

на срезе сопла и скорость истечения растут, и, соответственно, уменьшается время начала истечения струи из генератора. Характерно также, что с увеличением E_c максимальные значения скорости и давления достигаются быстрее. Величины максимальной скорости в генераторах с цилиндрическим соплом примерно в полтора раза ниже, чем в генераторах с коническим соплом во всех вариантах. Например, при $E_c = 100$ кДж u_{\max} равны, соответственно, 760 и 1100 м/с.

Выводы

Проведенное численное исследование внутренней баллистики генератора показало преимущество устройств с конической геометрией по эффективности выстрела – и по скорости и по давлению. Показано существенное влияние геометрии активной зоны и условий осуществления разряда на параметры истечения струи. Выяснен механизм разрушения струи в генераторах с цилиндрическим соплом.

Для получения более детальных сведений о структуре струи необходимо совместное решение задач внутренней и внешней баллистики устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – Киев: Вища школа, 1987. – 156 с.
2. Vijay M. M., Bielawsky M., Paquette N. Generation powerful pulsed water jets with electric discharges: fundamental study. – Proc. 9th American Water Jet Conference. – Dearborn (Michigan), 1997. – Paper 29. – P. 415 – 430.
3. Гулый Г.А., Малюшевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.
4. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления. – Донецк: Вебер, 2007. – 149 с.
5. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Вища школа, 1986. – 208 с.
6. Коул Л. Подводные взрывы. – М.: Иностранная литература, 1950. – 494 с.
7. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
8. Гаврилов Г.Н., Горюченко Г.Н., Малюшевский П.П., Рябинин А.Г. Разрядно-импульсная технология обработки минеральных сред. – Киев: Наукова думка, 1979. – 164 с.

пост. 30.12.09

Моделирование движения частицы в потоке теплоносителя в загрузочном бункере вихревого аппарата

СОКОЛОВСКАЯ И.Е.

Днепродзержинский государственный технический университет

В статье приводятся экспериментальные данные, на основании которых создана математическая модель движения частиц в вихревом слое при термообработке с учетом изменения их размеров. Определены особенности движения частиц в вихревом аппарате, получены зависимости, позволяющие управлять продолжительностью термической обработки, на основании которых можно спроектировать устройство для сушки дисперсных частиц.

В статті наводяться експериментальні дані, на підставі яких створена математична модель руху часток у вихровому шарі при термообробці з урахуванням зміни їх розмірів. Визначені особливості руху часток у вихровому апараті, отримана залежність, що дозволяє управляти тривалістю термічної обробки, на підставі яких можна спроектувати пристрій для сушки дисперсних частинок.

In article experimental data are presented, on the basis of which a mathematical model is created of motion of particles in the vortical layer at the heat treatment taking into account the change of their sizes. Features are definite of motion of particles in the vortical vehicle, dependences are got, allowing to handle by duration of heat treatment, on the basis of which it is possible to project the device for drying of dispersion particles.

Введение. Во многих отраслях техники применяют различные массообменные устройства для сушки гранулированного материала различного назначения [1]. В целом методики проектирования таких аппаратов известны, и если технологический процесс реализуется без каких либо особенностей, то методы расчета себя оправдывают.

Цель работы. В случаях, когда свойства материала в процессе термообработки изменяются, тради-

ционные методы расчета дают существенные погрешности. Тогда возникает необходимость математического моделирования основных технологических процессов.

Материалы и результаты исследований. Так на рис. 1 приведена схема вихревой камеры для термообработки дисперсного материала. В гидродинамике аппарата, и соответственно в процессах обработки, следует выделить два основных этапа: предварительная подсушка частиц в плоской струе теплоносителя и

окончательная термообработка в вихревом слое. Останемся подробнее на первом этапе технологии.

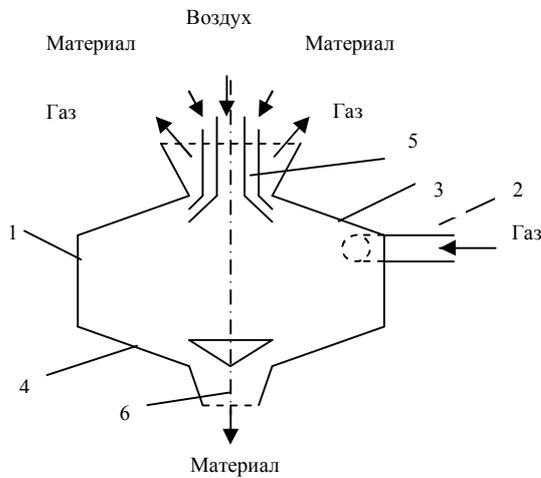


Рис. 1. Схема вихревого аппарата: 1 - корпус; 2 - боковой входной патрубок для подвода газа; 3 - торцевая верхняя стенка; 4 - торцевая нижняя стенка; 5 - загрузочный бункер; 6 - разгрузочный бункер.

В процессе движения материала вдоль стенок патрубка 9 вследствие ускорения настильной струей частицы приобретают некоторую начальную скорость [2]. При этом частицы меньшего веса будут иметь большую скорость, чем тяжелые. Такое распределение начальной скорости частиц материала представляется нам целесообразным для уменьшения выноса их из камеры с уходящими газами.

1. Рассмотрим движение одиночной частицы сферической формы в потоке газа (рис.2). Поступая в поток газа, частица движется в нем под действием силы тяжести, выталкивающей силы (силы Архимеда) и силы сопротивления. Систему координат выбираем так, чтобы ось X была направлена вдоль конуса, а ось Y перпендикулярно к его поверхности. При необходимости можно рассматривать трехмерное движение частиц, если вдоль конуса-распылителя создаем закрученную струю.

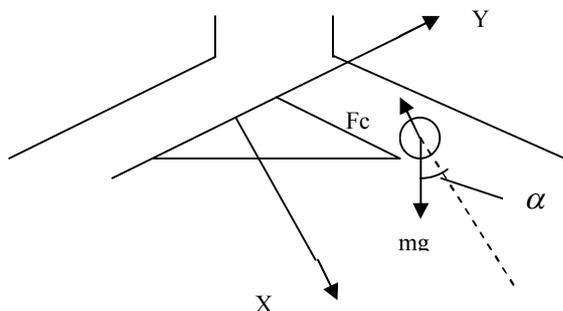


Рис. 2. Расчетная схема

Уравнения равновесия сил, действующих на частицу, в проекциях на оси координат запишутся так:

$$ma_x = c \frac{\rho(u - g_x)^2}{2} S + mg \cos \alpha, \quad (1)$$

$$ma_y = mg \sin \alpha.$$

где S - площадь поперечного сечения частицы, m - масса частицы, u - скорость потока газа, ρ - плотность газа.

Начальные условия для интегрирования уравнений будут:

$$\text{при } t = 0, \quad x = y = 0,$$

$$g_x = g_0 \cos \alpha, \quad g_y = g_0 \sin \alpha. \quad (2)$$

Задавая, таким образом, начальные условия, мы рассматриваем частицу, которая максимальное время находится в настильной струе газа. В общем случае скорость V_0 определяем как среднемассовую

$$g_0 = \frac{4G_M}{\pi(D_T^2 - d_T^2)\rho_M},$$

где G_M - массовый расход материала; ρ_M - насыпная плотность.

Преобразуем исходные уравнения:

$$a_x = \frac{3}{4} C_x \frac{\rho}{a \rho_T} (u - g_x)^2 + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_T}\right) g \cos \alpha, \quad (3)$$

$$a_y = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_T}\right) \sin \alpha.$$

Второе уравнение можно интегрировать. Для интегрирования первого уравнения необходимо знать скорость потока и коэффициент сопротивления частицы при ее обтекании, который, как известно, зависит от ее относительной скорости. В начальный момент после попадания частицы в поток из-за большой относительной скорости имеет место турбулентный или переходной режимы обтекания с $C = \frac{64}{Re} = \frac{64v}{gd}$ коэффициентом сопротивления, изменяющимся в зависимости от числа Рейнольдса, например по формуле Клячко [3].

Для решения уравнения проведем некоторые упрощения:

$$a_x = 18 \frac{\rho}{\rho_T} \frac{v}{a^2} (u - g_x) + \frac{1}{6} \left(\frac{a}{v}\right)^2 (u - g_x)^{\frac{5}{3}}, \quad (4)$$

$$a_y = g \sin \alpha.$$

В общем случае скорость потока изменяется по y и x .

Для сравнительно небольших расстояний можно принять $u = u_{cp} = const$. В случае численного решения можно задать и более точные законы распределения скоростей.

Приведем уравнения к безразмерному виду, выбрав в качестве характерных размеров длину конуса-распылителя l , высоту $2h_H$ и время $t_K = \frac{l}{u}$.

Тогда, выполнив преобразования и опуская черточки над безразмерными величинами, получим

$$a_x = A_1(1 - g_x) + A_2(1 - g_x)^{\frac{5}{3}}, \quad (5)$$

$$a_y = A_3,$$

$$\text{Где } A_1 = \frac{18}{Re} \frac{\rho}{\rho_T} \frac{l}{a}, \quad A_2 = \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}}, \quad A_3 = \frac{gl}{2h_H u} \sin \alpha,$$

$$Re = \frac{ua}{v}.$$

Начальные условия в безразмерном виде запишутся так: при $t=0, x=y=0$;

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g_0}{u} \cos \alpha, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{g_0}{u} \sin \alpha. \quad (6)$$

При турбулентном обтекании частиц коэффициент сопротивления зависит только от их формы и для шара можно принять $C_x \approx 0,44$. Тогда система уравнений (3), преобразованная к безразмерному виду, запишется так:

$$a_x = A_4(1 - g_x)^2 + A_5, \quad a_y = A_3, \quad (7)$$

где

$$A_4 = \frac{3}{4} C_x \frac{\rho}{\rho_T} \frac{l}{a}, \quad A_5 = \frac{g l}{u^2} \cos \alpha.$$

Полученные соотношения позволяют приближенно определить время движения частицы до момента соударения с конусом-распылителем при $y = h_H$ и соответствующее ему расстояние x , которое для исключения износа корпуса не должно быть меньше длины направляющей l .

Для определения координат частицы внутри камеры закручивания проинтегрируем систему (1).

Тогда:

$$x = \frac{C_x}{m} \frac{\rho(u - g_x)^2}{2} S \frac{t^2}{2} + g \cos \frac{t^2}{2}; \quad (8)$$

$$y = g \sin \alpha t^2.$$

2. Для предварительной сушки в плоской струе воздуха с учетом изменяющихся теплофизических и геометрических параметров частицы.

Из уравнения равновесия сил (1), действующих на частицу, в проекциях на оси координат, задавая $m = const$, $\rho_{части} = var$, $S = var$, $c = f(d)$:

$$\rho(\tau) \cdot \frac{4}{3} d^3(\tau) \frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{c(\tau) \rho(\tau) [u(\tau) - g_x]^2}{2} \pi d^2(\tau) + \rho(\tau) \frac{4}{3} d^3(\tau) \cdot g \cos \alpha \quad (9)$$

Тогда вторая производная координаты по времени:

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{3}{8} c(\tau) \pi [u(\tau) - g_x]^2 \frac{1}{d(\tau)} + g \cos \alpha;$$

Сделаем замену:

$$k_1 = \frac{3}{8} c \pi [u(\tau) - g_x]^2, \quad \text{тогда:}$$

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{k_1}{d(\tau)} + g \cos \alpha. \quad (10)$$

Первая производная координаты по времени:

$$\frac{dx}{d\tau} = g_{H.X} + \int_0^\tau k_1 \frac{d\tau}{d(\tau)} + g \cos \alpha \tau.$$

Рассмотрим случай изменения диаметра частицы по степенной зависимости

$$d = f(\tau): d(\tau) = D + k_2 \tau^2; \quad (11)$$

тогда:

$$\frac{dx}{d\tau} = g_{H.X} + \frac{k_1}{k_2} \int_0^\tau \frac{d\tau}{D + k_2 \tau^2} + g \cos \alpha \cdot \tau$$

$$\frac{dx}{d\tau} = g_{H.X} + \frac{k_1}{k_2 \sqrt{D}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\frac{D}{k_2}}} \Big|_0^\tau + g \cos \alpha \cdot \tau.$$

Принимаем $\bar{D} = \frac{D}{k_2}$, тогда:

$$\frac{dx}{d\tau} = g_{H.X} + \frac{k_1}{\sqrt{D k_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} + g \cos \alpha \cdot \tau.$$

Следовательно:

$$x(\tau) = g_{H.X} \cdot \tau + \int_0^\tau \frac{k_1}{\sqrt{D k_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} d\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}. \quad (12)$$

Принимаем $u = \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}}$; $dz = d\tau$;

$$du = \frac{1}{\sqrt{\bar{D}}} \frac{d\tau}{1 + \frac{\tau^2}{\bar{D}}}; \quad z = \tau \quad (13)$$

Тогда:

$$x(\tau) = g_{H.X} \cdot \tau + \frac{k_1 \tau}{\sqrt{D k_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} - \frac{k_1}{\sqrt{D k_2}} \int_0^\tau \frac{\sqrt{\bar{D}} \cdot \tau}{\bar{D} + \tau^2} d\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}$$

$$x(\tau) = g_{H.X} \cdot \tau + \frac{k_1 \cdot \tau}{\sqrt{D k_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} - \frac{k_1 \sqrt{\bar{D}}}{2 \sqrt{D k_2}} \ln |\bar{D} + \tau^2| \Big|_0^\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}$$

$$x(\tau) = g_{H.X} \cdot \tau + \frac{k_1 \cdot \tau}{\sqrt{D k_2}} \operatorname{arctg} \frac{\tau}{\sqrt{\bar{D}}} - \frac{k_1 \sqrt{\bar{D}}}{2 \sqrt{D k_2}} \ln(\bar{D} + \tau^2) + \frac{k_1 \sqrt{\bar{D}}}{2 \sqrt{D k_2}} \ln |\bar{D}| + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2} \quad (14)$$

Начальные условия для интегрирования:

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{d\tau^2} = g \sin \alpha; \\ \frac{dy(0)}{d\tau} = g_{H.Y}; \\ y(0) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = g_{H.Y} + g \sin \alpha \cdot \tau = g;$$

$$y(\tau) = g_{H.Y} \cdot \tau + g \sin \alpha \cdot \frac{\tau^2}{2}. \quad (16)$$

Если $k_1 = k_1(\tau) = \frac{3}{8} c(\tau) \pi [u(\tau) - g_x]^2$; то:

$$x(\tau) = g_{H.X} \cdot \tau + \int_0^\tau \frac{k_1(\tau)}{d(\tau)} d\tau + g \cos \alpha \frac{\tau^2}{2}. \quad (17)$$

По предложенным зависимостям несложно рассчитать траектории движения частиц, скорости и размеры аппарата.

Вывод

Полученные таким образом уравнения отражают указанные выше особенности термообработки частиц в вихревом аппарате с учетом изменяющихся их размеров и могут дополнить существующие методы проектирования таких установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии, «Химия», 1971.
2. Бай Ши-и, Турбулентное течение жидкостей и газов, ИЛ, 1962.
3. Клячко Л.С. «Отопление и вентиляция», 4, 1934.