

## Математическая модель витания частиц в вихревом аппарате

И.Е. СОКОЛОВСКАЯ

Днепродзержинский государственный технический университет

Построена комплексная математическая модель движения частиц в вихревом аппарате с одновременным расчетом их температуры. Показана качественная адекватность модели и представлены результаты тестовых расчетов процесса.

Побудовано комплексну математичну модель руху частинок у вихревому апараті з одночасним розрахунком їх температури. Показано якісну адекватність моделі та представлено результати тестових розрахунків процесу.

A complex mathematical model is built of motion of particles in the vortical vehicle with the simultaneous computation of their temperature. High-quality adequacy is shown of model and results are presented of test computations.

Сушка материалов в вихревом аппарате происходит в период их витания в аппарате в результате взаимодействия с воздушными потоками. Очевидно, чем более длительный данный процесс, тем он эффективнее.

Прямое экспериментальное изучение движения материалов в вихревых аппаратах осложняется нелинейностью и нестационарностью процесса. Однако характеристики траекторий движения частиц в вихревом аппарате могут быть определены путем численного моделирования с учетом имеющихся расчетных полей скоростей газовой фазы, полученных нами в предыдущем исследовании [1].

В процессе сушки диаметр частиц изменяется, что влияет на силу их взаимодействия с газовой фазой. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют об увеличении диаметра рассматриваемых частиц при увеличении температуры (Рис. 1). Таким образом, для определения траекторий вводимых частиц необходимо одновременно рассчитывать их температуру.

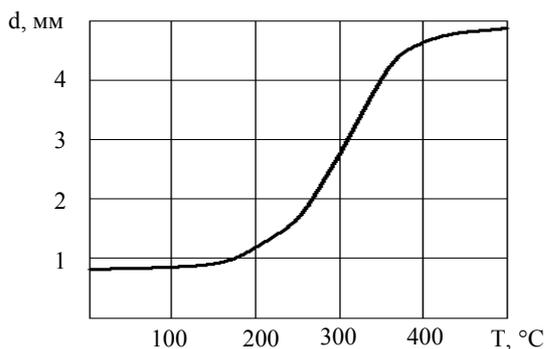


Рис. 1. Зависимость диаметра частицы  $d$  от температуры  $T$

В данной работе построена комплексная математическая модель движения частиц, подлежащих сушке в вихревом аппарате, с одновременным расчетом их температуры.

Расчет траектории движения частиц в разных условиях изучался многими авторами (см., например [2]). В отличие от указанных работ в данной работе

движение рассчитано для трехмерного поля скоростей, полученного в работе [1] для условий сушки в вихревом аппарате.

Предполагается, что частица падает вертикально вниз с начальной скоростью  $v_0$ . При движении в аппарате на частицу действует сила:

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_s, \quad (1)$$

состоящая из архимедовой силы:

$$\vec{F}_a = (m - m^*) \vec{g}, \quad (2)$$

где  $m$  и  $m^*$  - масса частицы и вытесненного им воздуха, и силы сопротивления:

$$\vec{F}_s = -C_r S \frac{\rho_r}{2} |v - v_r| (\vec{v} - \vec{v}_r), \quad (3)$$

где  $C_r$  - коэффициент сопротивления,  $S$  - сечение куска,  $\rho_r$  - его плотность,  $\vec{v}, \vec{v}_r$  - скорость частицы и газа соответственно. Отметим, что в случае, когда плотность частицы намного превышает плотность воздуха  $m \gg m^*$ , архимедова сила сводится к силе тяжести.

Уравнение движение частицы имеет вид:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f}, \quad (4)$$

где  $\vec{f} = \vec{F} / (m + \kappa m^*)$  и  $\kappa$  - коэффициент присоединенной массы.

Процесс нагрева частицы в предположении её сферичности описывается одномерным уравнением диффузионного теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5)$$

где  $T$  - температура,  $a$  - коэффициент температуропроводности частицы,  $r$  - расстояние до её центра (радиальная координата).

На границе частицы имеет место конвективная теплоотдача:

$$q = \alpha (T_p - T_g), \quad (6)$$

определяющая граничные условия для уравнения (5), где  $q$  - плотность теплового потока на границе частицы,  $T_p$  и  $T_g$  - температуры поверхности частицы и окружающей газовой фазы соответственно и  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи. Коэффициент  $\alpha$  зависит от

диаметра частицы  $d$  и его удобно выразить через безразмерный критерий Нуссельта  $Nu$ :

$$\alpha = Nu \lambda_e / d, \quad (7)$$

где  $\lambda_e$  - эффективный коэффициент теплопроводности газа, учитывающий турбулентный характер движения. Его значение выбирается исходя из соотношения [3]:

$$\lambda_g = C \rho_g \nu_e, \quad (8)$$

где  $C$  и  $\rho_g$  - теплоемкость и плотность газа, а  $\nu_e$  - эффективный коэффициент кинематической вязкости, определяемый по трехпараметрической алгебраической модели турбулентности в газодинамической чисти расчета [1].

Движение частицы рассматриваем в цилиндрических координатах  $\rho, \varphi, z$ . При этом уравнение (4) приобретает вид:

$$\frac{dv_\rho}{dt} = \frac{v_\varphi^2}{\rho} + f_\rho, \quad (9)$$

$$\frac{dv_\varphi}{dt} = -\frac{v_\rho v_\varphi}{\rho} + f_\varphi, \quad (10)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = f_z, \quad (11)$$

где индекс у скорости и у удельной силы означает их компоненту в цилиндрических координатах. Для компонент скорости имеем:

$$v_\rho = \frac{d\rho}{dt}, \quad v_\varphi = \rho \frac{d\varphi}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (12)$$

Численно система уравнений (9) – (12) решается методом Кромера-Эйлера:

$$v_\rho^{n+1} = v_\rho^n + \Delta t [(v_\varphi^n)^2 / \rho^n + f_\rho^n], \quad (13)$$

$$v_\varphi^{n+1} = v_\varphi^n + \Delta t [-v_\rho^n v_\varphi^n / \rho^n + f_\varphi^n], \quad (14)$$

$$v_z^{n+1} = v_z^n + \Delta t f_z^n, \quad (15)$$

$$\rho^{n+1} = \rho^n + \Delta t v_\rho^{n+1}, \quad (16)$$

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \Delta t (v_\varphi^{n+1} / \rho^{n+1}), \quad (17)$$

$$z^{n+1} = z^n + \Delta t v_z^{n+1}, \quad (18)$$

где  $n$  - номер временного слоя, а  $\Delta t$  - шаг по времени.

В качестве расчетной области, как и в работе [1], выбрана внутренняя часть цилиндра. При определении силы сопротивления (3) движения куска в газовом потоке, предварительно вычисляется площадь его поперечного сечения  $S = \pi d^2 / 4$  с использованием графической зависимости, заданной на Рис.1.

Для этого рассчитывается температура частицы с использованием явной разностной схемы [3] для уравнения (5):

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t a \left[ (i-1)T_{i+1}^n - 2(i-1,5)T_i^n + (i-2)T_{i-1}^n \right] / (i-1,5) \Delta r^2, \quad (19)$$

где  $\Delta t$  и  $\Delta r$  - шаг по времени и радиусу соответственно,  $n$  - номер временного слоя, а  $i$  - номер пространственной ячейки (температуры вычисляются в центре ячеек). В качестве температуры, определяющей диаметр частицы, выбирается средняя температура по всем ячейкам. Отметим, что шаг по времени  $\Delta t$  при вычис-

лении температуры (в формуле (19)) и при расчете траектории частицы (в формулах (13) – (18)) может не совпадать.

Проведена серия тестовых расчетов модели, свидетельствующих о её качественной адекватности рассматриваемому процессу.

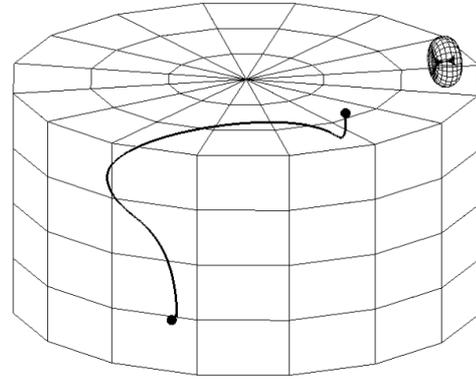


Рис. 2. Винтообразная траектория частицы

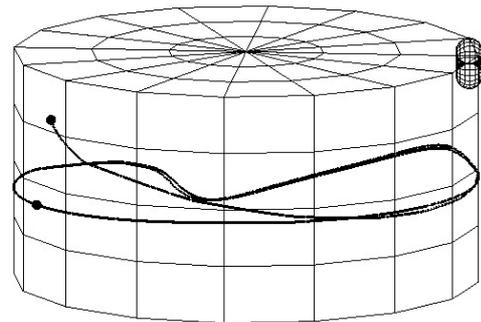


Рис. 3. Часть траектории квазистационарного витания частицы

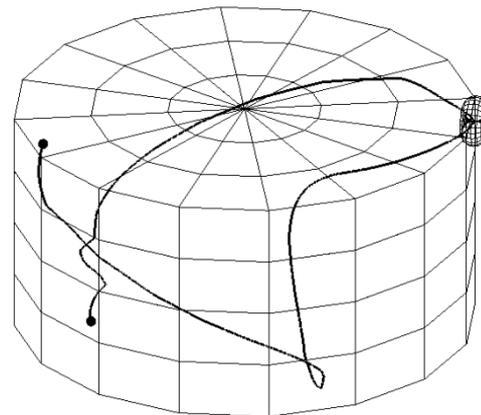


Рис. 4. Сложная нерегулярная траектория частицы

Конкретная траектория частицы существенно зависит от места её попадания в объем вихревого аппарата и определяется, в основном, (помимо силы тяжести)

вихревыми газовыми потоками (см. Рис. 5 в [1]). Так увлекаясь газом, частица может совершать винтовое движение (Рис. 2) до момента её выхода из аппарата. Однако численные эксперименты показывают достаточно нерегулярный характер движения частиц. Так в расчетах наблюдались как траектории с участками стационарного витания (Рис. 3), так и достаточно интересные варианты возможных движений частиц, как, например, вариант, представленный на Рис. 4. Частица под действием силы тяжести и газовых потоков может в целом двигаться вниз, а затем, попадая в восходящие потоки, снова определенное время двигаться в верхнем направлении. В конце концов, она, всё же, покидает объем аппарата.

Изучение большого количества результатов расчетов позволяет, всё же, (не смотря на нерегулярность траекторий частиц) сделать качественный вывод о том, что в целом частицы, которые попадают в вихревой аппарат ближе к боковой стенке, дольше витают в его объеме, а, следовательно, и дольше подвергаются сушке, что предпочтительнее с технологической точки зрения.

#### Выводы

1. Разработана комплексная математическая модель нагрева и трехмерного витания частиц в вихревом аппарате.

2. Тестовые расчеты, проведенные по представленной модели, свидетельствуют о её качественной адекватности и возможности использования данной модели для расчета различных режимов сушки материалов в вихревых аппаратах.
3. Подача частицы в область цилиндрической поверхности вихревого аппарата ближе к его боковой стенке, позволит увеличить продолжительность термообработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколовская И.Е. Математическая модель газодинамики в вихревом аппарате // Математичне моделювання, 2007, № 1(16). – С. 22-27.
2. Гутри Р.И.Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплавов методом вдувания порошков // Инжекционная металлургия '80. – М.: Металлургия, 1982. - С. 75-92.
3. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассоносных процессов сталеплавильного производства. – К.: Наукова думка, 1993. – 220 с.

пост. 05.10.07.

## Математическое моделирование процессов доводки стали порошковыми и алюминиевой проволоками на установке ковш-печь переменного тока

### Сообщение 2. Результаты моделирования

*В.П. ПИПТЮК<sup>1</sup>, В.Ю. БОЛОТОВ<sup>2</sup>, И.А. ПАВЛЮЧЕНКОВ<sup>2</sup>, В.А. ВИХЛЕВЩУК<sup>1</sup>,  
В.Г. КНОХИН<sup>3</sup>, И.Н. ЛОГОЗИНСКИЙ<sup>3</sup>, С.В. ГРЕКОВ<sup>1</sup>*

Институт черной металлургии НАН Украины<sup>1</sup>,  
Днепродзержинский государственный технический университет<sup>2</sup>,  
ОАО «Днепрспецсталь»<sup>3</sup>

Приведены результаты численных исследований процессов доводки по химическому составу стали различных марок порошковыми и алюминиевой проволоками на установке ковш-печь переменного тока.

Наведені результати чисельних досліджень процесів доведення по хімічному складу сталі різних марок порошковими і алюмінієвою дротами на установці ковш-піч змінного струму.

The results of numeral researches of processes of lapping are resulted on chemical composition of steel of different marks powder-like and aluminium wires on plant scoop-stove of alternating current.

С использованием результатов работы [1] и ранее разработанной трехмерной математической модели гидродинамики и тепло-, массообмена ковшевой ванны [2,3] выполнены численные исследования процессов доводки по составу сталей различных марок порошковыми и алюминиевой проволоками при обработке металлургического расплава на установке ковш-печь (УКП) переменного тока

Расчеты произведены для порошковых проволок производства ОАО «Завод «Универсальное оборудование» согласно ТУ У 05100783006-97 диаметром 13 мм

со стальной оболочкой (материал оболочки сталь 08Ю, 08сп по ГОСТ 9045) толщиной 0,3 мм (ГОСТ 19851) и для алюминиевой проволоки диаметром 12 мм. В качестве наполнителей порошковой проволоки взяты силикокальций марки СК-30 (ГОСТ 4762) и науглероживатель (графит) (ГОСТ 5420).

Расчеты произведены с учетом расположения донной продувочной фурмы по варианту 1 [1].

Результаты расчетов продолжительности расплавления проволоки (высвобождения наполнителя для его взаимодействия с расплавом стали), алюминиевой

