

Г. С. Маршалова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

В теплопереносе принято разделять конвекцию на вынужденную и свободную, и поэтому процессы рассматривают в предположении, что один из этих режимов течения является преобладающим. Однако создаваемые при конвективном течении перепады температур в окружающей среде при наличии поля объемных сил (типа силы тяжести) приводят к возникновению свободно-конвективных течений. Таким образом, даже в условиях действия вынужденной конвекции будут присутствовать проявления свободной. В практических расчетах большое значение имеют условия, при которых можно пренебречь влиянием одного механизма конвективного переноса на другой. Тем не менее, на практике возникают условия, когда оба вида конвекции играют существенную роль, тогда наблюдается явление смешанной конвекции. Такие условия, например, появляются при проведении термоанемометрических измерений проволочными и пленочными датчиками в низкоскоростных потоках, при свободной конвекции в условиях циркуляции жидкости окружающей среды, при вынужденном течении в нагреваемом канале, при охлаждении электронных приборов вентиляторами и во многих других случаях, представляющих практический интерес [1].

Смешанно-конвективный теплоперенос имеет большое значение для широкого класса инженерных задач. К сожалению, этому вопросу уделялось недостаточно внимания. Большинство работ были посвящены определению границ различных режимов переноса, т. е. определению условий, когда при вынужденном течении можно пренебречь влиянием свободной конвекции или, наоборот, при свободно-конвективном течении пренебречь влиянием вынужденного. В основной части исследований смешанно-конвективного теплообмена изучались ламинарные течения около поверхностей относительно несложной геометрической формы [1]. Смешанно-конвективный теплообмен около вертикальных поверхностей рассматривался в работах [2–4], для оребренных труб в модели воздушного конденсатора – в [5], а для аппаратов воздушного охлаждения – в [6].

Для изучения смешанной конвекции проводились экспериментальные исследования теплоотдачи в одно- и многорядных трубных пучках шахматной компоновки, состоящих из биметаллических ребристых труб следующих параметров: диаметр $d = 56,8$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,4$ мм; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно $h = 15,2$ мм; $s = 2,43$ мм; $\Delta = 0,52$ мм; теплоотдающая длина оребрения трубы $l = 300$ мм; общая длина оребренной трубы $l = 330$ мм. Коэффициент оребрения трубы составил $\phi = 21$. Изучались оребренные пучки с числом рядов $z = 1, 2, 3, 4$.

Для организации смешанной конвекции над теплообменным пучком устанавливались вытяжные шахты двух видов – с регулируемой высотой и с регулируемым проходным сечением. Шахта первого вида имела прямоугольное основание, переходящее через конфузор в цилиндрическую трубу диаметром $0,105$ м и с регулируемой высотой $H = 0,52; 1,16; 1,48; 2,10$ м. Для снижения тепловых потерь шахта снаружи покрыта слоем минерального волокна толщиной $0,02–0,03$ м. Шахта второго вида представляла собой параллелепипед из фанеры толщиной $0,004$ м с прямоугольным внутренним основанием $0,383 \times 0,313$ м и высотой $0,52$ м. Снаружи для снижения тепловых потерь она покрыта слоем пенополиуретана толщиной $0,028$ м и слоем минерального волокна толщиной $0,005$ м. В выходном сечении шахты устанавливались крышки площадью $f_{кр} = 0,125$ м² с круглым отверстием различного диаметра: $d_{отв} = 0,09, 0,105, 0,137; 0,160; 0,187; 0,205$ м, которые изготавливались из фанеры толщиной $0,01–0,015$ м, а для снижения тепловых потерь покрывались слоем минерального волокна толщиной $0,004$ м.

Экспериментальные исследования проводились методом полного теплового моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Центральная труба в пучке являлась калориметром. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее оснащение температурными датчиками, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [7]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термометра) изменялась в интервале $t_{ст} = 30-205^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 17-26^\circ\text{C}$, подводимая к калориметру электрическая мощность $W = 7-250$ Вт.

По данным измерений вычисляли средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, отнесенный к полной наружной поверхности:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{ст} - t_0) F},$$

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт; $F = \pi d_0 l$ – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м^2 .

Тепловой поток Q_k , Вт, отведенный от трубы к воздуху конвекцией, рассчитывался из уравнения

$$Q_k = W - Q_{\text{изл}} - Q_n,$$

где W – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт; $Q_{\text{изл}}$ – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт [8]; Q_n – тепловые потери через торцы труб и теплопроводы, Вт [9].

Результаты эксперимента представлялись в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad \text{Re} = \frac{w d_0}{\nu},$$

где λ , ν – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ и $\text{м}^2/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; w – скорость воздуха в сжатом сечении пучка, $\text{м}/\text{с}$.

Определяющей температурой для расчета теплофизических свойств воздуха является температура окружающего воздуха.

Скорость воздуха в пучке определялась косвенным образом из уравнения теплового баланса

$$Q = n(W - Q_n) = c_p \rho V (t_{ст} - t_0),$$

где $Q = Q_k + Q_n$ – теплота, подведенная к потоку воздуха, проходящего через пучок, Вт; n – число труб в пучке, шт; c_p – средняя изобарная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – объемный расход воздуха через пучок, $\text{м}^3/\text{с}$; $t_{ст}$ – средняя температура воздуха в шахте, $^\circ\text{C}$.

Средняя изобарная теплоемкость c_p и плотность ρ определялись по средней температуре воздуха в пучке $0,5(t_{ст} + t_0)$. Тогда скорость воздуха в пучке

$$w = \frac{n(W - Q_n)}{f_{сж} c_p \rho (t_{ст} - t_0)},$$

где $f_{сж}$ – площадь сжатого сечения пучка, м^2 , которая рассчитывалась по формуле

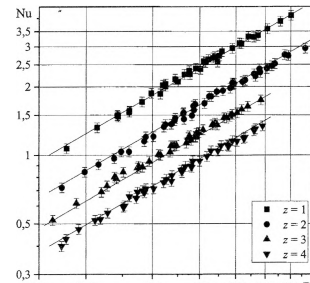
$$f_{сж} = \ln S \left[1 - \left(\frac{1}{S} \right) d \right].$$

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в режиме смешанной конвекции воздуха представлены на рисунке.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче одно- и многорядных пучков, представленных на рисунке, с погрешностью, не превышающей 5%, получено уравнение вида

$$\text{Nu} = (0,00189 + 0,00988 \cdot 0,5866^z) \cdot \text{Re}^{0,96},$$

действительное в интервале $\text{Re} = 130-760$, где z – число рядов в пучке. Его анализ показывает, что при $z > 6$ дальнейшее возрастание числа рядов оказывает малозначительное влияние на смешанно-конвективный теплообмен. Это объясняется тем, что увеличение подъемной силы за счет добавления рядов компенсируется растущим сопротивлением движению воздуха.



Теплоотдача одно- и многорядных пучков в режиме смешанной конвекции

Стоит отметить, что относительный рост теплоотдачи в пучке (определяемый степенью 0,96) при смешанной конвекции с увеличением числа Рейнольдса более существенен по сравнению с ростом теплоотдачи при вынужденной конвекции воздуха (степень 0,7–0,8) [10].

Таким образом, в результате проведения экспериментального исследования смешанно-конвективной теплоотдачи одно- и многорядных пучков получено критериальное уравнение, позволяющее проводить тепловой расчет пучков, состоящих из биметаллических ребристых труб, в режиме смешанной конвекции воздуха, организованном с помощью установки вытяжной шахты.

Литература

- Гейхарт, Б. Свободноконвективные течения: тепло- и массообмен / Б. Гейхарт, Й. Джалаурия, Р. Махаджан ; пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко. – 1-е изд. – М. : Мир, 1991. – 678 с.
- Шевчик, А. А. Совместное действие вынужденной и свободной конвекции при ламинарном течении / А. А. Шевчик // Труды Амер. о-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. – 1964. – № 4. – С. 41.

3. Merkin, J. H. The effect of buoyancy forces on the boundary-layer flow over a semi-infinite vertical flat plate in a uniform free stream / J. H. Merkin // J. of Fluid Mechanics. – 1969. – Vol. 35. – P. 439–450.

4. Lloyd, J. R. Combined forced and free convection flow on vertical surface / J. R. Lloyd, E. M. Sparrow // Int. J. Mass Transfer. – 1970. – Vol. 13. – P. 434–438.

5. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман // Теплоэнергетика. – 2005. – № 5. – С. 16–19.

6. Васильев, Ю. Н. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций / Ю. Н. Васильев, Г. А. Марголин. – СПб.: Недра, 1977. – 222 с.

7. Сидорик, Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглобразных труб и пучков / Г. С. Сидорик // Тр. БГТУ. Серия 1. Лесн. хоз-во, природопользов. и перераб. возобнов. ресурсов. – 2018. – № 1 (204). – С. 85–93.

8. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. В. Самородов; АГТУ. – СПб., 1999. – С. 22.

9. Сухоцкий, А. Б. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик // Тр. БГТУ. Серия 2. Хим. технол., биотехн., геозокол. – 2017. – № 1(193). – С. 68–74.

10. Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.

УДК 532.546

Ю. С. Теплицкий, Э. К. Бучилко, Е. А. Пищула

ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИКИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СЛОЕВ ЧАСТИЦ РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ

Введение. Неподвижные и взвешенные полидисперсные зернистые слои находят широкое применение во многих областях промышленности. В связи с этим изучению этих дисперсных систем уделяется большое внимание. Смеси частиц разного размера и плотности – особый класс зернистых слоев, который изучен недостаточно. Одной из основных проблем является определение закономерностей перехода таких слоев во взвешенное состояние при увеличении скорости фильтрации газа, в том числе зависимости скорости начала псевдооживления от фракционного состава частиц и величин их плотности.

Аэродинамика полидисперсного слоя. Как известно [1], скорость начала псевдооживления является важнейшей характеристикой перехода неподвижного слоя в кипящий. Ее расчет базируется на использовании закономерностей аэродинамики неподвижного слоя, как предстории кипящего. На основе описания течения в рамках капиллярной модели Козени–Кармана (внутренняя задача) и модели ансамбля шаров Хаппеля (внешняя задача) было показано, что гидравлическое сопротивление неподвижного зернистого слоя любой структуры можно представить следующей интерполяционной формулой [2]:

$$\frac{\Delta P}{H} = A(\varepsilon, d)\mu u + B(\varepsilon, d)\rho_t u^2, \quad (1)$$

где коэффициенты A, B зависят от структуры слоя (порозности и удельной поверхности частиц).

Уравнение (1), как следует из его структуры, описывает особенности течения в различных режимах влияния сил инерции и вязкости. Одной из наиболее распространенных практических формул, полученной на основе (1) путём обработки многочисленных опытных данных, является классическая формула Эргуна [3]:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{d^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_t u^2}{d}. \quad (2)$$

В качестве диаметра частиц в случае полифракционного слоя в (2) входит некий эквивалентный диаметр $d = d_m$ частиц смеси, формальное определение которого на основе (2) имеет вид

$$d_m = \frac{0,87(1-\varepsilon)\rho_t u^2 H}{\Delta P \varepsilon^3} + \sqrt{\left(\frac{0,87(1-\varepsilon)\rho_t u^2 H}{\Delta P \varepsilon^3} \right)^2 + 150 \frac{(1-\varepsilon)^3}{\varepsilon^3} \mu u \frac{H}{\Delta P}}. \quad (3)$$

В работе [4] с использованием опытных данных по величинам $\Delta P(u)$ в слоях аглопорита широкого фракционного состава на основе (3) была установлена простая формула для расчета d_m как среднеарифметического диаметра:

$$d_m = \sum_{i=1}^N \eta_i d_i, \quad (4)$$

где η_i – массовая доля частиц i -го сорта диаметром d_i .