

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ У ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

А.А. Каськов, П.Т. Петрик, И.В. Дворовенко

Широкое применение зернистых материалов в различных отраслях промышленности обуславливает необходимость подробного изучения гидродинамики движения жидкости или газа в зернистом слое и теплообмена между рабочим веществом и стенкой аппарата. В последнее время выполнено большое количество работ по исследованию теплоотдачи от поверхности к рабочему веществу, движущемуся в зернистом слое [1-3]. Для расчета процессов, протекающих в зернистых слоях, вводятся параметры, учитывающие особенности зернистых сред. В качестве одной из таких характеристик используют эффективную теплопроводность среды $\lambda_{\text{э}}$ [1]. Наиболее часто для расчета эффективной теплопроводности используют зависимость, которая может быть представлена в безразмерном виде [1]:

$$\frac{\lambda_{\text{э}}}{\lambda} = A + B \text{Re Pr}, \quad (1)$$

где A, B - эмпирические константы; λ - теплопроводность фильтрующей среды, Вт/(м·К).

Для определения $\lambda_{\text{э}}$ в экспериментах [1] измеряли профиль температуры по толщине зернистого слоя и плотность теплового потока, подводимого к поверхности. Практически все опытные данные соответствуют зависимости (1), однако, константы A и B в значи-

тельной степени отличаются у различных авторов (значения A изменяются от 6 до 13, а B - в пределах от 0,04 до 0,1). Расхождение в коэффициентах A и B связаны с физическими свойствами фильтруемой среды, засыпки и геометрических параметров матрицы.

В большинстве представленных в литературе экспериментальных работ по исследованию теплообмена от стенки к потоку газа или жидкости через зернистый слой принимается допущение о том, что эффективная теплопроводность по всей толщине слоя остается приблизительно постоянной. Однако, в работах [2-3] отмечается, что при определенных условиях такое приближение становится недопустимым. Толщина пристенной зоны оценивается различными авторами от 0,1 до 1 диаметра частиц, составляющих зернистый слой. Кроме того, безразмерный геометрический параметр отношения стороны канала к размеру зернистого материала в предыдущих исследованиях был намного больше 1 ($h/d \gg 1$). В некоторых приложениях используется монослой частиц, упакованных в канале прямоугольной формы, где $h/d=1$.

Целью нашего исследования было изучение процесса передачи тепла от нагреваемой горизонтальной стенки к среде, фильтрующей через монослой, составленный из шаров большого диаметра, и определение

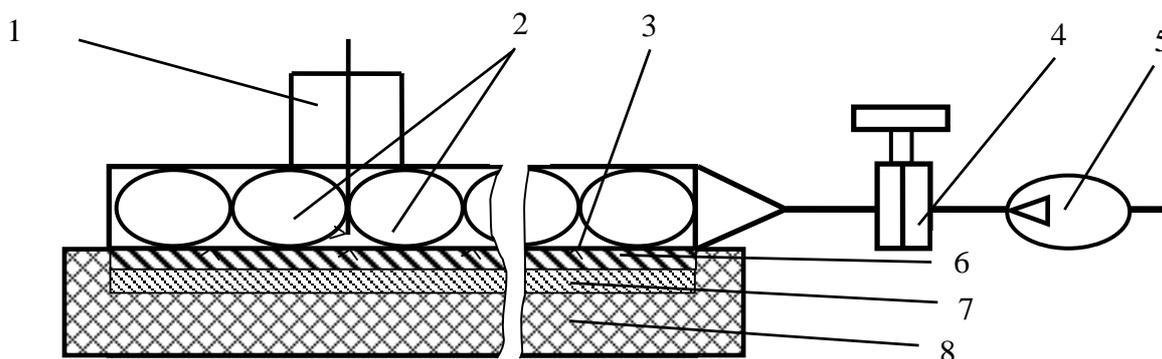


Рис. 1. Экспериментальный стенд по исследованию теплообмена в пристенной зоне зернистого слоя: 1 - измерительный блок, 2 - шары, 3 - термомпары, 4 - расходомер, 5 - газодувка, 6 - рабочая пластина, 7 - нагреватель, 8 - теплоизоляция

коэффициента эффективной теплопроводности. Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

Экспериментальная установка состоит из рабочего участка, измерительного блока 1, газодувки 5 и расходомера 4. В качестве рабочего вещества использовался воздух. Рабочий участок представлял собой установленную горизонтально алюминиевую пластину 6, к которой снизу крепился плоский нагреватель 7. Сверху на пластину устанавливались в кубическую укладку полые шары 2 диаметром $65 \pm 0,5$ мм. По ширине пластины располагалось 4 ряда шаров, по глубине - 8. Для фиксации шаров на пластине с боков крепились ребра, а сверху пластина из оргстекла. Для снижения потерь тепла рабочий участок тщательно теплоизолировался. Измерительный блок представлял собой зонд с термопарой, установленный в микровинт, соединенный через редуктор с реверсивным электродвигателем. Такая система позволяла перемещать зонд в вертикальной плоскости и измерять профиль температур по толщине слоя шаров перпендикулярно потоку воздуха. Зонд устанавливался между шестым и седьмым рядами шаров, считая от входной кромки по оси рабочего участка. Измерения производились по центру ячейки, образованной шарами. Температура определялась по показаниям термопары зонда, высоту поднятия зонда от пластины измеряли датчиком положения. В экспериментах измерялись также расход воздуха через рабочий участок и удельный тепловой поток, подводимый от нагревателя к рабочей пластине. Расход воздуха определялся при помощи стандартной диафрагмы, перепад давлений на которой

измеряли датчиком "Сапфир 22ДД", удельный тепловой поток определяли по электрической мощности нагревателя. Теплопотери измерялись методом дополнительной стенки, их значение не превышало 3% при максимальной мощности нагревателя, и они учитывались при обработке результатов экспериментов. Для контроля за постоянством температуры рабочей пластины в ней по длине были зачеканены термопары. Показания термопар различались менее чем на $1,5^\circ\text{C}$ при температуре пластины до 85°C . Измерения производились в стационарном режиме. Контроль за постоянством режима осуществляли по показаниям датчика давления "Сапфир", термопар по длине пластины и ваттметра. Термопарный зонд поднимался от пластины до высоты 45-50 мм, что превышало половину диаметра шаров. Измерение данных и последующая их обработка производились в автоматизированном режиме с использованием ЭВМ. Время проведения одного эксперимента составляло около 3 мин. В каждом опыте производилось более ста измерений. Расчет значений коэффициента эффективной теплопроводности в опытах проводился по зависимости:

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{qs}{\Delta t}, \quad (2)$$

где q - плотность теплового потока от стенки к фильтрующей среде, $\text{Вт}/\text{м}^2$; s - расстояние между точками замера температуры, м; Δt - разность температур в точках замера, $^\circ\text{C}$.

На рис. 2 приведены результаты расчета для ядра потока. Как видно из графика, отношение коэффициента эффективной теплопроводности воздуха, движущегося в зерни-

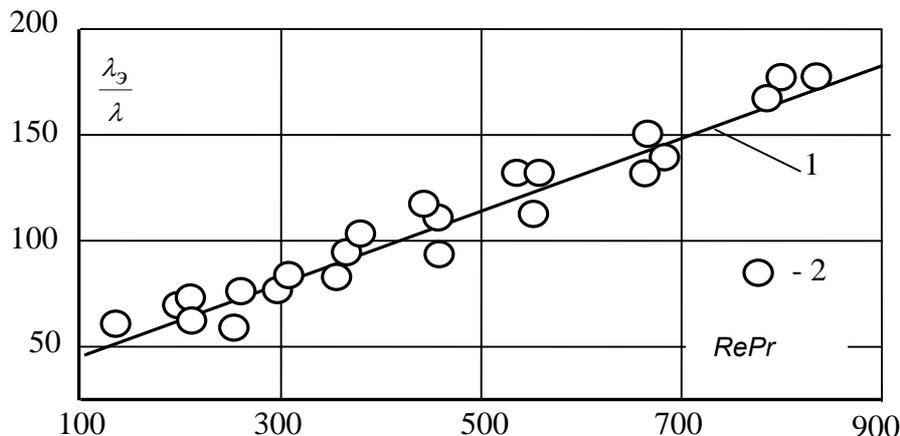


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента эффективной теплопроводности в ядре потока от комплекса критериев $RePr$: 1 - расчет по зависимости (3), 2 - экспериментальные данные

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕНА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ У ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

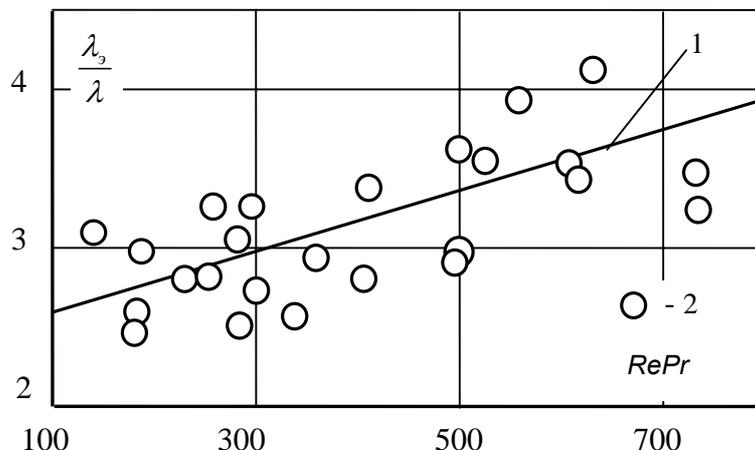


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента эффективной теплопроводности в пограничном слое у пластины от комплекса критериев $RePr$: 1 - расчет по зависимости (4), 2 - экспериментальные данные

стой среде, к коэффициенту теплопроводности воздуха линейно зависит от произведения критериев $RePr$. Экспериментальные данные обобщаются зависимостью:

$$\frac{\lambda_3}{\lambda} = 31,1 + 0,168 RePr \quad (3)$$

с погрешностью, не превышающей $\pm 15\%$. Скорость воздуха рассчитывалась на все поперечное сечение слоя. Характер зависимости (4) совпадает с зависимостями других авторов [1].

На рис. 3 приведены результаты расчета экспериментальных данных для пограничного слоя у пластины. Зависимость относительного коэффициента эффективной теплопроводности от комплекса $RePr$ также можно принять линейной, но влияние скорости движения воздуха на коэффициент теплопроводности в этой зоне незначительно. Экспериментальные данные обобщаются с погрешностью $\pm 10\%$ зависимостью:

$$\frac{\lambda_3}{\lambda} = 2,43 + 0,0017 RePr. \quad (4)$$

В исследованном диапазоне изменения скорости воздуха коэффициент эффективной теплопроводности фильтрующей среды вблизи стенки слабо зависит от среднерасходной скорости потока ввиду малости значения коэффициента B , в ядре потока зависимость соответствует эмпирическим формулам, приведенным в литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным и кипящим зернистым слоем. - Л.: Химия, 1997. - 119 С.
2. Горин А.В., Дехтярь Р.А., Мухин В.А., Саломатин Е.Н. Теплообмен фильтрующей жидкости со стенками канала, заполненного зернистой средой // Теплофизика и аэромеханика - 1996, Т.3, № 2. - С. 191-199.
3. Богомолов А.В., Петрик П.Т. Конденсация на поверхности цилиндра, помещенного в зернистый слой // Сиб. физ.-техн. - 1993. - № 6. - С. 6-10.