

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООБМЕНА НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ

Дементьева Т.Ю., канд. техн. наук, Солодкая А.В., аспирантка
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Представлена методика экспериментального исследования коэффициентов теплоотдачи компонентов слоя. Получены обобщенные зависимости по теплоотдаче газового и твердого компонентов при наличии в слое источников тепла.

This article presents method of experimental study heat transfer coefficients of layer's components. Were obtained general dependencies of heat transfer gas and solid components in the layer if there is heat sources.

Ключевые слова: теплообмен, неподвижный слой, внутренние источники теплоты.

Процессы нагрева, охлаждения, сушки, прокали и терморазложения сыпучих материалов широко используются в различных отраслях промышленности. В отечественных и зарубежных исследованиях показана целесообразность осуществления этих процессов в рекуперативных теплообменниках с плотным движущимся продуваемым и непродуваемым слоем. Для разработки, расчета, проектирования и оптимизации таких теплообменников необходимо комплексное изучение тепломассопереноса в плотных слоевых системах. Результаты таких исследований находят применение при тепловых расчетах различных устройств: установок энерготехнологических переработки топлива; химических реакторов; регенераторов катализатора; радиационных труб высокотемпературных печей для производства высокочистых окислов; сушилок для дисперсных материалов, для которых недопустим либо нежелателен непосредственный контакт с сушильным агентом; аппаратов для термообработки материалов, продукты разложения которых необходимо улавливать; теплообменных аппаратов энергетической установок с плотным слоем промежуточного теплоносителя [1,4].

Строгое описание процессов переноса в плотном неподвижном фильтруемом слое дисперсного материала затруднено в связи с тем, что он представляет собой гетерогенную двухкомпонентную систему «газ- твердые частицы», в которой на границе раздела компонентов скачкообразно изменяются физические свойства и параметры. Поэтому при разработке методов расчета слоевых аппаратов используют различные упрощенные модели, основанные на определенных представлениях. Достаточно обоснованными являются одно- и двухкомпонентные модели. В однокомпонентных моделях слой рассматривается как квазисплошная среда с эффективными коэффициентами переноса. Такие модели, привлекающие своей простотой, могут быть использованы лишь в ограниченной области изменения параметров, когда температуры газового и твердого компонентов практически одинаковы [3]. В ряде случаев (например, при наличии тепловыделения в слое, низкой интенсивности межкомпонентного теплообмена, кратковременных нестационарных процессах) температуры компонентов существенно различаются. В подобных условиях применяют двухкомпонентные модели, согласно которым слой рассматривается как система двух взаимопроникающих континуумов (твердого и газового компонентов) с соответствующими эффективными коэффициентами переноса. Процессы в каждом компоненте описываются уравнениями для сплошных сред, а взаимодействие между ними учитывается с помощью коэффициентов межкомпонентного теплообмена. Такие модели достаточно полно отражают основные особенности протекающих в слое процессов, в то же время сравнительно просты (не смотря на трудности в определении коэффициентов переноса для каждого компонента) [2,4].

При расчетах температурных полей в неподвижном продуваемом слое с погруженными поверхностями необходимы данные по пристенным коэффициентам теплоотдачи компонентов, определение которых является более сложной процедурой, чем определение коэффициентов теплоотдачи слоя. При наличии тепловыделений низкой интенсивности температуры газа и частиц не равны между собой. В этом случае необходимо определять два параметра – пристенные коэффициенты теплоотдачи газового и твердого компонентов.

Расчетные зависимости коэффициентов теплоотдачи были получены на основе двухкомпонентной модели слоя как решение одномерных уравнений энергии, описывающих теплоперенос в газовом и твердом компонентах при наличии источников тепла в твердом компоненте

$$G_T C_{pT} \frac{dt_T}{dx} = -\alpha_{\text{гг}}^T F_{\text{гг}} (t_T - t_{\text{гг}}) + \alpha_M \alpha (1 - \beta_2) (t_T - t_T) \quad (1)$$

$$-\alpha_M \alpha (1 - \beta_2) (t_T - t_T) - \alpha_{\text{гг}}^T F_{\text{гг}} (t_T - t_{\text{гг}}) + q_V (1 - \beta_2) = 0 \quad (2)$$

Граничное условие на входе

$$x = 0; \quad t_T = t_T^* \quad (3)$$

где G_T – массовая скорость фильтрации газа, кг/(м²/с);

C_{pT} – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К)

– площадь погруженных поверхностей в единице объема, м²/м³;

$t_T, t_{\text{гг}}$ – текущие температуры газового и твердого компонентов соответственно, К;

– температура погруженных поверхностей, К;

α_M – коэффициент межкомпонентного теплообмена, Вт/(м²·К);

α – поверхность частиц в единице объема слоя, м²/м³;

β_2 – доля объема, затаманного погруженными поверхностями;

q_V – удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/м³.

Уравнения (1) и (2) справедливы при следующих допущениях:

а) физические характеристики газового и твердого компонентов постоянны;

б) мощность всех погруженных поверхностей одинаковы;

в) термическое сопротивление теплопроводности частиц пренебрежимо мало;

г) продольный кондуктивный перенос тепла в компонентах слоя пренебрежимо мал по сравнению с конвективным теплопереносом и теплом, выделяемым внутренними источниками тепла.

При аналитическом решении уравнений энергии (1) и (2) получены следующие зависимости для распределения температур в газовом и твердом компонентах, которые являются исходными для экспериментального определения пристенных коэффициентов теплоотдачи:

$$t_T = t_{\text{гг}} + \left[(t_{\text{гг}} - t_T^*) + \frac{B_1 H}{(1 + E_2) P} \right] \exp(Px) - \frac{B_1 H}{(1 + E_2) P} \quad (4)$$

$$t_{\text{гг}} = t_{\text{гг}} + \frac{(t_T - t_{\text{гг}}) + H}{1 + E_2}, \quad (5)$$

$$P = \frac{B_1}{1 + E_2} - B_1 - E_1,$$

$$E_1 = \frac{\alpha_{\text{гг}}^T F_{\text{гг}}}{G_T C_{pT}}, \quad E_2 = \frac{\alpha_{\text{гг}}^T F_{\text{гг}}}{\alpha_M \alpha (1 - \beta_2)}$$

$$B_1 = \frac{\alpha_M \alpha (1 - \beta_2)}{G_T C_{pT}}, \quad H = \frac{q_V}{\alpha_M \alpha}.$$

Поскольку исходные уравнения (1) и (2) записаны в одномерном приближении, то при проектировании экспериментального стенда и проведении опытов необходимо обратить внимание на равномерность размещения погруженных теплообменных поверхностей, а также равномерность распределения внутренних источников тепла, структуры слоя и скоростей газа.

При соблюдении указанных условий в поперечных сечениях будут наблюдаться только незначительные флуктуации температуры, которые могут быть учтены путем использования при обработке экспериментальных данных, осредненных по поперечному сечению температур компонентов.

Проведенные ранее расчетно-экспериментальные исследования показали, что для возможности пренебрежения термическим сопротивлением теплопроводности частиц с продольным кондуктивным переносом опыты необходимо проводить при значительных числах Био:

$$Bi = \frac{\alpha_M \alpha L_T}{\lambda_T} \leq 0.1 \quad (6)$$

и числа Пекле:

$$Pe^* = \frac{G_T C_{pT} L_2}{(\alpha - \beta_1) \lambda_T^*} \geq 20, \quad (7)$$

где β_1 – доля поперечного сечения, занятого погруженными поверхностями;

l_0 – минимальное расстояние от входа до сечения, в которых измеряются температуры компонентов, м;

λ_g – продольный эффективный коэффициент теплопроводности газового компонента, Вт/(м·К).

Входящие в уравнения (4) и (5) коэффициент межкомпонентного теплообмена α_M и удельная поверхность частиц в единице объема слоя α могут быть рассчитаны по зависимостям:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{d_T} (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

- при $Re = \frac{\rho_T d_T}{\mu_T} \leq 200$

$$\alpha_M = 0,106 \frac{\lambda_g}{d_T} Re_T \quad (9)$$

- при $Re = \frac{\rho_T d_T}{\mu_T} > 200$

$$\alpha_M = 0,61 \frac{\lambda_g}{d_T} Re_T^{0,67}, \quad (10)$$

где

d_T – диаметр частиц, м;

ε – порозность слоя;

λ_g – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);

μ_T – коэффициент динамической вязкости Па·с.

При проведении экспериментальных исследований измеряют расход газа, мощность внутренних источников тепла, температуру погруженных поверхностей газа и частиц на входе и в нескольких продольных сечениях слоя (координаты которых известны).

По результатам измерений пристенный коэффициент теплоотдачи твердого компонента может быть определен непосредственно из уравнения (2):

$$\alpha_{ст}^T = \frac{q_v(1-\beta_2) - \alpha_M \alpha(1-\beta_2)(t_T - t_{с2})}{F_{ст}(t_T - t_{с2})} \quad (11)$$

Пристенный коэффициент теплоотдачи газового компонента может быть найден путем решения трансцендентного уравнения (4)

По изложенной выше методике было исследовано влияние различных факторов на теплообмен неподвижного продуваемого слоя, содержащего внутренние источники теплоты, с коридорным трубным пучком. В качестве насадки использовалась свинцовая дробь сферической формы. В качестве газового компонента использовался воздух. Геометрические и режимные условия проведения опытов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Диапазон изменения основных входных характеристик

Диаметр труб, D, мм	Поперечный шаг труб, S ₁ , мм	Продольный шаг труб, S ₂ , мм	Скорость фильтрации, W, м/с	Диаметр частиц, d _T , мм	Мощность внутренних источников, q _v , Вт/м ³
30	От 30 до 70	От 30 до 70	От 0,1 до 0,5	От 5 до 9	От 10 ³ до 10 ⁶

В результате экспериментальных исследований получили, что с ростом мощности внутренних источников теплоты, при прочих равных условиях температуры компонентов слоя и их разность возрастает.

При рассмотрении влияния скорости фильтрации на теплообмен плотного продуваемого слоя получили, что увеличение скорости фильтрации приводит к уменьшению температур газового и твердого компонентов.

При данной методике проведения опытов возможным является также изменение размера твердых частиц (диаметр свинцовой дроби), то своеобразно влияет не столько на температуры компонентов, а на теплоотдачу слоя в целом. Так, если увеличить диаметр частиц, то сами значения температур газового и твердого компонентов изменяется незначительно, а их разность значительно возрастает.

Еще один вариант возможности влияния на температуры компонентов – это изменение площади погруженных поверхностей в единице объема. Увеличение площади теплоотводящих поверхностей (что было достигну-

то путем понижения поперечного и продольного шагов труб) приводит к уменьшению температур компонентов. Различие между температурами твердого и газового компонентов увеличивается с уменьшением площади погруженных поверхностей в единице объема.

Все экспериментальные данные со среднеквадратической погрешностью 12-15% обобщаются зависимостями:

$$Nu_{\Gamma}^I = \frac{\alpha_{\Gamma}^I D}{\lambda_{\Gamma}} = 3,4 Re_D^{0,39} \left(\frac{D}{d_{\Gamma}} \right)^{0,17} \quad (12)$$

$$Nu_{\Gamma}^T = \frac{\alpha_{\Gamma}^T D}{\lambda_{\Gamma}} = 2,1 Re_D^{0,37} \left(\frac{D}{d_{\Gamma}} \right)^{0,20} \quad (13)$$

Формулы справедливы в диапазоне чисел Рейнольдса от 150 до 1600 и симплекса $\left(\frac{D}{d_{\Gamma}} \right)$ от 3,2 до 6,4.

Выводы

1. Формулы Тимофеева (9) и (10) в пределах их погрешности можно рекомендовать для расчетов коэффициентов межкомпонентного теплообмена в слое, содержащем внутренние источники тепла и погруженные поверхности.
2. Различие между температурами газа и частиц возрастает с увеличением мощности внутренних источников тепла и диаметра частиц, а также с уменьшением скорости фильтрации газа и площади погруженных поверхностей в единице объема.
3. Существенного влияния мощности внутренних источников тепла на пристенные коэффициенты теплообмена не выявлено. Мощность внутренних источников оказывает существенное влияние на распределение температур в слое и разницу температур между компонентами.
4. Пристенные коэффициенты теплообмена газового и твердого компонентов слоя в различных пропорциях возрастают с увеличением скорости фильтрации и уменьшению диаметра частиц.
5. Полученные обобщенные зависимости (12) и (13) могут быть использованы для расчета пристенных коэффициентов теплообмена в указанном диапазоне изменения определяющих параметров

Литература

1. Аэров М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы / А.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наинский. - Л: Химия, 1979. - 176 с.
2. Календерьян В.А. Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое / В.А. Календерьян, В.В. Корнараки. - Одесса: Выща школа, 1982. - 160 с.
3. Календерьян В.А. Об учете теплообмена неподвижного фильтруемого слоя с погруженными поверхностями двухкомпонентной модели переноса / В.А. Календерьян, В.Р. Гапасов, О.Л. Овчаренко. - ИФЖ, 1992. - Т.63. - №1. - С. 63-68.
4. Moselmian D. Heat transfer to horizontal tubers in a fluidized bed. The role of superficial gas and local particle velocities / D. Moselmian, M.M. Chen, B.T. Chan // Exp. Therm. And Fluid Sci., 1991. - 4. - №1. - P. 76-89.