  $\chi^0$  – нулевой коэффициент сужения площади отверстия крышки, при котором

значение числа Нуссельта равно значению при свободной конвекции пучка ( $Nu = Nu^0$ ,  $C_s = 1$ );  $\chi^{opt}$  – оптимальный коэффициент сужения площади отверстия крышки, при котором значение числа Нуссельта максимально ( $Nu = Nu_{max}$ ) (для  $S_1 = 58$  мм –  $\chi^0 = 0,137$ ,  $\chi^{opt} = 0,613$ ; для  $S_1 = 64$  мм –  $\chi^0 = 0,177$ ,  $\chi^{opt} = 0,733$ ; для  $S_1 = 70$  мм –  $\chi^0 = 0,192$ ,  $\chi^{opt} = 0,767$ ).

Максимальное значение коэффициента межтрубного шага можно определить по формуле

$$C_s^{max} = \left( 1 + \exp \left( -\frac{\chi^{opt}}{\chi^{opt} - \chi^0} \right) \left( \frac{\chi^{opt}}{\chi^0} - 1 \right) \right).$$

На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов межтрубного шага  $C_s$  и коэффициента пропорциональности  $AC_s$  от коэффициента сужения площади отверстия крышки. На рисунке видно, что с увеличением площади отверстия растет теплоотдача пучка. Это обусловлено снижением аэродинамического сопротивления шахты и ростом расхода потока через пучок. Но после достижения  $\chi^{opt}$  теплоотдача снижается из-за обратных потоков холодного воздуха в шахту (гейзерных течений), а теплоотдача пучка стремится к теплоотдаче пучка при свободной конвекции воздуха ( $C_s \rightarrow 1$ ).

На рис. 5 представлены зависимости теплоотдачи однорядного и четырехрядного трубных пучков с шахтой от межтрубного шага при числе Грасгофа  $Gr = 10^5$ . Как видно, теплоотдача однорядного пучка для исследованных межтрубных шагов значительно больше, чем у четырехрядного. При этом с увеличением

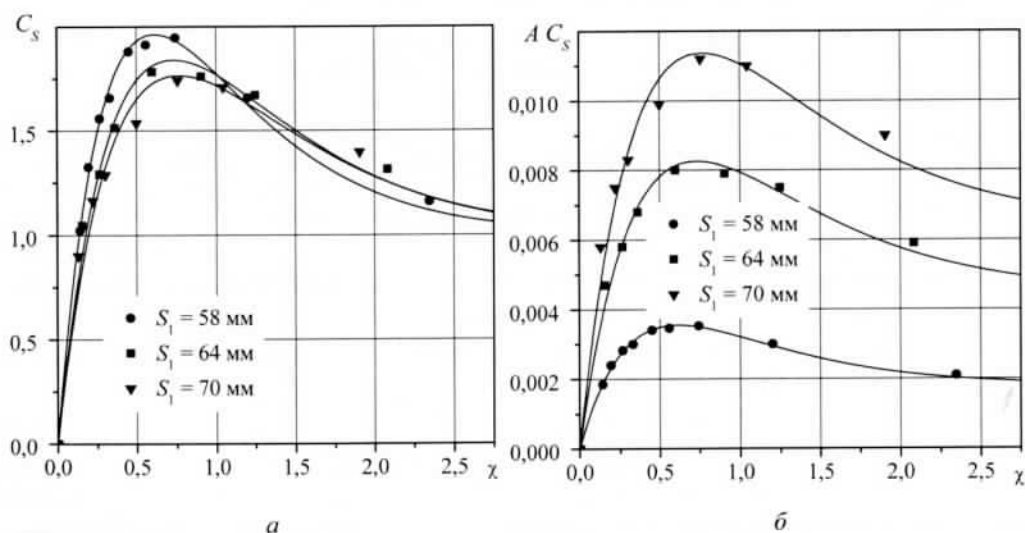


Рис. 4. Зависимости коэффициентов межтрубного шага  $C_s$  (а) и коэффициента пропорциональности  $AC_s$  (б) от коэффициента сужения площади отверстия крышки

межтрубного шага теплоотдача однорядного пучка уменьшается, а четырехрядного – увеличивается. Это обусловлено тем, что эффективность установки вытяжной шахты определяется разностью гравитационного давления  $\Delta p_{\text{ш}}^{\text{гп}}$  и аэродинамических потерь при движении потока воздуха в шахте  $\Delta p_{\text{ш}}^{\text{сop}}$  [12]

$$\Delta p_{\text{ш}}^{\text{эф}} = \Delta p_{\text{ш}}^{\text{гп}} - \Delta p_{\text{ш}}^{\text{сop}} = (H + h_{\text{д}})g(\rho_0 - \rho_{\text{ш}}) - \text{Eu}_{\text{ш}}\rho_{\text{ш}}w_{\text{отв}}^2,$$

где  $h_{\text{д}}$  – высота области нагретого воздуха над шахтой;  $\rho_0, \rho_{\text{ш}}$  – плотности воздуха в окружающей среде и шахте,  $\text{кг/м}^3$ , определенные, соответственно, по температурам  $t_0, t_{\text{ш}}$ ;  $\text{Eu}_{\text{ш}}$  – число Эйлера для вытяжной шахты, обусловленное сжатием, трением и расширением потока воздуха в канале шахты.

Низкая теплоотдача четырехрядного пучка обусловлена, прежде всего, его высоким аэродинамическим сопротивлением и, как следствие, низким расходом воздуха через него. Кроме того, высокой температурой воздуха у верхних рядов, что также снижает эффективность съема тепла.

С увеличением межтрубного шага аэродинамическое сопротивление однорядного пучка снижается. Но при этом расход воздуха существенно не увеличивается, так как снижается температура потока воздуха в шахте и растет аэродинамическое сопротивление шахты. Однако при этом происходит перераспределение потоков – увеличивается доля межтрубного (паразитного потока), а доля обтекающего потока снижается (рис. 5). В результате теплоотдача пучка резко снижается и стремится к теплоотдаче одиночной трубы  $\text{Nu} = 0,696$ .

С увеличением межтрубного шага аэродинамическое сопротивление четырехрядного пучка также снижается. Но при этом, по сравнению с однорядным пучком, расход воздуха растет более существенно, так как аэродинамическое сопротивление шахты по сравнению с аэродинамическим сопротивлением четырехрядного пучка менее значимо, а тепловая мощность четырехрядного пучка более существенна. В результате, несмотря на снижение эффективности первого трубного ряда теплоотдача остальных рядов увеличивается, что приводит к незначительному росту числа Нуссельта всего пучка (рис. 5).

На рис. 6 представлены рассчитанные по (1) зависимости теплоотдачи четырехрядных трубных пучков с равносторонней компоновкой труб и различными межтрубными шагами  $S_1 = 58$ ,

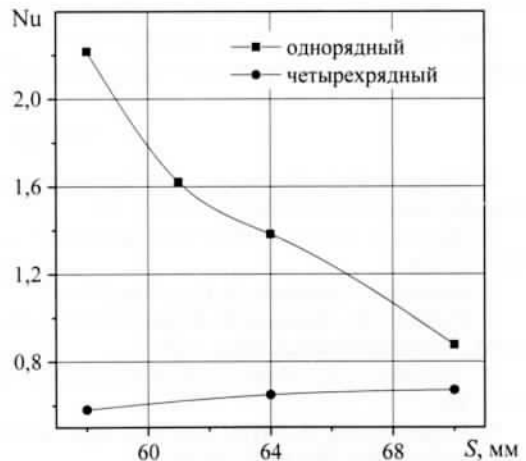


Рис. 5. Зависимости теплоотдачи однорядного и четырехрядного трубных пучков с крышкой на шахте с площадью отверстия  $f_{\text{отв}} = 0,0087 \text{ м}^2$  от межтрубного шага при числе Грасгофа  $\text{Gr} = 10^5$



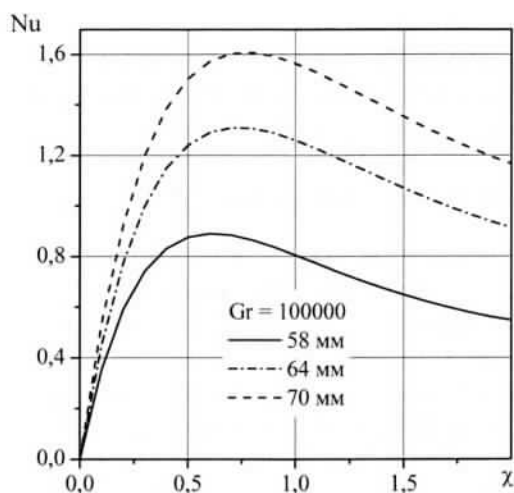


Рис. 6. Зависимости теплоотдачи четырехрядных трубных пучков с равносторонней компоновкой труб и различными межтрубными шагами  $S_1$  от коэффициента сужения площади отверстия крышки вытяжной шахты при числе Грасгофа  $Gr = 10^5$

противления и низкой эффективности верхних рядов теплоотдача в четырехрядном пучке с вытяжной шахтой меньше, чем в однорядном пучке. С увеличением межтрубного шага теплоотдача четырехрядного пучка растет и достигает максимума при  $S_1 > 70$  мм. Причем максимум теплоотдачи смещается в сторону с большим отверстием крышки вытяжной шахты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т19РМ-076).

## Литература

1. Кунтыш В. Б., Бессонный А. Н. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников. СПб.: Недра, 2000. – 300 с.
2. Jaluria Y. Natural Convection: Heat and Mass Transfer. Oxford; New York: Pergamon Press, 1980. – 326 p.
3. Gebhart B. // Advances in Heat Transfer. N. Y.: Academic Press., 1973. Vol. 9. P. 273.
4. Гусев С. Е., Шкловер Г. Г. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 160 с.
5. Шкловер Г. Г., Гусев С. Е. // Теплообмен в энергооборудовании АЭС. Л.: Наука, 1986. С. 107–118.
6. Короленко Ю. А. // Изв. Томского ордена трудового красного знамени политехн. ин-та им. С. М. Кирова. 1962. № 110. С. 26–33.
7. Кунтыш В. Б., Позднякова А. В., Третьяков П. А. // Тр. пятой Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд. Дом МЭИ, 2011. Т. 8. С. 92–94.
8. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Архангельск, 1999. – 176 с.

64 и 70 мм от коэффициента сужения площади отверстия крышки вытяжной шахты при числе Грасгофа  $Gr = 10^5$ . Из рисунка видно, что теплоотдача четырехрядного пучка увеличивается с увеличением межтрубного шага, причем максимум теплоотдачи смещается в сторону с большим отверстием крышки вытяжной шахты. При увеличении отверстия крышки шахты больше  $\chi^{opt}$  теплоотдача пучка стремится к теплоотдаче при свободной конвекции. Максимальная теплоотдача четырехрядного пучка при межтрубном шаге  $S_1 = 70$  мм достигает значения  $Nu \approx 1,6$ , что примерно в 1,5 раз меньше, чем теплоотдача однорядного пучка при межтрубном шаге  $S_1 = 58$  мм (рис. 5).

Таким образом, установлено, что из-за высокого аэродинамического со-

9. Новожилова А. В. // Проблемы теплоэнергетики Европейского севера: сб. науч. тр. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. С. 88–97.

10. Сухоцкий А. Б., Фарафонов В. Н., Филатов С. О., Сидорик Г. С. // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возобн. рес. Минск: БГТУ, 2017. С. 169–175.

11. Kuntzysh V. B., Sukhotsky A. B., Samorodov A. V. // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49, N 11–12. P. 773–779.

12. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. // Изв. высш. учебн. заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 19. С. 3–11.

13. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. // Изв. высш. учебн. заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2017. Т. 60, № 4. С. 352–366.

14. Сидорик Г. С. // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возобн. рес. Минск: БГТУ, 2018. № 1. С. 85–93.

*A. B. SUKHOTSKI, E. S. DANIL'CHIK, G. S. MARSHALOVA*

### **INFLUENCE OF THE INTERTRUMPET STEP ON CONVECTIVE HEAT EXCHANGE OF THE AIR-COOLED BUNCH WITH EXHAUST PIT**

#### **Summary**

Results of experimental researches of a convective heat exchange in a regime of the free and mixed convection of air for four rows trumpet bunches of chess equilateral configuration with a back pitch of installation of tubes 58, 64 and 70 mm on which basis are gained the criterial equations in the form of dependences  $Nu = f(Gr)$  are in-process presented. It is installed that because of a high aerodynamic resistance and low efficiency of the overhead rows the convective heat exchange in four rows bunch with exhaust pit is less, than in a single-row bunch. With increase in an intertrumpet step the convective heat exchange four rows bunch grows and attains a maximum at  $S_1 > 70$  mm.