

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦЫ С ПОТОКОМ ГАЗА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

**Введение.** Во многих отраслях техники применяют различные массообменные устройства для сушки материала различного назначения. В целом методики проектирования таких аппаратов известны, и если технологический процесс реализуется без каких либо особенностей, то методы расчета себя оправдывают. В случаях, когда свойства материала в процессе термообработки изменяются, традиционные методы расчета дают существенные погрешности. Тогда возникает необходимость математического моделирования основных технологических процессов.

**Цель работы.** Разработать математическую модель движения и массообмена частицы в вертикальном канале.

**Материалы и результаты исследований.** Движение частицы в вертикальном газовом потоке является следствием действия на нее массовой силы, динамического напора теплоносителя и гидродинамического сопротивления потоку газа [1-3].

Коэффициент гидродинамического сопротивления зависит от величины скорости обтекания, и его величина обусловлена разностью статических давлений в набегающей области и тыльной части частицы.

Установившаяся скорость движения частицы в таких условиях определяется зависимостью:

$$V_{\text{ч}} = V_{\text{Г}} - V_{\text{В}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{ч}}$  – скорость движения частицы,  $V_{\text{Г}}$  – скорость движения газа,  $V_{\text{В}}$  – скорость витания.

Скорость витания определяется по формуле:

$$V_{\text{В}} = \sqrt{\frac{4 \cdot d_{\text{ч}} \cdot (\rho_{\text{ТВ}} - \rho) \cdot g}{3 \cdot \xi \cdot \rho}}, \text{ где } d_{\text{ч}} - \text{ диаметр частицы.}$$

Известно [2,3], что с ростом отношения  $d_{\text{ч}}/\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S}$  влияние стенок на величину скорости падения в стесненных условиях увеличивается, и его учитывают с помощью коэффициента  $k$ :

$$V_{\text{с}} = k \cdot V_{\text{в}}, \quad (2)$$

При рассмотрении движения некоторого объема частиц в потоке, ограниченном стенками канала, этот объем будем рассматривать как местное сопротивление, на котором возникает некоторый перепад давлений, который обусловит различие плотностей газовой фазы за и перед ним, а также соответствующее изменение местных скоростей газа при его неизменном массовом расходе. Чем тяжелее слой частиц и выше отношение  $r_{\text{ч}}\sqrt{\frac{\pi}{S}}$  ( $r_{\text{ч}}$  – радиус частицы), тем значительнее разница в давлениях, плотностях и линейных скоростях газа.

Для теоретического анализа взаимодействия частицы с восходящим потоком газа, при учете зависимости его плотности от давления, предложена упрощенная расчетная модель системы, в которой газ постоянного давления  $P_{\text{с}}$  и плотностью  $\rho_{\text{с}}$  поступает в аппарат (вертикальный канал).

Движение объема частиц в потоке сплошной среды можно представить следующим образом:

$$M_{\text{ч}} \frac{d^2 z}{d\tau^2} = (P - P_a) \cdot S - Mg, \quad (3)$$

где  $P - P_a$  - разность давлений под и над объемом частиц.

Зависимость (3) представляет собой балансовое уравнение сил, действующих на частицу.

Изменение массы газа под объемом частиц

$$\frac{dM}{d\tau} = D \frac{d(\rho \cdot z)}{d\tau} = G_{\text{вх}} - G_{\text{с}}, \quad (4)$$

где:  $G_{\text{вх}}$  - массовый расход несущего газа на входе в канал;  $G_{\text{с}}$  - массовый расход несущего газа в сечении канала

$$G_{\text{сх}} = D_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho_{\text{с}} P_{\text{с}} \left[ \left( \frac{P}{P_{\text{с}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P}{P_{\text{с}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5)$$

$$G_s = (D - S) \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho P \left[ \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (6)$$

Зависимости (4, 5) отражают изменение массы газа под частицами в рабочем участке за счет изменения значений давления в этом объеме, а также величины объема под частицами при их перемещении.

На основании вышеизложенного сформулирована математическая модель движения частиц в вертикальном канале, которая решена методом Рунге-Кутты на языке Turbo Pascal 6.0.

$$\left\{ \begin{array}{l} M \left[ \frac{d^2 z}{d\tau^2} + g \right] = (P - P_a) S \\ G_{Bx} - G_s = S \left[ z \frac{d\rho}{d\tau} + \rho \frac{dz}{d\tau} \right] \\ G_s = (D - S) \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho P \left[ \left( \frac{Pa}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{Pa}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \\ G_{Bx} \Big|_{P < P_c} = D_o \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho_c P_c \left[ \left( \frac{P}{P_c} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P}{P_c} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \\ G_{Bx} \Big|_{P \geq P_c} = D_o \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho P \left[ \left( \frac{P_c}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_c}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \\ P = P_a \left( \frac{P}{P_a} \right)^{\frac{1}{k}} \end{array} \right. \quad (7)$$

Из уравнения (4) при  $\frac{dM}{d\tau} = 0$ , получим

$$\frac{G_{Bx}}{(D - S) \rho} - \frac{G_s}{(D - S) \rho} = \frac{dz}{d\tau} \cdot \frac{D}{(D - S)}, \quad (8)$$

тогда

$$V_r - V = V_u \frac{D}{D - S} \quad (9)$$

Запишем систему уравнений (7) в безразмерном виде. Для этого представим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{z} = \frac{z}{z_0} \\ \bar{\tau} = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{2z_0}{g}}} \\ \bar{P} = \frac{P}{P_a} \\ \frac{P_c}{P_a} = a \\ \frac{D_0}{D} = b \\ \frac{S}{D} = \beta \end{array} \right. \quad (10)$$

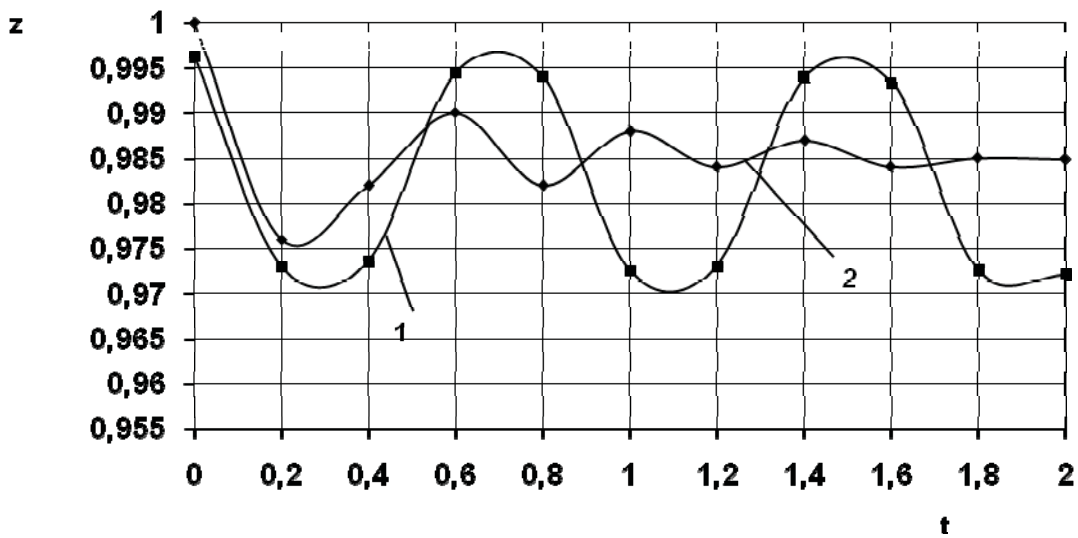
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \bar{z}}{d\bar{\tau}^2} = 2\beta L \left( \bar{P} - 1 \right) - 2 \\ \bar{z} \frac{d\bar{P}}{d\bar{\tau}} + k \bar{P} \frac{d\bar{z}}{d\bar{\tau}} = 2 \sqrt{\frac{k^3}{k-1}} M \bar{P}^{\frac{k-1}{k}} \cdot [bA + (\beta - 1)B] \\ \rho = P_a \left( \bar{P} \right)^{\frac{1}{k}} \\ L = \frac{P_a D}{Mg} \\ M = \frac{P_a}{z_0 g \rho_a} \end{array} \right. \quad (11)$$

система уравнений (11) решена методом Рунге-Кутты на языке Turbo Pascal 6.0

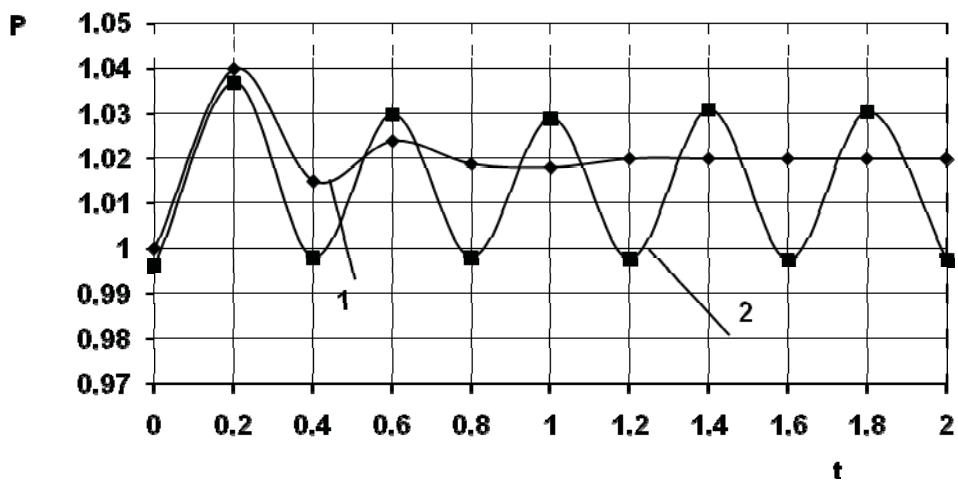
На рисунке 1 представлены расчетные зависимости  $P=f(\tau)$ ,  $z=f(\tau)$ . Характерным для этих величин является наличие колебательного процесса, который может быть неустойчивым, или затухающим, и устойчивым в зависимости от внешних гидродинамических условий. Аналогичный характер имеют функции  $G_{\text{вх}}=f(\tau)$ ,  $G_a=f(\tau)$  и  $\Delta G=f(\tau)$ .

В зависимости от выбранных соотношений размеров частиц (их объема) и их массы, плотности, порозности объема частиц (соотношения  $\frac{D_0}{D}$ ), размеров частиц и сечения канала можно реализовать один из трех гидродинамических режимов движения

частиц: пневмотранспорта, витания или падения. Этот режим характеризуется соотношением давлений на набегающей и тыльной частях частиц.



а)



б)

Рисунок 1 - Координаты частицы (а) и давление газа под объемом частиц (б): 1 – при циклическом изменении давления и устойчивом режиме псевдооживления частиц; 2 – затухающий неустойчивый режим

Если отношение давлений на набегающей и тыльной частях частиц больше либо меньше единицы, сырьевые частицы будут перемещаться с потоком или оседать. На практике очень важно найти эффективные управляющие факторы, с помощью которых этими режимами можно управлять. Как установлено нами ранее интенсивность массообменных процессов с поверхности сырьевой

частицы зависит не только от режимов омывания частиц газом и его температуры, но и от времени пребывания частицы в рабочих условиях и частоты колебаний.

**Выводы.** Таким образом, на основании анализа результатов численного расчета установлено, что изменение массы частицы и ее размеров приводит к соответственному изменению амплитуды колебаний. В технологии пиролиза биогаза из растительных отходов, апробированной в лабораторных условиях, наблюдалось изменение массы и размеров частиц. Поэтому в данной работе эта особенность учтена при разработке методики управления массообменными процессами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Боднер В.А. Автоколебания в системе с компрессором и методы их устранения//Изв. АН СССР, 1957, №8, С. 3-12.
2. Бутенин Н.В. Теория колебаний. – М.: Высшая школа, 1963, 187 с.
3. Казакевич В.В. Автоколебания в компрессорах. – М.: 1974, 264 с.
4. Малкин Г.И. Теория устойчивости движения. – М.:Атомиздат, 1971, 276 с.
5. Фомичев В.М. Термоакустические колебания в ламинарном потоке// Теплофизика высоких температур, 1977, с. 103-108.

Получено 23.01.2009г.