

УДК: 622.785

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ АГЛОМЕРАТА

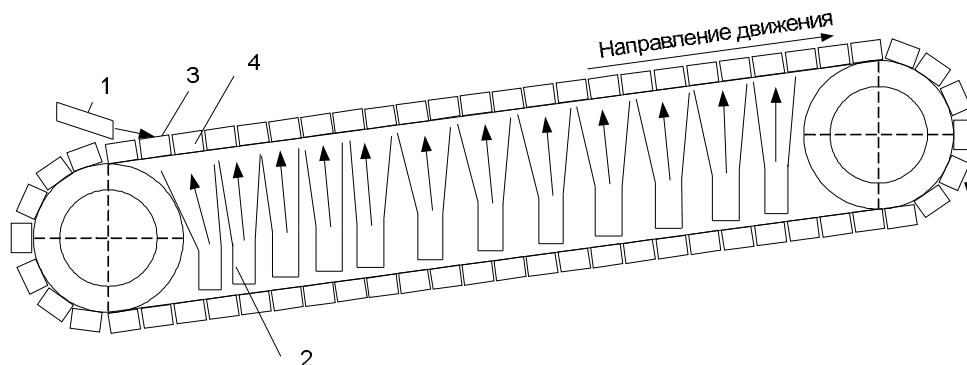
Кабаков З.К., Елисеев А.А., Веселов Ю.В.

**В статье рассматривается математическая модель тепловых и газодинамических процессов при охлаждении агломерата. Выполнено тестирование алгоритма расчета процессов конвективного теплообмена в неподвижном плотном слое. Проведена проверка адекватности модели тепловых и газодинамических процессов при охлаждении агломерата путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Модель планируется использовать при разработке системы управления процессом охлаждения агломерата.**

**Ключевые слова:** агломерат, математическая модель, охлаждение.

Одним из способов охлаждения агломерата является его охлаждение на прямолинейном охладителе. Агломерат после агломерационной машины дробится, отсеивается от мелочи (<5-6 мм) и загружается с помощью устройства 1 (рис. 1) в

короба, расположенные на бесконечном полотне охладителя. Охлаждение агломерата производится путем подачи воздуха с помощью дутьевых камер расположенных под коробами (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема прямолинейного охладителя: 1 – загрузочное устройство; 2 – дутьевые камеры; 3 – короб; 4 – агломерат.

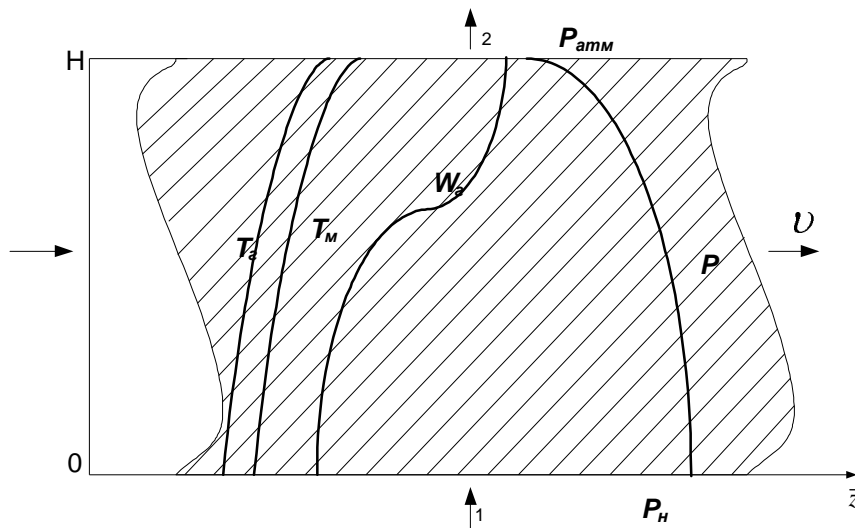
Одной из проблем производства агломерата являются большие потери энергии при охлаждении агломерата на прямолинейном охладителе. Для разработки предложений по сокращению потерь необходимо исследование процесса охлаждения агломерата. Для этого используют метод математического моделирования.

В известной математической модели [1] процесса охлаждения агломерата представлен только теплообмен между мате-

риалом и газом. В ней не учитывается влияние газодинамических процессов на теплообмен в слое.

В данной работе разработана математическая модель охлаждения агломерата, которая включает подмодель конвективного теплообмена и подмодель газодинамики.

На рис. 2 приведена схема расчетной области для моделирования теплообмена в слое.



**Рис. 2.** Схема расчетной области:  $T_m(x, t)$ ,  $T_g(x, t)$ ,  $P(x, t)$ ,  $W_z(x, t)$  – типичные распределения температуры агломерата, газа, давления и вертикальной скорости движения газа по толщине слоя агломерата;  $H$  – высота слоя,  $P_{атм}$  и  $P_к$  – атмосферное давление и давление в камере

**Подмодель теплообмена** в однородном по фракционному составу слое включает:

- уравнение баланса тепла газов:

$$-W_z \cdot \rho_g c_g \frac{\partial t_g}{\partial y} = \alpha_v (t_g - t_m). \quad (1)$$

и граничные условия:  $t_g = t_g^0$  при  $y=0$ ;

- уравнение баланса тепла агломерата:

$$\rho_m (1-m) c_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \alpha_v (t_g - t_m). \quad (2)$$

и начальные условия:  $t_m = t_m^0$  при  $t = 0$ ;

В уравнениях (1) – (2) приняты обозначения:  $t_g$  и  $t_m$  – температуры газа-теплоносителя и материала;  $\tau$  – время, с;  $y$  – координата по глубине слоя, м;  $c_m$  – теплоемкость материала, Дж/(К·кг);  $W_z$  – скорость газа на свободное сечение, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho_m$  – кажущаяся плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – порозность слоя;  $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$ .

Объемный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_v$  определяется по формуле [2]:

$$\alpha_v = 186 \frac{W_z^{0.9} t_g^{0.3}}{d^{0.75}} M',$$

где  $d$  – диаметр куска агломерата, м;  $M' = 1,0$  для идеальных условий,  $M' = 0,5$  при наличии мелочи 20% ( $M'$  зависит в основном от равномерности распределения газов по поперечному сечению слоя).

**Подмодель газодинамики** включает:

- уравнение движения газа в слое дисперсного материала:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = a(w_z) W_z; \quad (3)$$

- уравнение неразрывности газового потока:

$$\frac{\partial}{\partial y}(\rho_z W_z) = 0. \tag{4}$$

где  $a(w_z) = K_1 \mu + K_2 \rho_z W_z$ ,  $K_1$ - вязкостный коэффициент газодинамического сопротивления,  $m^{-2}$ ;  $K_2$  - инерционный коэффициент газодинамического сопротивления,  $m^{-1}$ ;  $P$  – давление, Па;  $y$  – координата

высоты слоя, м;  $W_z$  – скорость газа,  $m^3/(m^2 \cdot c)$ ;  $\mu$  - динамическая вязкость газа,  $кг/(м \cdot c)$ ;  $\rho_z$  – плотность газа,  $кг/м^3$ .

Плотность газа и давление связаны зависимостью:

$$\rho_z = kP, \tag{5}$$

где  $k = \frac{\rho_0 T_0}{T_z P_0}$ ;  $\rho_0$ ,  $P_0$  и  $T_0$  - плотность газа, давление и температура при нормальных условиях.

Из уравнений (3) и (4) получено уравнение для определения давления в каждой точке по высоте слоя дисперсного материала:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho_z}{a(W_z)} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0, \tag{6}$$

при граничных условиях при  $y = 0$ :  $P = P_n$ ; при

$$y = H: P = P_{атм}. \tag{7}$$

где  $P_n = P_k - \Delta P_{кр}$ ;  $P_k$  – давление в камере, Па;  $\Delta P_{кр} = \xi_k \rho_{зк} W_{зк}^2 / 2$  - сопротивление колосниковой решетки, Па,  $\rho_{зк}$  – плотность газа на выходе из слоя при нормальных условиях,  $кг/м^3$ ;  $W_{зк}$  – скорость газа на выходе из слоя при нормальных условиях,

м/с;  $\xi_k$  – коэффициент сопротивления колосниковой решетки.

После расчета давления в каждой точке слоя определяется скорость газа по формуле, полученной из уравнения (3):

$$W_z = \left[ -K_1 \mu + \sqrt{(K_1 \mu)^2 - 4K_2 \rho_z \frac{\partial P}{\partial y}} \right] / (2K_2 \rho_z). \tag{8}$$

Уравнения (1), (2) и (6) решаются для сечения  $\bar{z}$ , которое перемещается со скоростью движения коробов. При этом положение сечения  $\bar{z}$  на прямолинейном охладителе определяется по формуле  $\bar{z} = v t$

Представленное выше математическое описание процессов тепловых и газодинамических процессов при охлаждении агломерата приведено к дискретному виду с помощью численного метода Рунге-Кутты. Разработана компьютерная модель с использованием алгоритмического языка Turbo Pascal 7.0.

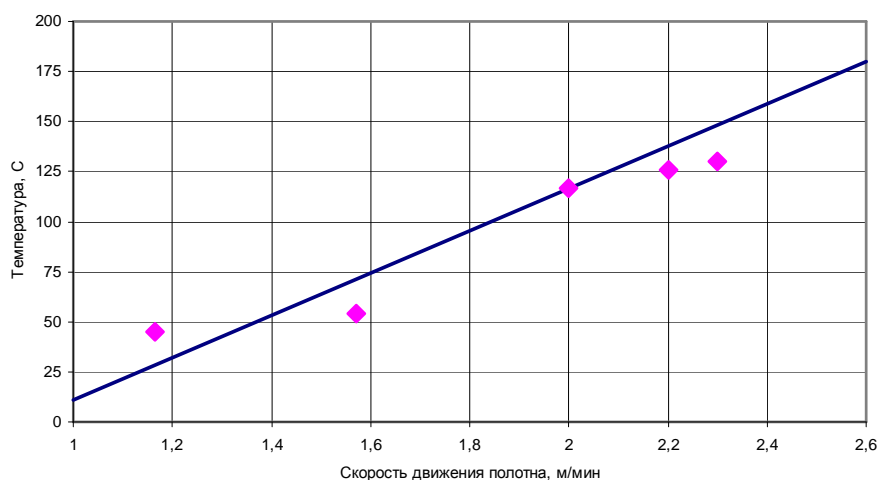
Тестирование алгоритма расчета процессов конвективного теплообмена в неподвижном плотном слое проведено пу-

тем сравнения результатов моделирования с решением задачи Шумана, полученным В.Н. Тимофеевым в интегральной форме. Интегрирование выполнено с помощью математического пакета MathCad. В результате тестирования установлено, что для того, чтобы относительная погрешность определения температуры не превышала 1 %, необходимо выбирать количество узлов в расчетной области не менее 65 для высоты слоя 200 мм.

Проведена проверка адекватности модели тепловых и газодинамических процессов при охлаждении агломерата путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными по темпе-

ратуре на отметке соответствующей 45 м от начала прямолинейного охладителя для различных скоростей движения полотна.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 3, получены при проведении исследований ЧерМК ОАО «Северсталь».



**Рис. 3.** Зависимость температуры отходящего газа на отметке 45 м от скорости движения полотна: \*- экспериментальные данные; - - моделирование.

Как следует из рис. 3, результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, в настоящей работе представлена математическая модель тепловых и газодинамических процессов при охлаждении агломерата. Модель отличается от известных учетом газодинамических процессов, происходящих в слое агломерата. Модель планируется использовать:

- для исследования закономерностей охлаждения агломерата на прямолинейном охладителе;

- при обосновании различных способов совершенствования технологии охлаждения агломерата;

- при разработке системы управления процессом охлаждения агломерата на прямолинейном охладителе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Н.М. Бабушкин, С.Г. Братчиков, Г.Н. Намятов, В.С. Швыдкий, Ф.Р. Шкляр, Ю.Г. Ярошенко // Охлаждение агломерата и окатышей. – М.:Металлургия, 1975 г. 208с.
2. Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин, В.Ф. Ратников, А.С. Телегин, В.Г. Лисиенко, С.Г. Братчиков, М.Д. Казяев, В.П. Маркин, Е.Л. Суханов, В.Д. Сучков // Теплообмен в доменной печи. Изд-во «Металлургия», 1966 г.

### MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL AND GAS-DYNAMIC PROCESSES AT AGGLOMERATE COOLING

Kabakov Z.K., Eliseyev A.A., Veselov Yu.V.

In the article mathematic model of thermal and gasdynamic processes during sinter cooling is viewed. Testing of computation algorithm of processes of heat convection in fixed dense bed has been accomplished. Validity check of the model of thermal and gasdynamic processes during sinter cooling through comparison between simulation results and observation data has been performed. The model will be used in the development of sinter cooling process control system.

Keywords: sinter, mathematical model, cooling.