

ТЕПЛОБМЕН МЕЖДУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБОЙ
И ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Для отвода тепла из аппаратов с псевдоожженным слоем (ПС) обычно применяются горизонтальные пучки теплообменных труб. Интенсивность теплоотвода можно значительно повысить с помощью наружного оребрения труб. Применение оребренных труб представляется наиболее эффективным в ПС крупных частиц, в частности в топках и газогенераторах с ПС.

Имеющиеся литературные данные относятся, в основном, к области мелких частиц ($d = 0,2 - 0,6$ мм). Наиболее подробно исследован теплообмен между ПС и трубами, имеющими тонкие, относительно высокие и густо расположенные ребра ($S_p = 1,0 - 4,6$ мм) /1,2/, а также ребра малой высоты (4 мм) /3/. Данные работ /3/ и /4/ относительно эффективности ребер высотой более 5-10 мм противоречивы. Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена между ПС крупных частиц и одиночной горизонтальной оребренной трубой при различных значениях шага и высоты ребер.

Учитывая, что теплообмен между ПС и горизонтальной неоребреной трубой достаточно хорошо изучен и может быть рассчитан по известным эмпирическим формулам /5, стр. 183, 184/, выражение для коэффициента теплообмена оребренной трубы, отнесенного к ее полной поверхности, удобно записать в виде

$$\alpha_p = \alpha_{21} \gamma_{pn}^{21} \Pi \quad (I)$$

Согласно выражению (I), α_p рассчитывается в приближении постоянства α_{21} по всей ребристой поверхности, а поправочный множитель Π учитывает снижение эффективности теплообмена оребренной трубы по сравнению с гладкой. Так, по данным /1,2/, α_p в ПС мелких частиц на 20-80% ниже, чем α_{21} . При этом, очевидно, локальные значения коэффициента теплообмена у вершины ребер, где отсутствует стесненность, близки к α_{21} и уменьшаются с высотой ребер, достигая минимума на поверхности трубы, несущей оребрение.

Влияние геометрических параметров оребрения и размера частиц на коэффициент теплообмена оребренной трубы определялось экс-

периментально. Опыты проводились в колонне сечением 25 x 40 см. В качестве материала слоя использовались две узкие фракции кварцевого песка ($d = 0,25$ мм и $0,62$ мм), шамотная крошка ($d = 0,975$ мм) и зерна проса ($d = 2,0$ мм). Датчик крепился на высоте 200 мм над решеткой при статической высоте слоя 300 мм.

Методом стационарного теплового режима с точностью $\pm 3,5\%$ измерялся коэффициент теплообмена, отнесенный к разности температур ($T_0 - T_{сд}$). Оребренные и гладкий датчики представляли собой толстостенную медную трубу длиной 170 мм и наружным диаметром 30 мм. Оребренные датчики вытачивались заодно с ребрами треугольного профиля, наиболее эффективного при теплообмене с ПС [3], имеющими высоту 5, 10, 15, 20 мм, шаг 10, 15, 20, 35 мм и толщину у основания 5 мм.

В специальной серии опытов с помощью гладкого датчика, оснащенного фальшребрами из материала с низким λ (полиэтилена), определялось локальное значение коэффициента теплообмена на поверхности трубы, несущей оребрение. Имея экспериментально полученные величины $\alpha_{рп}$, α_0 и приближенно учитывая внутреннее термическое сопротивление ребра с помощью η_p^{2n} , можно было рассчитать средний по высоте ребра коэффициент теплообмена [7, стр. 84/].

Результаты экспериментов показали, что коэффициент теплообмена, отнесенный к поверхности трубы, несущей оребрение $\alpha_{р0} = \varphi \alpha_{рп}$ монотонно возрастает с увеличением высоты ребер и уменьшением шага между ними, рис. 1. Одновременно средний по всей ребристой поверхности коэффициент теплообмена $\alpha_{рп}$ был ниже $\alpha_{сг}$ и монотонно уменьшался.

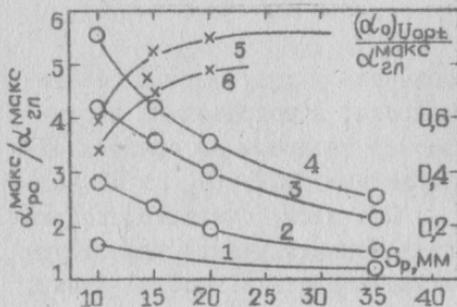


Рис. 1. Зависимость среднего по всей поверхности коэффициента теплообмена оребренной трубы (кривые 1-4) и локального коэффициента теплообмена у основания ребер (кривые 5, 6) от шага между ребрами. (1, 2, 3, 4 - соответственно $l_p = 5, 10, 15, 20$ мм, про- со, $d = 2,0$ мм, $\alpha_{сг}^{max} = 141$ Вт/м²К, 5, 6 - соответственно $l_p = 15, 20$ мм, песок, $d = 0,62$ мм, $\alpha_{сг}^{max} = 263,0$ Вт/м²К)

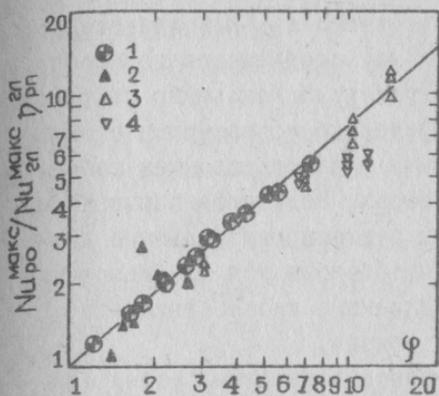


Рис. 2. Зависимость комплекса $Nu_{po}^{max} / Nu_{gl}^{max} \cdot \eta_{rp}^{gl}$ от коэффициента оребрения. 1 - собственные данные, группы по четыре точки относящиеся соответственно к $d = 0,25, 0,62, 0,975$ и $2,0$ мм; 2 - данные /3/, $d = 0,35$ мм, латунные ребра треугольного профиля, $l_p = 4$ мм; 3 - данные /1/, $d = 0,2-0,47$ мм, "лепестковые" радиальные ребра из стали, $l_p = 3,2-22,2$ мм, $S_p = 3,15$ мм; 4 - данные /2/, $d = 0,14-0,55$ мм, медные спиральные ребра, $l_p = 5,94$ мм; $S_p = 1,41-5,08$ мм

Аналогично вели себя α_o (рис.1) и $\bar{\alpha}_p$, однако, в то время как при минимальном шаге между ребрами α_o снижался до $(0,5 - 0,6) \times \alpha_{gl}$, $\bar{\alpha}_p$ был ниже α_{gl} всего на 10-18%. Это свидетельствует о том, что при данном профиле ребер на большей части их высоты, начиная от вершины, локальные значения коэффициента теплоотдачи близки к α_{gl} и лишь у основания довольно резко падают.

При обработке экспериментальных данных оказалось, что зависимость коэффициента теплообмена оребренной трубы от l_p и S_p наиболее удобно учитывать одним параметром - коэффициентом оребрения φ , связанным с характеристиками оребрения данного типа следующим образом:

$$\varphi = \frac{S_p - \delta_o}{S_p} - 2 \cdot \frac{l_p}{S_p} \cdot \frac{D_T - l_p}{D_T}$$

В результате обработки было получено следующее соотношение:

$$Nu_{po}^{max} = Nu_{gl}^{max} \eta_{rp}^{gl} \varphi^{0,9}, \quad (2)$$

где коэффициент эффективности ребра, отнесенный к полной ребристой поверхности, η_{rp}^{gl} вычисляется по α_{gl}^{max} в предположении постоянства его по высоте ребра /7, стр. 54 /.

Выражение (2) со средневзвешенной погрешностью $\pm 3,5\%$ описывает наши экспериментальные данные в интервале $1,24 \leq \varphi \leq 7,22$ при $(S_p - \delta_o) \geq 5$ мм; $0,25 \leq d \leq 2,0$ мм; $5 \leq l_p \leq 20$ мм; (рис.2). Отметим, что, как следует из (2), коэффициент теплообмена оребренной трубы, отнесенный к α_{gl} , не зависит в данном диапа-

зоне переменных от размера частиц. Сравнивая (1) и (2), получаем, что $\Pi = \varphi^{-0,1}$, т.е. снижение α_{rp} по сравнению с α_{el} в исследованном диапазоне переменных есть функция только соотношения поверхностей ребристой и несущей оребрение гладкой труб. Как видно из рис. 2 расчеты по выражению (2) удовлетворительно согласуются с опытными данными других авторов, полученными с использованием ребер различного профиля из латуни, меди и стали. Некоторое завышение расчетов по выражению (2) по сравнению с экспериментальными данными работы [2] при $\varphi > 7,0$, возможно, объясняется использованием оребрения в виде навитой спиральной ленты, способствующего возникновению застойных зон газа и материала.

В заключение отметим, что применение поперечных ребер треугольного профиля при $(S - \delta_0) / d \geq 2,5$ и $1,24 \leq \varphi \leq 7,22$ позволяет в 4-5 раз увеличить суммарный тепловой поток через поверхность трубы единичной длины, погруженной в ПС. При этом снижение коэффициента теплообмена $\alpha_{rp}^{\text{макс}}$ по сравнению с $\alpha_{el}^{\text{макс}}$ вследствие ухудшения гидродинамической ситуации вблизи ребристой поверхности невелико и составляет не более 15% ($l_p \leq 15$ мм) и до 27% ($l_p = 20$ мм). Выражение (2) позволяет рассчитывать коэффициент теплообмена между ПС крупных частиц и погруженной в него оребренной трубой, изготовленной из любого материала, в представляющем практический интерес диапазоне геометрических характеристик оребрения и может быть рекомендовано для расчета и проектирования теплообменников для котлов и газогенераторов с ПС.

Обозначения

F_{gl} , F_p , F_0 - площади поверхности гладкой (несущей оребрение) трубы, ребер и трубы между основаниями ребер; D_t - наружный диаметр трубы, несущей оребрение; d - средний диаметр частиц; l_p - высота ребра; S_p - шаг между ребрами; $Nu_{el} = \alpha_{el} d / \lambda_g$ - критерий Нуссельта для гладкой трубы; $Nu_{po} = \alpha_{po} d / \lambda_g$ - критерий Нуссельта для оребренной трубы; T_0 и T_{cl} - температуры поверхности трубы, несущей оребрение, и ПС; α_{gl} - коэффициент теплообмена горизонтальной гладкой трубы; α_{rp} и α_{po} - коэффициенты теплообмена оребренной трубы, отнесенные к $(T_0 - T_{cl})$ и соответственно к годной поверхности и к поверхности гладкой трубы, несущей оребрение; α_0 , $\bar{\alpha}_p$ - значения коэффициента тепло-

обмена у основания ребра и среднее по высоте ребра; δ_0 - толщина ребра у основания; η_p^{21} - коэффициент эффективности ребра, рассчитанный в предположении $\alpha_{гд} = \text{const}$; $\eta_{pp}^{21} = (\eta_p^{21} F_p + F_0) / (F_0 + F_p)$; $\Phi = (F_p + F_0) / F_{гд}$ - коэффициент оребрения трубы; λ , λ_g - коэффициенты теплопроводности материала ребра и псевдоожижающего газа (при $T_{сн}$).

Л и т е р а т у р а

1. Bartel W.J. Heat transfer from a horizontal bundle of tubes in air fluidized bed, M.S. Thesis, Montana State Univ., Bozeman, 1971.
2. Kratovil M.T. Heat transfer from a horizontal bundle of continuous helical finned tubes in an air fluidized bed, Ph.D. Thesis, Montana State Univ., Bozeman, 1976.
3. Тоскубаев И.Н. Исследование теплообмена между ребристыми поверхностями и псевдоожиженным слоем. Автореферат канд. диссертации, МИТХТ, М., 1974, 21 стр.
4. Natush H.J. and Blenke M. Wärmeübertragung an Rippenrohren in Gas-Fliesbetten. Verfahrenstechnik, 1973, 7, № 10, 293.
5. Баскаков А.П. и др. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое. М., "Металлургия", 1978.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., "Энергия", 1975.
7. Энкерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961.