УДК 622.794.4.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕЙ

Павлыш В.Н. канд. техн. наук, доц., Тарабаева И.В., ассистент
Донецкий национальный технический университет

Предложена математическая модель процесса сушки влажной измельченной массы с использованием «кипящего слоя». Модель основана на уравнениях математической физики.

The mathematical model of process of drying of damp crushed mass is proposed. The model is based on the equations of mathematical physics.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.

Процессы сушки являются важной составляющей технологии производства в различных отраслях промышленности (угольной, химической и др.) /1,2/, в связи с чем совершенствованию техники и технологии сушки уделяется постоянное внимание как со стороны научных организаций, так и со стороны промышленных предприятий.

Общей проблемой является интенсификация процесса сушки, а также создание и внедрение новой сушильной техники.

В этой связи стоит задача расширения исследований технологических схем и параметров сушки, что в свою очередь поднимает роль такого важного современного метода исследования, как метод математического моделирования с применением компьютеров. Таким образом, в комплексе средств решения общей проблемы выделяется задача математического моделирования процесса сушки.

Анализ исследований и публикаций, в которых закладывается направления решения проблемы.

Проблема сушки решается в нашей стране по следующим основным направлениям: математические методы исследования и расчета параметров процесса сушки; исследование и уточнение механизма внешнего и внутреннего переноса энергии и массы при различных способах сушки; развитие технологии и техники сушки /1,2/.

Математические исследования направлены на получение более полного математического описания сложных взаимосвязанных явлений тепло- и массообмена, уточнение краевых условий в различных процессах сушки и решение системы уравнений тепломассопереноса и количества движения. Для доведения решений математических задач до инженерного расчета большую помощь оказывает использование совершенной счетнорешающей техники (электронные вычислительные машины). Дальнейшее развитие математических методов исследования дает ценные практические результаты.

Технология сушки в «кипящем слое» является современной эффективной схемой. Для исследования процесса необходимо иметь адекватную математическую модель. Разработанные к настоящему времени модели не учитывают тот фактор, что процесс проходит в условиях сплошной среды, а, следовательно, не используют уравнения математической физики.

Целью данной статьи является разработка адекватной модели процесса сушки влажного сыпучего материала в «кипящем слое», основанной на уравнениях математической физики, которые описывают процессы в сплошной среде.

Физическая ***постановка задачи*** формулируется следующим образом.

Сушка происходит в аппарате, схема которого показана на рис.1. В камеру сушилки, снабженной газопроницаемым поддерживающим устройством в виде сетки, пористой перегородки и т.п., которое будем называть газораспределительной решеткой, помещается сыпучий материал.

Для создания режима локального фонтанирования применяют газораспределительную решетку, позволяющую вводить в псевдоожиженный слой ожижающий агент с высокой скоростью. Благодаря этому в слое образуются зоны, в которых частица и среда движутся с более высокими, чем в слое, скоростями, а обмен между этими зонами делает более интенсивными процессы тепло- и массообмена /3/.

Гидродинамическая структура потоков, возникающих при локальном вводе ожижающего агента в псевдоожиженный слой указывает на наличие четырех зон перемешивания (рис.2) /4/.

Зона I – фонтан из частиц, движущихся вверх.

Зона II – прирешеточная активная зона.

Равнодействующая сил на частицы в этой зоне направлена в сторону фонтана вследствие интенсивного перемешивания и втягивающей силы фонтана.

Зона III – зона слоя, прилегающего к фонтану и активно питающая фонтан.

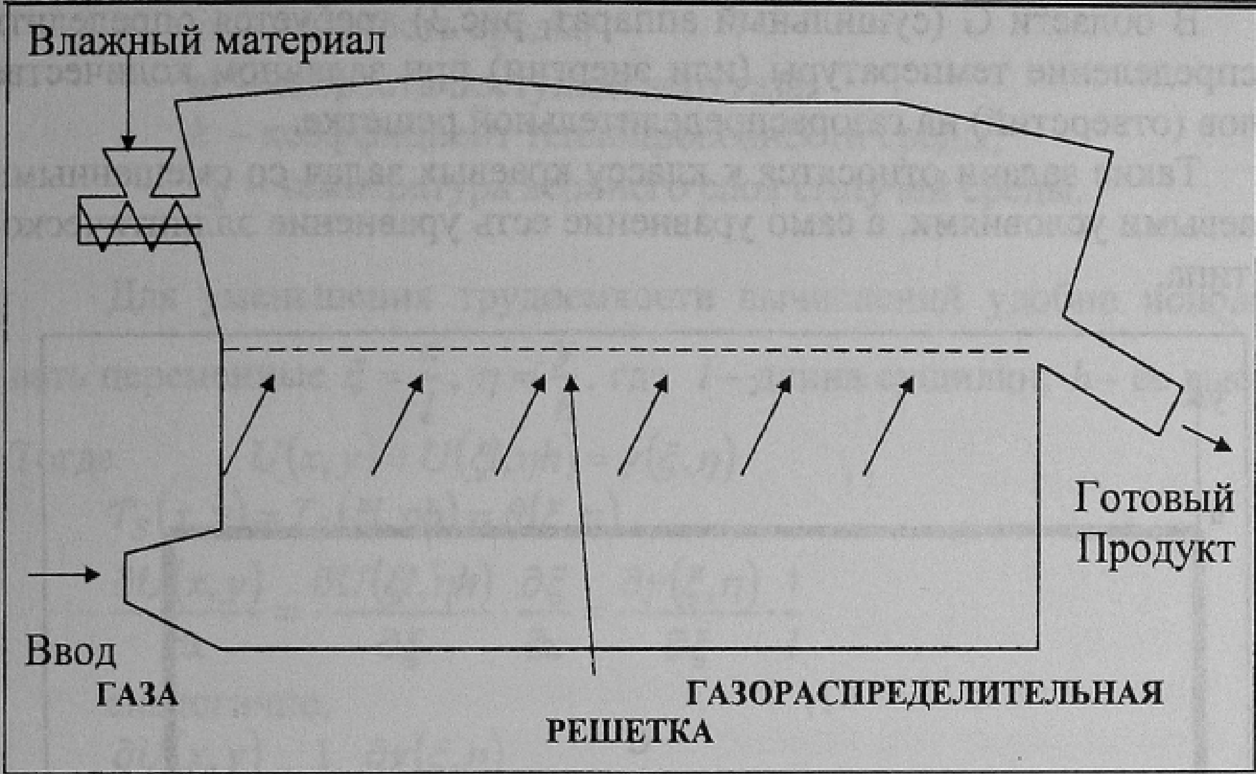

Рисунок 1 – Схема сушильного аппарата

Зона IV – наименее активная зона с преимущественным движением вниз за счет обмена с активной прирешеточной зоной и зоной III.

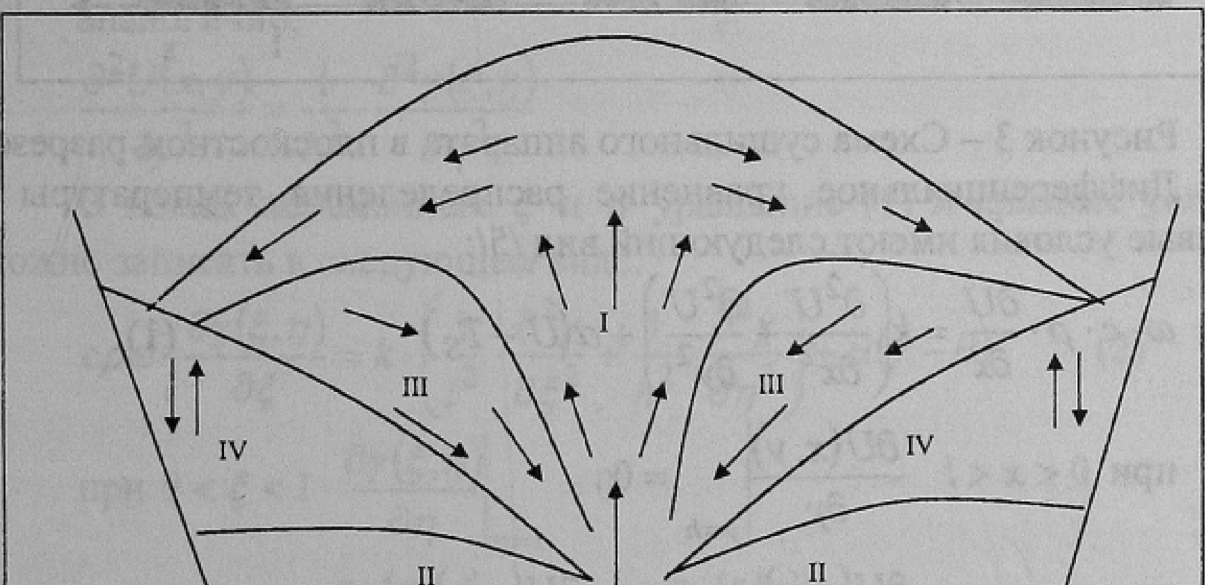

Рисунок 2 – Схема структуры потоков

Будем строить математическую модель процесса сушки сыпучей среды в сушильном аппарате.

Рассматривается следующая задача.

В области G (сушильный аппарат, рис.3) требуется определить распределение температуры (или энергии) при заданном количестве узлов (отверстий) на газораспределительной решетке.

Такие задачи относятся к классу краевых задач со смешанными краевыми условиями, а само уравнение есть уравнение эллиптического типа.

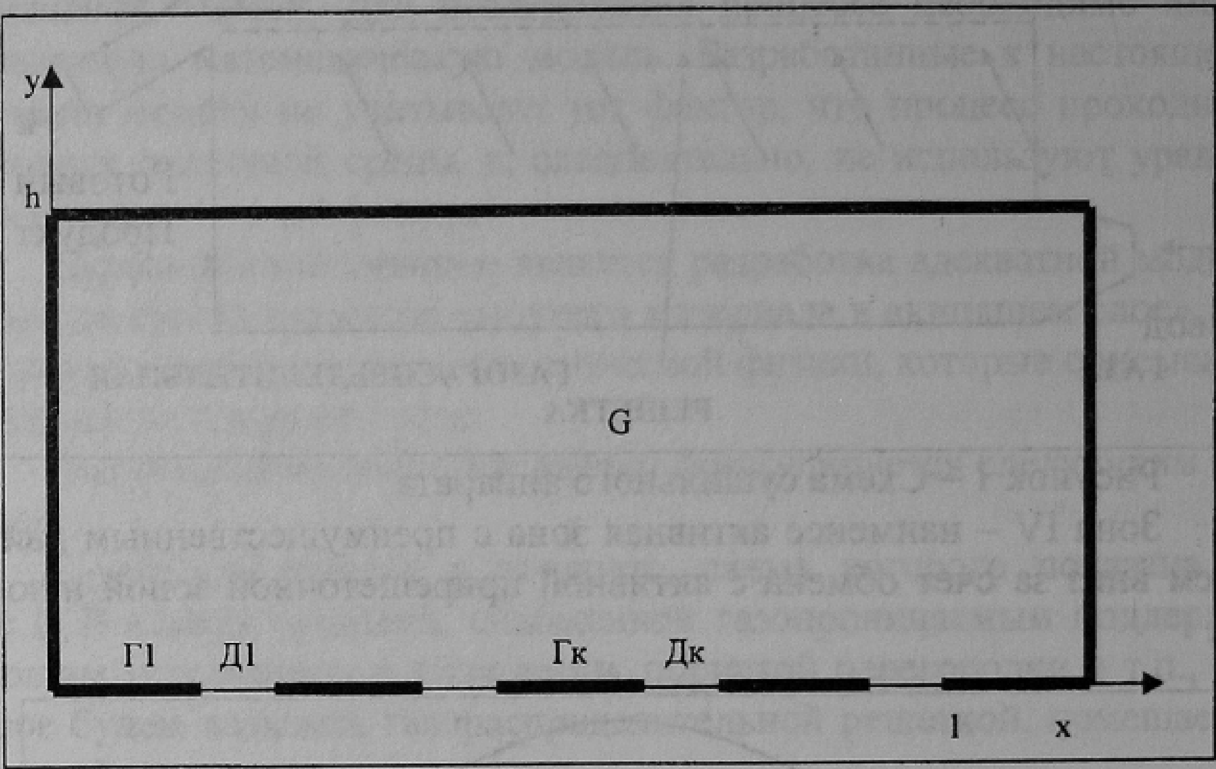

Рисунок 3 – Схема сушильного аппарата в плоскостном разрезе

Дифференциальное уравнение распределения температуры и краевые условия имеют следующий вид /5/:

$$\omega \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial x} = k\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right) + \alpha\left(U - T_S\right) \qquad (1)$$

при $0 < x < l$ $\left.\frac{\partial U(x,y)}{\partial y}\right|_{y=h} = 0$

при $0 \le y \le h$ $\left.\frac{\partial U(x,y)}{\partial x}\right|_{x=0} = 0;$ $\left.\frac{\partial U(x,y)}{\partial x}\right|_{x=l} = 0$

при $(x,y) \in \Gamma_к$ $\frac{\partial U(x,y)}{\partial y} = 0$

при $(x,y) \in Д_к$ $U(x,y) = U$

где U – температура поступающего газа;

c – удельная теплоемкость сыпучей среды;

ρ – плотность среды;

ω – скорость поступающего газа;

k – коэффициент теплопроводности среды;

T_S – температура верхнего слоя сыпучей среды.

Для уменьшения трудоемкости вычислений удобно использовать переменные $\xi = \dfrac{x}{l}$, $\eta = \dfrac{y}{h}$, где l – длина сушилки, h – ее высота.

Тогда $\quad U(x,y) = U(\xi l, \eta h) = \gamma(\xi,\eta)$

$$T_S(x,y) = T_S(\xi l, \eta h) = \theta(\xi,\eta)$$

$$\frac{\partial U(x,y)}{\partial x} = \frac{\partial U(\xi l,\eta h)}{\partial \xi}\cdot\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \xi}\cdot\frac{1}{l}$$

аналогично,

$$\frac{\partial U(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{h}\cdot\frac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial U(x,y)}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \xi}\cdot\frac{1}{l}\right)\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{l^2}\frac{\partial^2 \gamma(\xi,\eta)}{\partial \xi^2}$$

аналогично,

$$\frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial y^2} = \frac{1}{h^2}\cdot\frac{\partial^2 \gamma(\xi,\eta)}{\partial \eta^2}$$

В новых переменных ξ и η уравнение (1) и краевые условия можно записать в следующем виде:

$$c\rho\omega\frac{1}{l}\frac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \xi} = k\cdot\left(\frac{1}{l^2}\cdot\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \xi^2} + \frac{1}{h^2}\cdot\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \eta^2}\right) + \alpha(\gamma - \theta) \qquad (2)$$

при $0 < \xi < 1$ $\quad \left.\dfrac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \eta}\right|_{\eta=1} = 0$

при $0 \le \eta \le 1$ $\quad \left.\dfrac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \xi}\right|_{\xi=0} = 0; \quad \left.\dfrac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \xi}\right|_{\xi=1} = 0$

при $(\xi,\eta) \in \Gamma_к$ $\quad \dfrac{\partial \gamma(\xi,\eta)}{\partial \eta} = 0$

при $(\xi,\eta) \in Д_к$ $\quad \gamma(\xi,\eta) = U$

Уравнение (2) запишем в более удобном виде:

$$a_{11} \cdot \frac{\partial^2 \gamma}{\partial \xi^2} + a_{22} \cdot \frac{\partial^2 \gamma}{\partial \eta^2} + a_{10} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} + a_1 \cdot \gamma = F(\xi, \eta)$$

где

$$a_{11} = k \cdot \frac{1}{l^2}$$

$$a_{22} = k \cdot \frac{1}{h^2}$$

$$a_{10} = -c\rho\omega \frac{1}{l}$$

$$a_1 = \alpha$$

$$F(\xi, \eta) = \alpha \cdot \theta(\xi, \eta)$$

Таким образом, математическая модель, описывающая процессы, происходящие при сушке в «кипящем слое», представляет собой краевую задачу для уравнений в частных производных. Решение поставленной задачи в общем виде возможно только численным методом с применением компьютера. Преимуществом такого подхода является то, что модель учитывает большинство параметров процесса и отражает физические законы, описывающие происходящие процессы.

В первом приближении была решена упрощенная задача: рассчитать распределение температуры при сушке сыпучей массы, имеющей следующие характеристики:

- удельная теплоемкость $C = 0{,}2$ (ДЖ/(кг град));
- плотность $\rho = 5$ (кг/м^3);
- коэффициент теплопроводности $k = 0{,}05$ (ВТ/м град));
- коэффициент теплоотдачи $\alpha = 0{,}5$ (ВТ/м град))
- температура верхнего слоя $T_S = 20$ (^{0}C) в сушильном аппарате, для которого
  - длина сушильной камеры $l = 1{,}0$ (м);
  - высота сушильной камеры $h = 0{,}5$ (м);
  - скорость поступающего газа $\omega = 0{,}5$ (м/с);
  - количество узлов на газораспределительной решетке – 4(шт).

Данные задачи являются входными для подпрограммы, являющейся частью общего программного комплекса.

Результаты решения приведены на рис.4.

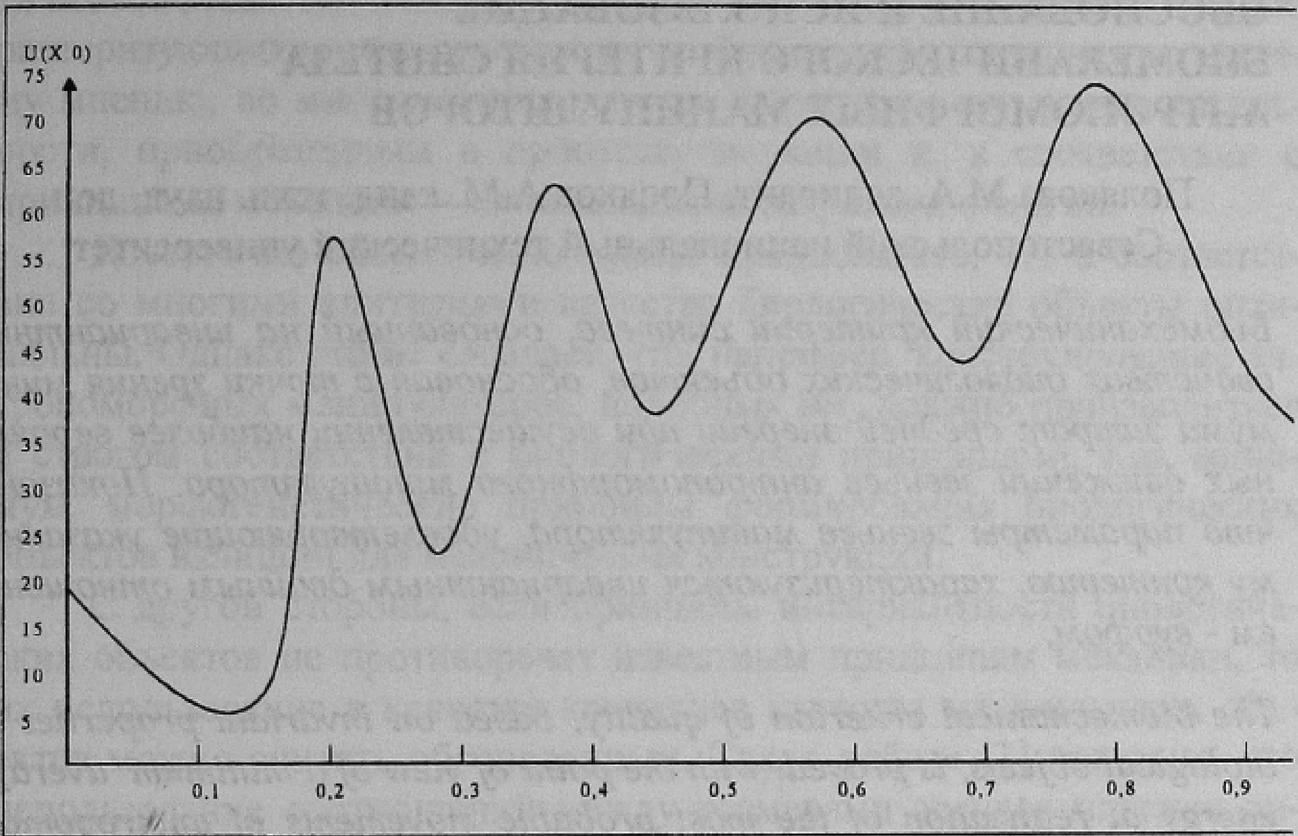

Рисунок 4 - Распределение температуры высушиваемой массы в сушильном аппарате

Выводы и направление дальнейших исследований.

Предлагаемая модель является к настоящему времени наиболее полной математической моделью рассматриваемого процесса.

Ее компьютерная реализация предполагает разработку программного комплекса, позволяющего выполнять всесторонние исследования процесса с целью его дальнейшего совершенствования.

Список использованных источников:

1. Филиппов В.А. Технология сушки и термоаэроклассификации углей. - М., «Недра», 1987, 287с.
2. Лыков А.В. Сушка в химической промышленности.- М., «Химия», 1970, 432с.
3. Джалурия И. Естественная конвекция. – М., Мир, 1983, 399с.
4. Кузнецова Н.С., Грошев Г.Н., Лабутин А.Н. Сушка сыпучих материалов в псевдоожиженном слое с переменным полем температур и скоростей. – Хим.пром., 1979, в.6, с.42.
5. Календерьян В.А,, Корнараки В.В. Температурное поле в сушилке с движущимся плотным слоем при комбинированном подводе тепла. – Хим.пром., 1979, в.6, с.56.