

ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ПУЧКОМ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ
И ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ КРУПНОДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

Применение оребренных труб для отвода тепла из топок парогенераторов и газификаторов с псевдоожженным слоем (ПС) дает возможность создать компактные, менее металлоемкие поверхности нагрева и значительно интенсифицировать удельный (из единицы объема слоя) теплоотвод. Последний фактор имеет особое значение для топок с ПС под давлением.

Конструктивно удобнее и проще применять в ПС горизонтальные трубы /1/. Именно такое размещение поверхностей нагрева принято в большинстве действующих и спроектированных котлов с топками с ПС.

Теплообмен между ПС крупнодисперсного материала, применяемого, как правило, в устройствах для сжигания топлива, и одиночной поперечно-оребренной трубой исследовался в /2, 3/. Было показано, что применение достаточно свободно расположенных и относительно высоких ребер ($l_p \leq 20$ мм, $(S_p - \delta) \leq 3,75 \cdot d$) позволяет в 4-5 раз увеличить тепловой поток от трубы единичной длины при незначительном снижении среднего по всей ребристой поверхности коэффициента теплоотдачи.

Известно, что эффективность теплообмена ПС с пучком гладких труб ниже, чем с одиночной трубой /4-6/, и уменьшается с увеличением стесненности пучка.

Аналогичные результаты были получены при исследовании теплообмена между ПС мелких частиц ($d = 0,35$ мм) и шахматным пучком горизонтальных труб с низкими ребрами /7/.

Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена между шахматным и коридорным пучками горизонтальных поперечно-оребренных труб и ПС крупнодисперсного материала. Систематические данные по этому вопросу в литературе отсутствуют.

Опыты проводились в колонне прямоугольного сечения (25x40 см), имеющей съемную плексигласовую стенку. Газораспределительная решетка состояла из двух перфорированных листов нержавеющей стали с зажатых между ними слоем плотной ткани. Сопротивление решетки в условиях опытов составляло не менее 20% от сопротивления ПС и описывалось следующим эмпирическим уравнением:

$$\Delta P_p = 4 \cdot 10^3 \cdot u^{1,35}$$

Для обеспечения равномерности газораспределения коническая решетчатая воздушная камера была заполнена шаровой насадкой.

В качестве материала слоя использовались шамотная крошка ($d = 0,975$ мм; 2,0 мм) и зерна проса ($d = 2,0$ мм). Статическая высота слоя в большинстве опытов составляла 40 - 45 см.

Псевдооживающим агентом служил холодный воздух (10-30⁰С), скорость фильтрации которого измерялась с помощью стандартной диафрагмы с точностью не ниже $\pm 3\%$.

Максимальная скорость фильтрации составляла около 2,0 м/с ($N = 4,4$; 2,2 для шамота, соответственно, $d = 0,975$; 2,0 мм и $N = 4,0$ для проса).

Теплообмен между ПС и пучком труб исследовался методом локального моделирования /8/, когда датчик-калориметр устанавливался среди необогреваемых труб аналогичной геометрии.

Датчик устанавливался, как правило, в третьем по ходу воздуха горизонтальном ряду труб, всегда в центре ряда - в области сложившейся гидродинамической обстановки внутри пучка, чтобы избежать влияния пристенного эффекта, специфического для данного аппарата. Очевидно, в промышленных топках большого поперечного сечения влияние пристенного эффекта на средний по пучку коэффициент теплообмена будет незначительным.

В экспериментах с помощью медных ребристых датчиков, конструкция которых описана в /2,3/, методом стационарного теплового режима измерялся эффективный коэффициент теплообмена, отнесенный к разности температур между поверхностью трубы, несущей ребрение, и ядром слоя. \bar{U}_0 измерялась ЖК-термопарой с открытым спаем, введенной в ПС, и дифференциально включенной с ней термопарой датчика. Кроме того, фиксировались температуры ПС и воздуха перед решеткой. Погрешность измерения температуры не превышала 0,5 К, что обеспечивало точность определения коэффициента теплообмена не ниже $\pm 3,5\%$

В связи с тем, что внутри датчика находился высокотемпературный нихромовый нагреватель, соединенный с медными токоведущими проводами, очевидно, имели место концевые утечки тепла. Для оценки их величины в специальной серии опытов датчики с торцевой изоляцией, но без нагревателей, прогревались в печи примерно до 100⁰С, а за-

тем охлаждались в ПС.

По темпу охлаждения датчика практически в условиях $Bi \rightarrow 0$ методом регулярного теплового режима [9] определялся коэффициент теплообмена при отсутствии концевых потерь тепла. Сравнение полученных таким образом величин с коэффициентами теплообмена, замеренными методом стационарного теплового режима в тех же условиях, давало искомую величину утечек (5-10%), которая учитывалась при обработке опытных данных.

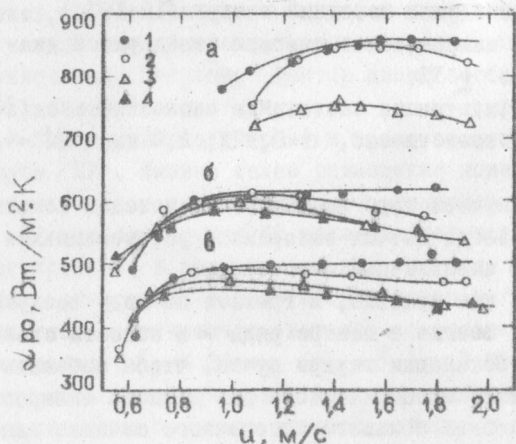


Рис. I. Зависимости $\alpha_{po} = f(u)$ для шахматного пучка: 1 - одиночная труба; 2, 3, 4 - соответственно $S = 100, 75$ и 60 мм.

a - шамот, $d = 2,0$ мм, $l_p = 20$ мм, $S_p = 15$ мм.
 б - просо, $d = 2,0$ мм, $l_p = 15$ мм, $S_p = 10$ мм.
 в - просо, $d = 2,0$ мм, $l_p = 15$ мм, $S_p = 15$ мм

В опытах с пучками труб использовались датчики с ребрами треугольного профиля ($l_p = 15, 20$ мм; $S_p = 10, 15, 35$ мм; $\delta_0 = 5$ мм; $D_T = 30$ мм).

Пучок состоял из четырех-пяти горизонтальных рядов труб, скопонованных в шахматном или коридорном порядке (рис. 2) Компоновка пучка и шаг между трубами изменялись путем замены несущих трубных досок. В большинстве опытов вертикальный шаг в пучке равнялся горизонтальному и составлял 60, 75 и 100 мм. Минимальный шаг соответствовал нулевому зазору между концами ребер соседних труб. Более тесное расположение привело бы к взаимному перекрытию ребер, что затрудняет определение истинной поверхности теплообмена.

Нижний ряд труб располагался на уровне около 150 мм над решеткой.

На рис. I представлены некоторые экспериментальные зависимости $\alpha_{po} = f(u)$ для шахматного пучка труб. Там же для сравнения при-

ведены аналогичные зависимости для соответствующих одиночных оребренных труб. Как видно из рисунка, в отличие от одиночной трубы, зависимости $\alpha_{po} = f(u)$ для пучка имеют характерный пик с последующим падением коэффициента теплообмена, что, очевидно, связано с визуально наблюдавшимся вытеснением материала из пучка при росте скорости фильтрации. Экстремальный характер зависимостей усиливается с уменьшением S и с увеличением коэффициента оребрения труб. Максимальное снижение α_{po} по сравнению с α_{po}^{max} в условиях опытов не превышало 10-15%. Учитывая это, а также то, что на практике целесообразно работать при скоростях фильтрации, близких к u_{opt} , в дальнейшем для оценки эффективности пучков различной геометрии будем сравнивать величины α_{po}^{max} .

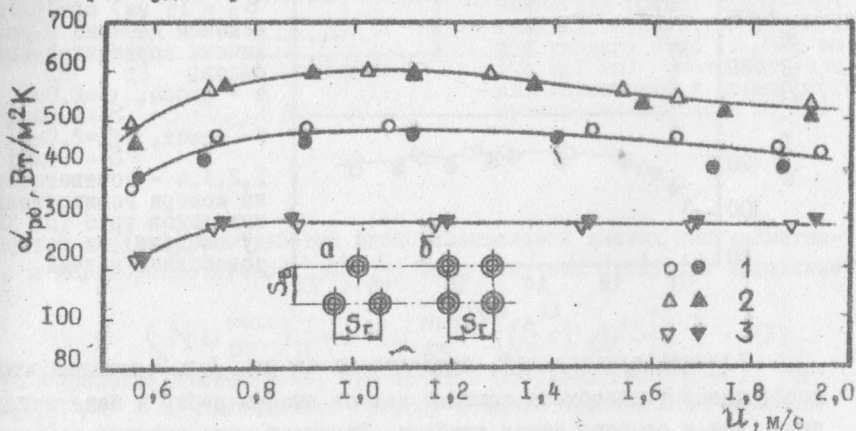


Рис. 2. Сравнение зависимостей $\alpha_{po} = f(u)$ для горизонтально-го пучка оребренных труб при шахматной (а) и коридорной (б) компоновках ($S = 75$ мм). Материал слоя — просо, $d = 2,0$ мм; $l_p = 15$ мм; 1, 2, 3 — соответственно $S_p = 15, 10$ и 35 мм. Затемненные символы относятся к коридорной компоновке

На рис. 2 приведено сравнение зависимостей $\alpha_{po} = f(u)$ для шахматной и коридорной компоновок, из которого следует, что эффективность теплообмена практически не зависит от типа компоновки, хотя при шаге между трубами $S = 60$ мм зависимости $\alpha_{po} = f(u)$ для коридорной компоновки имели более резкий экстремальный характер. Поэтому при скоростях фильтрации, заметно превышающих u_{opt} , и тесном расположении труб предпочтительнее выглядит шахматная компоновка.

На рис. 3 сопоставлены зависимости $\alpha_{po} = f(u)$ для шахматного пучка, полученные при размещении датчика в различных горизонтальных рядах труб. Как видно из рисунка, интенсивность теплообмена на "холодной" модели практически не менялась по высоте пучка, что дает основания по данным, полученным методом локального моделирования, судить о коэффициенте теплообмена пучка в целом (за исключением пристенных зон).

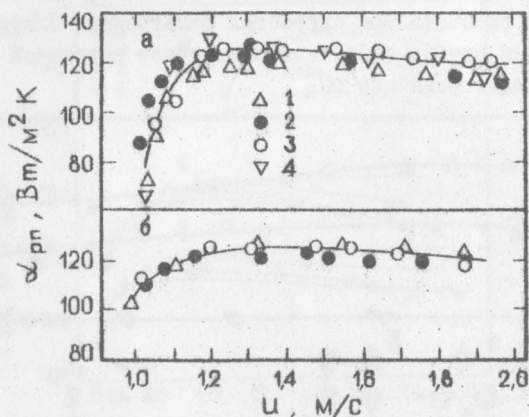


Рис. 3. Зависимости $\alpha_{po} = f(u)$ для шахматного пучка оребренных труб ($\ell_p = 15$ мм, $S_p = 15$ мм) при расположении датчика в различных горизонтальных рядах:

а - просо, $d = 2,0$ мм, $S = 100$ мм;
б - шамот, $d = 2,0$ мм, $S = 60$ мм;

1, 2, 3, 4 - соответственно номера горизонтальных рядов труб (по ходу воздуха), в которых установлен датчик

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2, показал, что коэффициент теплообмена зависит как от высоты ребер и шага между ними, так и от шага между трубами. Учитывая, что влияние геометрических характеристик оребрения на коэффициент теплообмена одиночной трубы было исследовано в [2, 3] и при $(S_p - d)/d \leq 3,75$ описывается выражением

$$Nu_{po}^{max} = Nu_{gl}^{max} \eta_{pr}^{gl} \varphi^{0,9}, \quad (1)$$

экспериментальные данные обрабатывались в виде зависимости отношения $\beta = (Nu_{po}^{max})_n / Nu_{po}^{max}$ от величины $(S - De) / S$, характеризующей степень стесненности пучка. Эквивалентный диаметр оребренной трубы определялся как диаметр гладкой трубы той же длины и с той же площадью продольного миделева сечения (рис. 4). В случае ребер треугольного профиля De рассчитывается по формуле

$$D_e = D_T + \delta_0 \ell_p / S_p. \quad (2)$$

При прямоугольном профиле ребер второй член правой части удваивается.

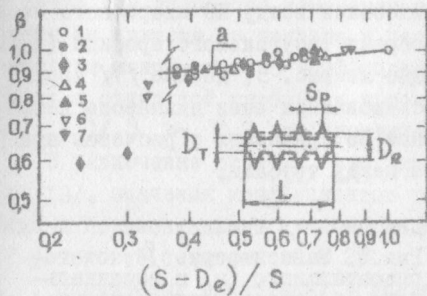


Рис. 4. Зависимость $\beta = f[(S - D_e)/S]$ для шахматного и коридорного пучков оребренных труб: 1, 2 - собственные данные для шахматного и коридорного пучков соответственно; 3 - данные /7/; 4, 5 - данные /10/ соответственно для пучков оребренных и гладких труб; 6, 7 - данные /11/ для гладких труб ($D_T = 25$ мм, $d = 0,7$ мм) соответственно для шахматного и коридорного пучков; а - расчеты по (3)

В результате обработки экспериментальных данных для шахматного и коридорного пучков (рис. 4) было получено следующее выражение:

$$(Nu_{po}^{max})_n = Nu_{po}^{max} [(S - D_e)/S]^{0,1}. \quad (3)$$

При обработке учитывалось, что точка с координатами $\beta = 1$, $(S - D_e)/S = 1$ принадлежит графику искомой зависимости. Максимальное отклонение опытных точек от расчетной кривой не превышает $\pm 4\%$. Предложенное ранее в /12/ выражение

$$(Nu_{po}^{max})_n = Nu_{po}^{max} [(S - D_T)/S]^{0,16} \quad (3a)$$

также достаточно хорошо описывает опытные данные, однако введение в (3) эквивалентного диаметра D_e вместо диаметра трубы, несущей оребрение, позволяет учесть дополнительное сужение сечения пучка ребрами, что может существенно сказаться в случае применения массивных ребер прямоугольного профиля.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные работ /7, 10/ по теплообмену между ПС медных частиц и шахматным пучком оребренных труб. В работе /10/ использовались трубы с равносоставленной треугольной нарезкой ($\ell_p = S_p = \delta_0 = 0,79$; 1,59; 3,18; 5,09 мм) диа-

метром 28,6 мм (по наружным концам ребер) и гладкие трубы того же диаметра. Размер частиц составлял 0,167-0,504 мм. Опытные точки для пучков труб с шагом нарезки $\geq 1,59$ мм, которые можно рассматривать как оребренные, хорошо укладываются на расчетную кривую, построенную по (3). Хорошо согласуются с расчетами также данные /10/ для шахматных пучков гладких труб (при этом $D_e = D_T$).

В работе /7/ исследовался теплообмен между ПС кварцевого песка ($d = 0,35$ мм) и пучком труб с ребрами треугольного профиля ($l_p = \delta_o = 4$ мм, $S_p = 6$ мм). Как видно из рис. 5, данные /7/ хорошо описываются зависимостью (3) в исследованном нами диапазоне изменения $(S - D_e)/S$ и резко падают по сравнению с расчетом при уменьшении относительного просвета между трубами.

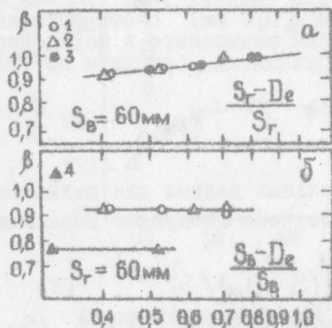


Рис. 5. Зависимости β от горизонтального (а) и вертикального (б) шагов между трубами: 1, 2 - собственные данные соответственно для шахматного и коридорного пучков, $d = 2,0$ мм (шмот), $l_p = S_p = 15$ мм; 3 - данные /5/, шахматный двухрядный пучок гладких труб, $D_T = 20$ мм, $S_p = 50$ мм, $d = 0,35$ мм (песок); 4 - данные /7/, шахматный четырехрядный пучок оребренных труб, $D_T = 26$ мм, $l_p = 4$ мм, $S_p = 6$ мм, $d = 0,35$ мм (песок), $S_T = 47$ мм

Выражения (3), (3а) получены для пучков с $S_r = S_v = S$. Для выявления влияния отдельно вертикального и горизонтального шагов была проведена специальная серия опытов, результаты которой приведены на рис. 5. Как при шахматной, так и при коридорной компоновке отношение $(Nu_{po}^{max})_n / Nu_{po}^{max}$ не зависело от S_v (рис. 5б), а зависимость от горизонтального шага соответствует выражению (3), если в нем заменить S на S_r . Полученные результаты хорошо согласуются с представленными на рис. 5 (а, б) опытными данными работ /5, 7/. Таким образом, для расчета коэффициента теплообмена между ПС и шахматным и коридорным пучками оребренных труб при $S_r \neq S_v$ в выражение (3) следует вместо S подставлять величину S_r .

Анализ приведенного на рис. 4 сопоставления расчетов по выражению (3) с опытными данными дает возможность сделать следующие выводы.

- Зависимость (3) позволяет учитывать влияние стесненности в пучке на интенсивность теплообмена между ПС частиц размером $0,167 \leq d \leq 2,0$ мм и шахматным и коридорным пучками поперечно-оребрённых труб при $0,375 \leq (S - D_e) / S$; $1,59 \leq S_p \leq 35$ мм; $l_p \leq 20$ мм.
- В указанном диапазоне изменения переменных величина β практически не зависит от размера и плотности частиц,
- Снижение максимального коэффициента теплообмена в пучке по сравнению с одиночной трубой не превышает 10 - 15%, а при $(S - D_e) / S > 0,7$ им практически можно пренебречь.

В заключение отметим, что, как было экспериментально показано в [13], значения коэффициентов теплообмена между ПС крупных частиц и горизонтальным пучком гладких труб, полученные на "холодной" установке сечением 40 x 25 см, мало отличаются от значений α , полученных в природных условиях. Это дает основания рекомендовать выражения (1), (3) для расчета теплообмена в топочных устройствах с ПС, содержащих оребренные поверхности нагрева, используя в качестве определяющей температуры в первом приближении величину $\bar{t} = \bar{\theta}_0 / 2$.

Обозначения

D_T, D_e - диаметр гладкой (несущей оребрение) трубы, эквивалентный диаметр оребренной трубы; d - средний диаметр частиц; l_p - высота ребра; $N = u / u_0$ - число псевдоожигания; $Nu_{po} = \alpha_{po} d / \lambda$, $(Nu_{po})_n, Nu_{el}$ - критерий Нуссельта соответственно для одиночной оребренной трубы, для пучка оребренных труб, для одиночной гладкой трубы; S_p, S_r, S_b - шаг между ребрами, горизонтальный и вертикальный шаги между трубами в пучке; S - шаг между трубами ($S = S_r = S_b$); t_0, t_{nc} - температура поверхности трубы, несущей оребрение, и ядра слоя; $\bar{t} = (t_0 + t_{nc}) / 2$; u, u_0 - скорости фильтрации и начала псевдоожигания; α_{el} - коэффициент теплообмена гладкой трубы; α_{po}, α_{pn} - эффективный коэффициент теплообмена оребренной трубы, отнесенный к $\bar{\theta}_0$ и соответственно к поверхности трубы, несущей оребрение, и к полной ребристой поверхности; $\beta = (Nu_{po}^{max})_n / Nu_{po}^{max}$; $\delta_0, \bar{\delta}$ - толщина ребра у основания и средняя толщина ребра; ΔP_p - перепад давления на ре-

метке, Па; λ - коэффициент теплопроводности псевдоожижающего газа; $\bar{\nu}_{рп}^{эл}$ - средневзвешенный по всей ребристой поверхности коэффициент эффективности ребра, рассчитанный в приближении $\alpha_{эл} = const$; φ - коэффициент оребрения; $\bar{\nu}_0 = t_0 - t_{nc}$.

Л и т е р а т у р а

1. Эндий Б.Р., Гликсман Л.Р., Боумен Р. Теплообмен между сплюснутыми горизонтальными трубами и псевдоожиженным слоем материала.- В кн.: Новое в теории и практике псевдоожижения.- М.: Мир, 1980, с.181-190.
2. Пальченко Г.И. Влияние геометрических характеристики оребрения на коэффициент теплообмена между псевдоожиженным слоем и погруженной в него горизонтальной оребренной трубой.- В кн.: Тепло- и массоперенос : физические основы и методы.- Минск: 1979, с.54-55.
3. Пальченко Г.И., Тамарин А.И., Забродский С.С. Теплообмен между горизонтальной оребренной трубой и псевдоожиженным слоем крупных частиц.- В кн.: Теплообмен - У1, т. У1, часть I.- Минск: 1980, с. 89-93.
4. Гельперин Н.И., Айштейн В.Г., Вайковский А.В. Гидравлические и теплообменные характеристики псевдоожиженного слоя с горизонтальными пучками труб.- Хим. и нефт. машиностроение, 1968, № 3, с. 17-20.
5. Гельперин Н.И., Айштейн В.Г., Коротяевская Л.А. Теплообмен между псевдоожиженным слоем и шахматными пучками горизонтальных труб.- Хим. пром., 1968, № 6, с.27-31.
6. Тамарин А.И. и др. Перенос тепла в потоке кипящего слоя к горизонтальному шахматному пучку.- Энергомашиностроение, 1977, № 12, с. 7-8.
7. Тоскубаев И.Н. Исследование теплообмена между ребристыми поверхностями и псевдоожиженным слоем. Автореф. канд. дисс. М.: МИТХТ, 1974.- 21 с.
8. Стасюлявичюс Ю., Сиринас А. Теплоотдача поперечно-обтекаемых пучков ребристых труб.- Вильнюс.: Минтис, 1974.- 239 с.
9. Кондрагьев Г.М. Регулярный тепловой режим.- М.- Л.: ГИТТЛ, 1954, 408 с.

10. Zabrodsky S.S., Tamarin A.I., Dolidovich A.F., Palchonok G.I., Epanov Yu.B. *Heat Transfer of Single Horizontal Finned Tubes and their Bundles in a Fluidized Bed of Large Particles.* - Proc. of the 1980 Int. Fluidization Conf., Henniker, N. H., Aug. 3-8, 1980, p. 195-200.
11. Grewal N.S., Saxena S.C. *Heat Transfer Between a Bundle of Horizontal Finned Tubes and a Gas-Solid Fluidized Bed.* - A.I.Ch.E. 86th Annual Meet., April 1-5, Newston, 1979.
12. Мигай В.К. и др. Исследование теплообмена в гладкотрубных и оребренных шахматных пучках труб в топках кипящего слоя и на моделях. - В кн.: Теплообмен - VI, т. VI, часть I. - Минск.: 1980, с. 94-98.
13. Neukirchen B., Blenke H. *Gestaltung horizontalen Rohrbündel in Gas-Firbelschichtreaktoren nah Wärmetechnischen Gesichtspunkten.* - Chem. Ing. Techn., 1973, v. 45, N5, p. 307-312.