

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 теплообвода 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),  $\alpha_p$  рассчитывается в приближении постоянства  $\alpha_{21}$  по всей ребристой поверхности, а поправочный множитель  $\Pi$  учитывает снижение эффективности теплообмена оребренной трубы по сравнению с гладкой. Так, по данным /1,2/,  $\alpha_p$  в ПС мелких частиц на 20-80% ниже, чем  $\alpha_{21}$ . При этом, очевидно, локальные значения коэффициента теплообмена у вершины ребер, где отсутствует стесненность, близки к  $\alpha_{21}$  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  $\lambda$  (полиэтилена), определялось локальное значение коэффициента теплообмена на поверхности трубы, несущей оребрение. Имея экспериментально полученные величины  $\alpha_{рп}$ ,  $\alpha_0$  и приближенно учитывая внутреннее термическое сопротивление ребра с помощью  $\eta_p^{2n}$ , 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.

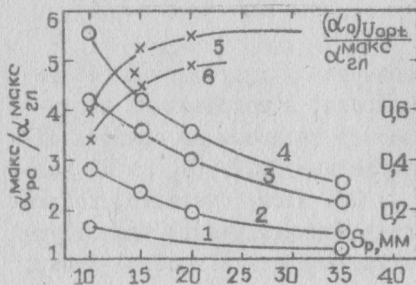


Рис. 1. Зависимость среднего по всей поверхности коэффициента теплообмена оребренной трубы (кривые 1-4) и локального коэффициента теплообмена у основания ребер (кривые 5, 6) от шага между ребрами. (1, 2, 3, 4 - соответственно  $l_p = 5, 10, 15, 20$  мм, про- со,  $d = 2,0$  мм,  $\alpha_{сг}^{макс} =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

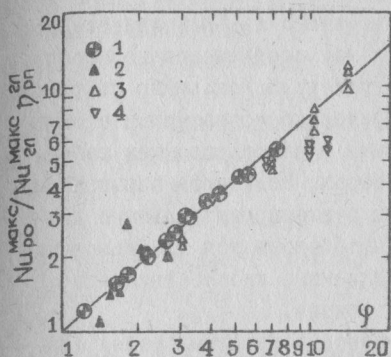


Рис. 2. Зависимость комплекса  $Nu_{po}^{max} / Nu_{gl}^{max} \cdot \eta_{rp}^{gl}$  от коэффициента оребрения. 1 - собственные данные, группы по четыре точки относящиеся соответственно к  $d = 0,25, 0,62, 0,975$  и  $2,0$  мм; 2 - данные /3/,  $d = 0,35$  мм, латунные ребра треугольного профиля,  $l_p = 4$  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  $\alpha_o$  (рис.1) и  $\bar{\alpha}_p$ , однако, в то время как при минимальном шаге между ребрами  $\alpha_o$  снижался до  $(0,5 - 0,6) \times \alpha_{gl}$ ,  $\bar{\alpha}_p$  был ниже  $\alpha_{gl}$  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  $\alpha_{gl}$  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  $\varphi$ , 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,  $\eta_{rp}^{gl}$  вычисляется по  $\alpha_{gl}^{max}$  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  $\alpha_{gl}$ , не зависит в данном диапа-

зоне переменных от размера частиц. Сравнивая (1) и (2), получаем, что  $\Pi = \varphi^{-0,1}$ , т.е. снижение  $\alpha_{rp}$  по сравнению с  $\alpha_{el}$  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.

#### О б о з н а ч е н и я

$F_{gl}$ ,  $F_p$ ,  $F_0$  - 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;  $\alpha_{gl}$  - коэффициент теплообмена горизонтальной гладкой трубы;  $\alpha_{rp}$  и  $\alpha_{po}$  - коэффициенты теплообмена оребренной трубы, отнесенные к  $(T_0 - T_{cl})$  и соответственно к годной поверхности и к поверхности гладкой трубы, несущей оребрение;  $\alpha_0$ ,  $\bar{\alpha}_p$  - значения коэффициента тепло-

обмена у основания ребра и среднее по высоте ребра;  $\delta_0$  - толщина ребра у основания;  $\eta_p^{21}$  - коэффициент эффективности ребра, рассчитанный в предположении  $\alpha_{гд} = \text{const}$ ;  $\eta_{pp}^{21} = (\eta_p^{21} F_p + F_0) / (F_0 + F_p)$ ;  $\varphi = (F_p + F_0) / F_{гд}$  - коэффициент оребрения трубы;  $\lambda$ ,  $\lambda_g$  - 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.