

Богданов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
 Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.,  
 Шаптала В.В., канд. техн. наук, доц.,  
 Гавриленко А.В., ассистент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ ЦЕМЕНТНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЦЕМЕНТА\*

GawrilenkoAW18@yandex.ru

В статье представлены выражения для расчета объемного расхода воздуха при пневмотранспортировании, расходной концентрации материала, а также выведена формула критической скорости воздуха в цементопроводе, при которой частицы не выпадают на дно трубопровода. Во всех стадиях процесса пневматического транспортирования цемент находится в газодисперсном состоянии, т.е. в виде смеси частиц и воздуха. Свойства таких смесей определяются не только свойствами самих частиц и находящегося между ними воздуха, но и соотношением их содержания.

**Ключевые слова:** пневмокамерный насос, пневмотранспортирование, псевдооживление, скорость истечения воздуха, двухфазная среда.

**Введение.** Соотношение обеих составляющих частей цементной аэросмеси характеризуется несколькими количественными показателями, важнейшим из которых является пористость или газосодержание. В установках для перекачки цемента пневмокамерными насосами реализуется наиболее экономичный режим пневмотранспортирования потоками с высокими концентрациями материала и низкими скоростями. Установлено, что расходная концентрация уменьшается с увеличением дальности транспортирования [1, 2, 5].

### Основная часть.

В таких потоках объемная концентрация материала может достигать значений, близких к насыпному состоянию

$$\beta_{\max} = (0,9 \dots 0,95)\beta_0 = (0,54 \dots 0,57). \quad (1)$$

Такие высокие концентрации материала возникают на входе в цементопровод. Дальше по мере ускорения движения материала его концентрация снижается до уровня  $\beta = (0,15 - 0,25)$ . Массовые расходы воздуха и цемента в цементопроводе определяются соотношениями

$$G = F(1 - \beta)\rho u \text{ кг/с}; \quad (2)$$

$$G_M = F\beta\rho_M v \text{ кг/с}; \quad (3)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;  $\rho, \rho_M$  – плотности воздуха и цемента, кг/м<sup>3</sup>;  $u, v$  – их скорости, усредненные по площади поперечного сечения трубы, м/с.

Загрузка цементопровода материалом характеризуется его действительной или

мгновенной массовой концентрацией, равной отношению массы материала к массе воздуха в каком-либо выделенном отрезке трубопровода

$$\mu_0 = \frac{F\Delta L\beta\rho_M}{F\Delta L(1-\beta)\rho} = \frac{\beta\rho_M}{(1-\beta)\rho}, \text{ кг/кг}. \quad (4)$$

Величина  $\mu_0$  является локальной характеристикой потока цементной аэросмеси, которая меняется вдоль цементопровода. Пневмотранспортную установку в целом характеризует расходная концентрация материала, равная отношению массовых расходов цемента и воздуха

$$\mu = \frac{G_M}{G} = \frac{\beta\rho_M}{(1-\beta)\rho} \frac{v}{u} = \mu_0 \frac{v}{u}, \text{ кг/кг}. \quad (5)$$

При  $\mu \geq 10$  кг/кг концентрация цемента считается высокой, а при  $\mu \geq 60$  кг/кг в цементопроводе устанавливается плотный слой материала.

Основные параметры потока цементной аэросмеси, скорости фаз, концентрация частиц и другие показатели непрерывно меняются как во времени, так и вдоль цементопровода, поэтому при описании процесса пневмотранспортирования часто используются скорости фаз, приведенные к поперечному сечению камеры насоса или трубопровода

$$\frac{G}{\rho F} = \frac{Q}{F}, \quad /; \quad (6)$$

$$\frac{G_M}{\rho_M F} = \frac{Q_M}{F}, \quad /; \quad (7)$$

где  $Q, Q_M$  – объемные расходы воздуха и материала.

Приведенные скорости воздуха  $u$  и материала  $v$  фиктивны.

Реальные среднерасходные скорости, определяемые из формул (2, 3), всегда больше фиктивных, поскольку находящийся в аэросмеси материал приводит к уменьшению живого сечения цементопровода.

Показателями эффективности пневмотранспортного процесса является удельная нагрузка на поперечное сечение цементопровода

$$q_{\text{нз}} = \frac{G_M}{F}, \quad (8)$$

а также удельный расход сжатого воздуха на транспортирование

$$Q_{\text{нз}} = \frac{Q_{\text{нз}}}{G_M}, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{нз}}$  – объемный расход воздуха, приведенный к нормальным условиям, м<sup>3</sup>/с.

Характерной особенностью двухфазных потоков является опережающее движение несущего воздушного потока относительно частиц материала. Отношение скорости транспортирующего воздушного потока к скорости цементных частиц, т.е. коэффициент скольжения можно оценить с помощью следующей эмпирической зависимости

$$i = \frac{u}{v} = 4,9 \frac{\rho}{\rho_M} \mu^{0,111} \quad (10)$$

Верхним пределом скорости воздуха в цементопроводе следует считать критическую скорость, при которой частицы не выпадают на дно трубопровода. Ее величину можно оценить с помощью эмпирического соотношения

$$U_{\text{кр}} = 5,6 D^{0,34} d_M^{0,36} \frac{\rho}{\rho_M} \mu^{0,25}, \quad (11)$$

При использовании пневмокамерных насосов надёжно транспортирующая скорость воздушного потока, исключающая завалы цементопровода, как правило, ниже критической, но ее величина подбирается опытным путем.

Протекание процессов пневмотранспортирования цемента в

значительной мере зависит от свойств самого транспортирующего агента – сжатого воздуха.

Параметры сжатого воздуха, связаны между собой уравнением состояния идеального газа [3, 4]

$$PV = mRT, \quad (12)$$

где  $P$  – давление воздуха, Па;  $V$  – объем, занимаемый воздухом, м<sup>3</sup>;  $m$  – масса воздуха, кг;  $T$  – абсолютная температура воздуха, К ( $T=273+t$  °С);  $R$  – удельная газовая постоянная воздуха,  $R=287,3$  Дж/кг·К.

Из уравнения (2.37) следует зависимость плотности воздуха от давления и температуры

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT}. \quad (13)$$

При нормальных условиях ( $P_0 = 1$  атм = 101325 Па,  $t = 20$  °С,  $T = 293$  К) плотность воздуха  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>, а в емкости пневмокамерного насоса ( $P = 0,6$  МПа,  $t = 140$  °С) достигает  $\rho = 5,12$  кг/м<sup>3</sup>.

Вязкость воздуха с увеличением температуры возрастает. Зависимость

коэффициента динамической вязкости  $\mu_B$  от температуры имеет вид

$$\mu_B = 1,712 \cdot 10^{-5} + 4,934 \cdot 10^{-8} T \quad (14)$$

Коэффициент кинематической вязкости воздуха зависит не только от температуры, но и от давления

$$\nu = \frac{\mu_B}{\rho} = \frac{287,3(273+t)}{P} \mu_B. \quad (15)$$

При нормальных условиях  $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а в камере насоса снижается до  $7,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Приведение объемного расхода воздуха к нормальным условиям можно выполнить по формуле

$$Q_{\text{нз}} = c \frac{0,0029 P_P Q_P}{273+t_P}, \quad (16)$$

где  $P_P, t_P, Q_P$  – давление, температура и объемный расход воздуха в рабочих условиях.

Давление  $P_P$  включает в себя и атмосферное давление

$$P_P = P_0 + \Delta P, \quad (17)$$

где  $\Delta P$  – избыточное давление, Па.

Скорость истечения воздушной струи через ограниченный слой дисперсной среды составляет от 10 до 50 % скорости звука в воздухе, которая определяется соотношением

$$C = \sqrt{k \frac{P}{\rho}}, \quad (18)$$

где  $k = 1,405$ ,  $P$ ,  $\rho$  – показатель адиабаты, давление и плотность воздушной фазы соответственно. Для струй, истекающих в цемент из сопел аэрационного устройства пневмокамерного насоса, скорость истечения может принимать значения от 80 до 130 м/с. При таких скоростях в толще цемента вблизи сопел возникают факелы (каверны), заполненные газозвесью с газосодержанием  $\mathcal{E} = 0,9-0,98$ . Длину факелов струй можно оценить с помощью эмпирического соотношения [2]

$$l_{\phi} = 1,2 \sqrt[0,375]{Q}, \quad (19)$$

где  $Q$  – объемный расход струи, м<sup>3</sup>/с.

По мере затухания струй их скорость снижается, ее можно определить

$$U_{\text{мф}} = \frac{3,24U_0d_0}{0,18l + 0,11d_0} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_M}}, \quad (20)$$

где  $U_0$  – скорость истечения струи, м/с;  $d_0$  – диаметр сопла, м;  $l$  – расстояние, м.

**Выводы.** Цементно-воздушная смесь, образуемая аэрационным устройством в нижней зоне камеры насоса, нагнетается сжатым воздухом в разгрузочный патрубок в виде пульсирующего газодисперсного потока, в котором сгустки (пробки) сильно концентрированной смеси перемещаются воздушными пузырями, в которых материал

находится в виде газозвеси. При переходе на горизонтальные участки цементопровода цемент выпадает на дно и перемещается в виде волн или гребней. Сильно выраженная неоднородность потоков цементной аэросмеси, создаваемых пневмокамерными насосами, исключает возможность применения для их расчета методов, разработанных для расчета пневмотранспорта во взвешенном (аэрозольном) состоянии.

*\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08042 «р\_офи\_м» с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. Л.: Химия, 1984. 104 с.
2. Урбан Я. Пневматический транспорт. Под ред. Л.М. Шведова. М.: Машиностроение, 1967. 253 с.
3. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975. 223 с.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
5. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Шаптала В.В., Гавриленко А.В. Расчет параметров псевдооживленного слоя в пневмокамерном насосе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 65–67.

---

**Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Shaptala V.V., Gavrilenko A.V.**

**FLOW CHARACTERISTICS OF A CEMENT-AIR MIXTURE IN THE PNEUMATIC TRANSPORT OF CEMENT**

*The paper presents expressions for the calculation of the volumetric flow rate of air during conveying, the concentration of the consumable material, as well as the formula critical speed of the air in cementoplasty at which particles do not fall to the bottom of the pipeline. In all stages of the process of pneumatic transportation of cement is a gas-dispersed state, i.e. in the form of a mixture of particles and air. The properties of these mixtures are determined not only by properties of particles and air between them, but also the ratio of their contents.*

**Key words:** *pneumatic chamber pump, pneumatic transportation, fluidization, the speed of air movement, two-phase environment.*

---

**Богданов Василий Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: [v.bogdanov1947@gmail.com](mailto:v.bogdanov1947@gmail.com)

**Фадин Юрий Михайлович**, кандидат технических наук, профессор кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: [fadin.y@mail.ru](mailto:fadin.y@mail.ru)

**Шаптала Вадим Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гавриленко Андрей Владимирович**, ассистент кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: [GawrilenkoAW18@yandex.ru](mailto:GawrilenkoAW18@yandex.ru)