Тепловые процессы при нагреве засыпки гранул

Кривошеев Ю.К.
Белорусский национальный технический университет

Засыпка гранул моделируется правильной равномерной структурой, что позволяет свести задачу к одномерной. Поскольку размер гранул небольшой (не более 2 мм), зазор между ними также не превышает 2 мм, поэтому можно предположить, что конвекция отсутствует, а перенос теплоты осуществляется теплопроводностью и излучением. Рассмотрим *i*– тый слой внутри засыпки, при этом i меняется от 0 – наружный слой – до N – слой засыпки, соприкасающийся с контейнером. Суммарный тепловой поток *qi* к *i* – тому слою определяется как сумма падающего на слой потока теплоты *q*+ и потери теплоты слоем *q*- , т.е.

$$q_i = q_+ + q_-$$

Падающий поток теплоты представляет собой сумму потоков излучения от соседних слоёв (верхнего и нижнего) и потока теплопередачей от более «горячего» верхнего слоя

$$q_+ = \varepsilon\sigma T_{i-1}^4 + \varepsilon\sigma T_{i+1}^4 + \alpha_i (T_{i-1} - T_i)\ ,$$

где ε – степень черноты поверхности гранул, σ – постоянная Стефана – Больцмана, *Ti* – температура *i*-го слоя, *αi* – термическая проводимость контакта между гранулами соседних слоёв. Тепловые потери слоя определяются радиационным теплообменом слоя и теплопередачей к слою, расположенному ниже, а потому более холодному

$$q_- = 2\varepsilon\sigma T_i^4 + \alpha_i (T_i - T_{i+1})\ .$$

На внешней поверхности засыпки при *i*= 0 полагаем, что

$$q_+^0 = Q + \varepsilon\sigma T_1^4\ ,$$

где Q – тепловой поток от внешнего источника (нагревателя печи), на нижней поверхности при i = N тепловой поток в направлении контейнера

$$q_{-}^{N} = \varepsilon\sigma T_N^4 + \alpha(T_N - T^*)\,,$$

где T^* – температура дна контейнера, α – коэффициент теплопередачи, определяемый теплоотводом к поверхности дна контейнера. Тепловой балансi-го слоя выразится следующим образом

$$c_i m_i \frac{dT_i}{dt} = q_i\,.$$

Отдельной проблемой является определение параметра αi, который представляет термическую проводимость контакта между гранулами. Термическое контактное сопротивление зависит от большого числа различных факторов, таких как: давления, с которым поверхности прижимаются друг к другу; теплопроводности газа, находящегося в промежутке между контактирующими телами; шероховатости поверхности; твёрдости поверхности. Для описания термических условий на границе раздела полезно знать α – термическую проводимость контакта, которая определяется из соотношения

$$q = \alpha\square T\,.$$

В работе [1] (раздел 2.4.6.) изложен метод оценки термической проводимости контакта, основанный на анализе большого числа экспериментов, описанных в литературе. Зависимость для расчёта термической контактной проводимости приведена в виде диаграммы. Термическая проводимость в месте контакта включена в число Нуссельта, отложенного по оси ординат, в которое также входят эффективная толщина зазора lи эквивалентный коэффициент теплопроводности среды λ, находящейся в зазоре. На оси абсцисс отложено отношение безразмерной величины зазора B к безразмерному коэффициенту теплопроводности K. Параметром на диаграмме является безразмерное сжатие C. Для того чтобы с помощью диаграммы рассчитать термическую проводимость контакта, следует установить или оценить следующие величины:

материал соприкасающихся поверхностей; среда, находящаяся в зазоре; среднеквадратичное значение шероховатости поверхностей; давление контакта P; твёрдость по Мейеру M; полную площадь поверхности A, находящуюся в контакте (одна сторона); коэффициенты теплопроводности материалов поверхности $\lambda 1, \lambda 2$.

Для наиболее типичных условий спекания эффективный коэффициент теплопередачи контакта составляет величину порядка 1000…2000 Вт/(м^2·К).

Таким образом, приходим к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$cm_1 \frac{dT_0}{dt} = Q + \varepsilon\sigma T_1^4 - \varepsilon\sigma T_0^4 - \alpha_1 \left(T_0 - T_1\right), \qquad (1)$$

для $1 \le i \le N$

$$cm_i \frac{dT_i}{dt} = \varepsilon\sigma \left(T_{i+1}^4 + T_{i-1}^4 - 2T_i^4\right) + \alpha_i \left(T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i\right), \qquad (2)$$

$$cm_N \frac{dT_N}{dt} = \varepsilon\sigma \left(T_{N-1}^4 - T_N^4\right) + \alpha_N \left(T_{N-1} - T_N\right) + \alpha \left(T_N - T^*\right), \qquad (3)$$

где c – теплоёмкость материала гранул, m – эффективная масса слоя.

Система связанных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) (1 – 3) решалась численно с помощью пакета MathCAD (использовалась функция Rkadapt– решение системы ОДУ методом Рунге-Кутта с автоматическим выбором шага). Материалом гранул был выбран чугун, размер гранул составлял 1 мм, толщина засыпки – 20 слоёв.

Литература

1. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1 / Пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.