

*Д.О. Смолин, О.В. Демин\**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЫПУЧИХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

При исследовании процессов смешивания сыпучих полидисперсных материалов с поддержанием определенного температурного режима используют математические модели теплообменных процессов.

Предложена математическая модель процесса теплообмена, основанная на аппарате марковских процессов, адекватность которой подтверждена экспериментом [1, 2].

Текущее состояние процесса теплопроводности можно представить распределением его параметров в виде векторов-столбцов температуры  $T$  и теплоты  $Q$ , каждый из которых имеет размер  $m \times 1$ , где  $m$  – число элементарных объемов.

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ТГТУ В.Ф. Першина.

Продолжительность перехода между последовательными состояниями  $\Delta t$  выбирается настолько малой, чтобы среда могла перейти только в соседние элементарные объемы, но не далее. Текущее время при этом  $t_k = (k-1)\Delta t$ , где  $k$  – номер временного перехода.

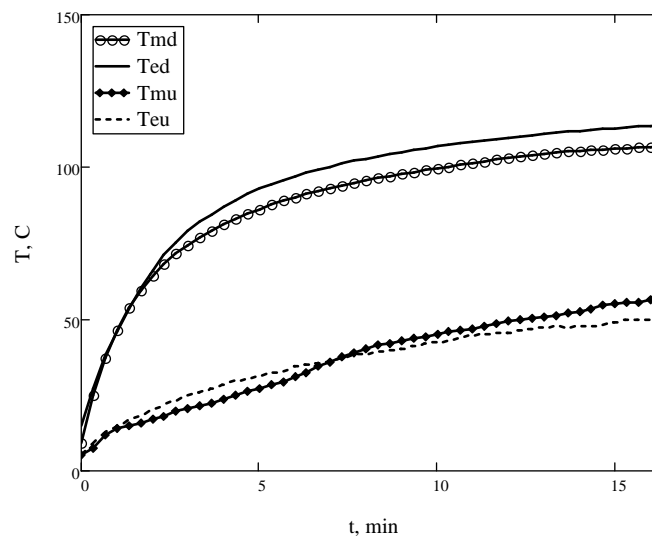
Кинетика процесса определяется рекуррентными матричными равенствами:

$$Q^{k+1} = P_Q^k Q^k + \Delta Q_h^k,$$

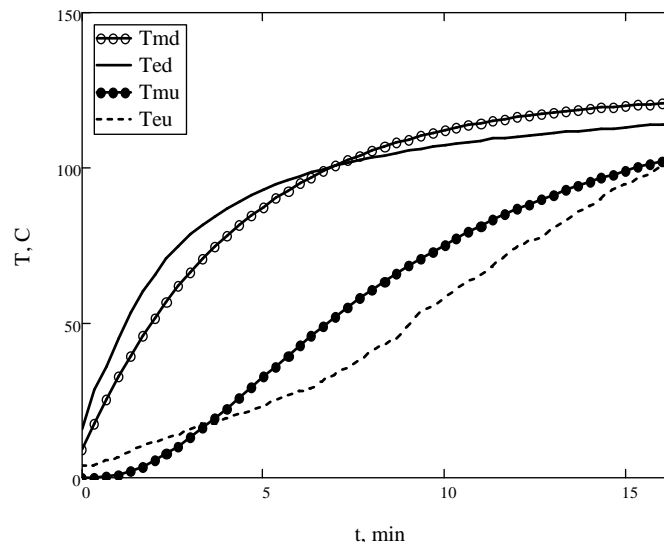
где  $P_Q^k$  – матрица переходных вероятностей, контролирующая движение теплоты;  $\Delta Q_h^k$  – вектор, контролирующий передаваемую за переход теплоту от нагреваемой поверхности к сыпучему материалу;

Матрица переходных вероятностей имеет размерность  $m \times m$  и ее элементы численно равны вероятностям передачи тепла между частицами. Кроме этого используется матрица масштабных коэффициентов, элементы которой численно равны отношению объемов контактирующих частиц.

Для расчетов по математической модели была использована программа, реализованная на языке программирования C++ с использованием физического движка physX. Программа позволяет при различных концентрациях полидисперсного материала определить температуру верхнего слоя, минимальное, максимальное и среднее количество контактов для каждой фракции. Работа программы начинается с запроса у пользователя количества фракций, участвующих в моделировании процесса. Для каждой фракции задаются ее процентное соотношение, размер частицы, масса, начальная температура. Также задается начальная температура нагревателя. Затем производится засыпка материала и моделирование процесса теплообмена. После завершения моделирования производится построение графиков изменения температуры материала и сравнение ее значений с экспериментальными данными (рис. 1 (дробь № 5 – 100%) и рис. 2 (дробь № 5 – 25%, дробь № 2 – 75%)) (Tmd – расчетная температура нижнего слоя; Tmu – расчетная температура верхнего слоя).



**Рис. 1. Изменение температуры дробей**



**Рис. 2. Изменение температуры дробей**

Для проверки адекватности математической модели проведен ряд экспериментов по исследованию теплообменных процессов в сыпучих полидисперсных материалах на установке, состоящей из нагревателя и керамической трубы, в которую засыпается исследуемый продукт. Необходимый температурный режим работы установки поддерживается термостатом. Контроль температуры материала производится с помощью термопары и ПИД-регулятора.

Эксперимент проводили при различных концентрациях модельного материала: оружейная дробь № 5 диаметром 3 мм и № 2 – 3,75 мм. В ходе эксперимента фиксировали температуру нижнего и верхнего слоя продукта ( $T_{ed}$  – экспериментальная температура нижнего слоя;  $T_{eu}$  – экспериментальная температура верхнего слоя). При обработке данных использовались экспериментальные значения теплопроводности и насыпной плотности материала. Начальная температура дробы 20°C, температура нагревателя 125°C.

При 100%-ной концентрации дробы № 5 среднеквадратичная погрешность математической модели относительно экспериментальных данных для нижнего слоя составила 5,1%, для верхнего – 3,0%; относительная погрешность для нижнего слоя составила 6,4%, для верхнего – 8,4%. При концентрации дробы № 5 – 25% и дробы № 2 – 75% среднеквадратичная погрешность математической модели относительно экспериментальных данных для нижнего слоя составила 6,2%, для верхнего – 9,8%; относительная погрешность для нижнего слоя – 7,9%, для верхнего – 12,4%.

Математическая модель на основе цепей Маркова позволяет расширить возможности прогнозирования теплообменных процессов, применима для проведения исследований процесса смешивания сыпучих полидисперсных материалов, неразрушающего контроля и диагностики теплофизических свойств сыпучих материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольман-Иванов. Э.Э. Конструирование и расчет машин химических производств / Э.Э. Кольман-Иванов. – М. : Энергия, 1985.
2. Баруча-Рид, А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения / А.Т. Баруча-Рид. – М., 1969.