

Шаптала В.Г., д-р техн. наук, проф.,  
 Шаптала В.В., канд. техн. наук, доц.,  
 Гавриленко А.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЦЕМЕНТНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПНЕВМОКАМЕРНОМ НАСОСЕ

Shaptalavladim@yandex.ru

Выполнено численное моделирование процесса разгрузки камеры пневмокамерного насоса, на основе которого исследована зависимость расходной концентрации цемента от конструктивно-режимных параметров насоса.

**Ключевые слова:** пневмокамерный насос, математическая модель, аэрационное устройство.

**Введение.** На цементных заводах для внутри- и межцеховых перемещений цемента расширяется применение высоконапорных установок с пневмокамерными насосами [1]. Несмотря на ряд преимуществ, транспортирование цемента пневмокамерными насосами остается достаточно ресурсо- и энергоемким (удельный расход сжатого воздуха нередко превышает  $150 \text{ м}^3/\text{т}$ , а удельные затраты превышают  $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ ). Одним из главных направлений снижения энергозатрат остается совершенствование процесса аэрирования цемента, позволяющее получать на входе в разгрузочный патрубок более концентрированные цементно-воздушные смеси при сокращении непроизводительных затрат сжатого воздуха.

Опытным путем показана высокая эффективность пневмокамерного насоса, оснащенного новым мультисопловым аэрационным устройством (рис. 1) [2]. Для сокращения объема лабораторных и промышленных испытаний целесообразно выполнить компьютерное моделирование работы насоса позволяющее выявить влияние конструктивно-режимных параметров аэрационного устройства на его производительность.

**Основная часть.** Турбулентный газодисперсный поток цементно-воздушной смеси, которая образуется аэрационным устройством в нижней части камеры насоса и нагнетается сжатым воздухом в цементопровод, будем исследовать на основе двухжидкостной модели. В рамках этой модели дисперсная фаза рассматривается как псевдосплошная среда – псевдогаз из частиц со своим специфическим давлением, вязкостью и температурой (кинетическая теория гранулированных (газодисперсных потоков) [3]. Кинетическая теория позволяет применять к дисперсной фазе непрерывный эйлеров подход, поэтому для описания движения обеих фаз можно использовать однопипные уравнения неразрывности и уравнения переноса импульса.

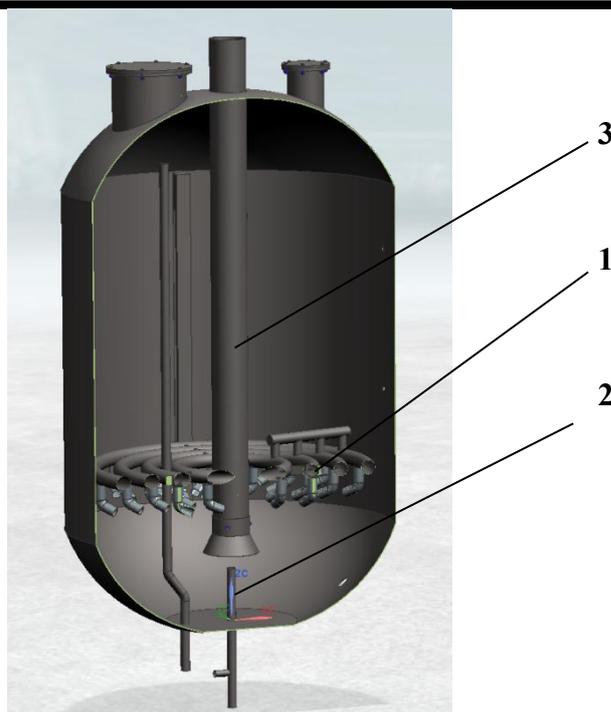


Рис. 1. Пневмокамерный насос с мультисопловым аэрирующим устройством:

1 – мультисопловое аэрационное устройство;  
 2 – центральное сопло; 3 – разгрузочный патрубок

Уравнения неразрывности для воздушной и дисперсных фаз имеют вид [3]:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon \rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\beta \rho_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta \rho_m v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  и  $\beta$  – объемные концентрации воздуха и частиц в потоке цементной аэросмеси;  $\rho$ ,  $\rho_m$  – плотности воздуха и частиц;  $u_i$ ,  $v_j$  – составляющие осредненной скорости воздушной и дисперсной фаз.

Уравнения переноса импульса газовой и дисперсной фаз могут быть представлены в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi u_i) = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} + \varphi g_i + F_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta \rho_m v_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi_m v_i) = -\beta \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p_m}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} T_{ij} + \beta \rho_m g_i - F_i \quad (4)$$

Здесь  $\tau_{ij}$ ,  $T_{ij}$  – тензоры эффективных напряжений газовой и дисперсных фаз,  $p$  – давление воздуха,  $g_i$  – вектор ускорения силы тяжести,  $F_i$  – интенсивность силы межфазного взаимодействия,  $p_m$  – давление псевдогаза частиц. Для турбулентных характеристик газодисперсных потоков в кинетической теории применяется  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

При аэрации цемента вследствие его большой удельной поверхности температуры воздуха и частиц практически мгновенно выравниваются, поэтому процесс разгрузки насоса можно считать изотермическим и при его моделировании уравнение сохранения энергии не рассматривать.

Система уравнений (1..4) применительно к условиям работы пневмокамерного насоса ГА-29 реализована в пакете OpenFOAM [4, 5].

В результате компьютерного моделирования разгрузки камеры насоса для различных

стадий этого процесса (рис. 2) найдены распределения скорости несущего потока воздуха, поля концентраций частиц цемента, а также вычислены массовые расходы фаз на входе в разгрузочный патрубок. При проведении вычислительного эксперимента варьировалось избыточное давление в камере насоса, диаметр разгрузочного патрубка, расстояние входа в разгрузочный патрубок и аэрационного устройства до дна камеры насоса, а также распределение сжатого воздуха между верхней свободной зоной камеры и аэрирующим устройством. Компьютерное моделирование процесса разгрузки насоса подтверждает наблюдаемые в лабораторных и производственных условиях его характерные особенности: пульсирующий характер потока цементно-воздушной смеси, прорыв при определенных условиях струй воздуха без захвата материала, образование остатка материала в камере насоса и другие.

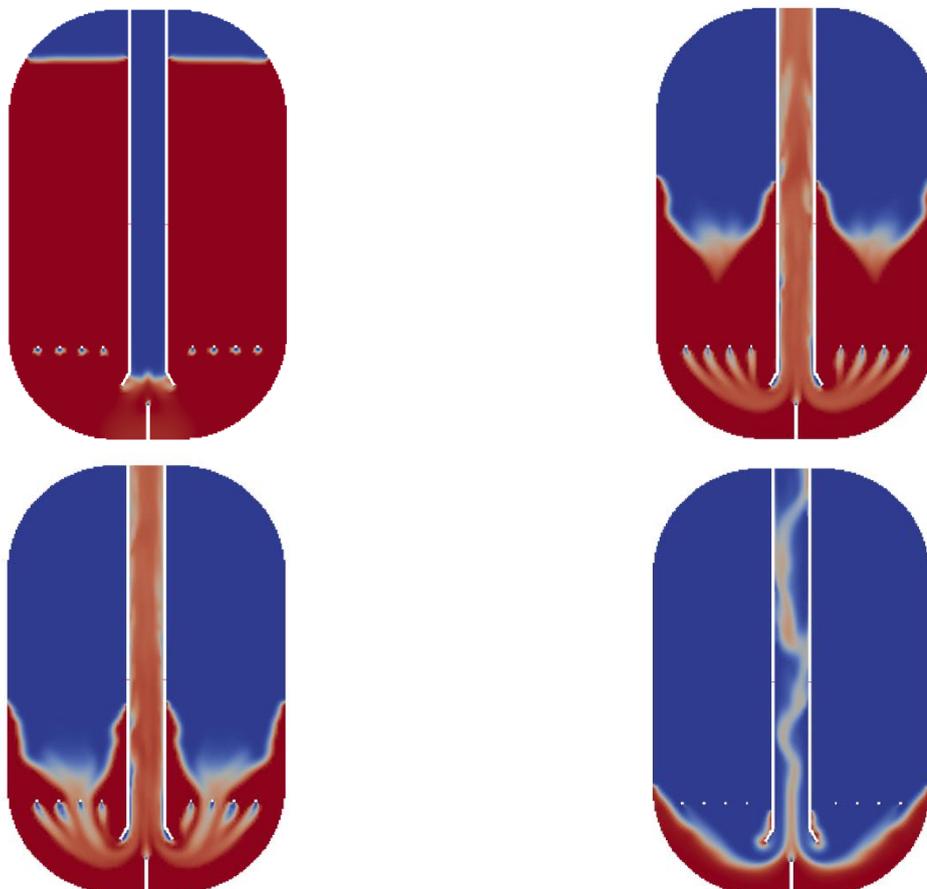


Рис. 2. Стадии разгрузки камеры насоса

Обработка результатов вычислительных экспериментов позволила установить аппроксимирующую зависимость расходной концентра-

ции цемента от конструктивно-режимных параметров насоса:

$$\mu = \frac{G_m}{G} = \frac{130,8}{\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{2,6} \left(\frac{D}{D_k}\right)^{0,8}}, \quad (5)$$

где  $G_m$  – производительность насоса кг/с;  $G$  – массовый расход сжатого воздуха, кг/с;  $D$ ,  $D_k$  – диаметры разгрузочного патрубка и камеры насоса, м;  $\rho$ ,  $\rho_0$  – плотности воздуха при рабочих и нормальных условиях:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{PT_0}{P_0T} \quad (6)$$

Здесь  $P$ ,  $T$  – рабочие давление и температура воздуха;  $P_0 = 101$  кПа,  $T_0 = 293$  К.

По известным расходной концентрации цемента и рабочем давлении в камере насоса можно найти удельные энергозатраты на перекачку цемента:

$$\mathcal{E} = \frac{0,18k_s k_n T}{\eta \mu} \lg\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad \text{кВт} \cdot \text{ч/т} \quad (7)$$

где  $k_s$  – коэффициент запаса,  $k_n = 1,15$  – коэффициент, учитывающий непроизводительные потери сжатого воздуха,  $\eta \approx 0,75$  – коэффициент полезного действия компрессоров.

Рабочее давление изменялось в интервале от 0,3 до 0,6 Мпа, общий расход сжатого воздуха – от 0,5 до 1,2 м<sup>3</sup>/с, рабочая температура от 120 до 140 °С. Наибольшая концентрация цемента на входе в разгрузочный патрубок  $\mu = 18$  кг/кг имела место при общем расходе сжатого воздуха 1 м<sup>3</sup>/с и следующем его распределении: в верхнюю зону камеры 40 %, через аэрационное устройство – 45 % и центральное сопло – 15 % общего расхода. Скорость воздуха на входе в загрузочный патрубок принимала значения от 4 до 4,5 м/с. Установлено также, что наименьший остаток невыгруженного цемента достигается при выполнении следующих условий:

$$h_{PI} = 0,9D, \quad h_{ay} = 2D, \quad (8)$$

где  $h_{PI}$ ,  $h_{ay}$  – расстояния от днища камеры до входа в разгрузочный патрубок и до уровня сопел аэрационного устройства.

## Выводы

1. Численная реализация кинетической модели движения газодисперсных потоков в камере пневмокамерного насоса позволяет исследовать влияние конструктивно-режимных параметров насоса на его производительность и энергоэффективность.

2. С помощью компьютерного моделирования найдены рациональные параметры пневмокамерного насоса с новым мультисопловым устройством для аэрации цемента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Гавриленко А.В., Лунев А.С. Расчет основных параметров, характеризующих разгрузку пневмокамерного насоса. // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2014. Вып. XIII. С. 51–53.

2. Патент № 141694 Российская Федерация, МПК В65G 53/16. Пневмокамерный насос для транспортировки сыпучих материалов / Гавриленко А.В., Богданов В.С., Фадин Ю.М., Шаптала В.В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – № 2014102405; заявл. 24.01.14; опубл. 06.05.14.

3. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidisation. – Boston: Academic Press. 1994. – 467 p.

4. OpenCFD. OpenFOAM – The Open Source CDF Toolbox – User Guide. Open CFD Ltd, United Kingdom, 1.6. edition, 2009.

5. Шаптала В.Г., Шаптала В.В., Сулов Д.Ю. Вопросы моделирования и расчета барботажных реакторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 189–192.