

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТА ВЫСОКОНАПОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ С ПНЕВМОКАМЕРНЫМИ НАСОСАМИ

v.bogdanov1947@gmail.com

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

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

Аннотация. В статье рассмотрены основные характеристики и показатели пневмокамерных насосов, такие как удельный расход сжатого воздуха, концентрация и скорость истечения цементной смеси, пористость загрузки. Приведены формулы для их расчета. Решая уравнения по нахождению этих параметров выведены выражения, с помощью которых можно реализовать два варианта расчета: по заданным параметрам диаметра корпуса насоса, производительности, дальности подачи и высоты подъема рассчитывается диаметр цементопровода, или же задавшись параметрами диаметра корпуса насоса, диаметра цементопровода, дальности подачи и высоты подъема найти рабочую производительность насоса.

Ключевые слова: пневмокамерный насос, псевдооживление, двухфазная среда, расход воздуха, пористость, потери давления.

Высоконапорные пневмотранспортные установки с камерными питателями (насосами) все шире применяются для внутри- и межцеховых перемещений цемента [1]. Однако, несмотря на ряд убедительных преимуществ, многие действующие пневмокамерные установки отличаются повышенным удельным расходом сжатого воздуха (до 200 $\text{нм}^3/\text{т}$), значительными удельными энергозатратами (10 $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$) и высокими скоростями воздушного потока (до 60 $\text{м}/\text{с}$ в конце цементопровода). В значительной мере это объясняется тем, что из-за несовершенства применяемых методов расчета установки проектируются с большим излишним запасом расхода сжатого воздуха [2].

В настоящее время строгой, научно обоснованной методики расчета систем пневмотранспорта не существует, поскольку теория турбулентных газодисперсных потоков находится лишь в стадии

развития [7]. Вместе с этим на основе многолетнего опыта эксплуатации пневмотранспортных установок и лабораторных исследований накоплен большой эмпирический материал, который вместе с результатами теоретических исследований позволил разработать ряд отраслевых расчетных методик [2-5]. Однако, вопросы пневмотранспорта тонкодисперсных слипающихся материалов, к которым относится цемент, разработаны недостаточно. В частности, не учитывается влияние на процесс пневмотранспортирования особенностей псевдооживления цемента и движения образующейся при этом цементно-воздушной смеси в камере насоса, а также температура, которую приобретает транспортирующий агент – воздух в результате аэрации свежемолотого цемента.

Сам расчет пневмотранспортных установок, как правило, ведется итерационным методом: начальные значения основных параметров насоса задаются произвольно, по ним определяется гидравлическое сопротивление материалопровода, которое сравнивается с ранее принятым значением давления в камере насоса.

При значительной невязке выбирается новое значение давления воздуха в камере насоса, и расчет повторяется. Несмотря на большую трудоемкость, эта процедура не обеспечивает необходимой точности, поскольку для параметров, изменяющихся по длине материалопровода, принимаются их средние значения. В связи с этим возникает необходимость в разработке более полных и точных методов расчета процессов пневмотранспортирования цемента с помощью камерных насосов, позволяющих повысить надежность установок и снизить их энергопотребление.

Основной характеристикой пневмокамерного насоса является его техническая производительность, которая определяется из выражения

$$G_T = \frac{m_3}{\tau}, m / ч, \quad (1)$$

где m_3 – масса загрузки цемента, кг (т); τ – продолжительность рабочего цикла насоса, который включает в себя 4 фазы: загрузку камеры, предварительный набор давления, фазу статической (равномерной) разгрузки с массовым расходом материала G_M и выпуск сжатого воздуха.

Имеет место отношение

$$G_M = bG_T, m / ч, \quad (2)$$

где $b \approx 2$ – коэффициент запаса производительности.

Важной характеристикой пневмокамерного насоса является также расходная (массовая) концентрация цемента в транспортируемой аэросмеси

$$\mu = \frac{G_M}{G_H}, \text{ кг} / \text{ кг}, \quad (3)$$

поскольку от нее зависит удельный расход сжатого воздуха

$$Q_y = \frac{1000}{\rho_0 \mu}, \text{ м}^3 / \text{ т}, \quad (4)$$

а также удельные энергозатраты на перекачку цемента.

Из формулы следует, что энергозатраты на транспортирование цемента снижаются с увеличением μ и давления воздуха в камере насоса, однако, эти величины не могут быть заданы произвольно, поскольку зависят от характеристик пневмотранспортной установки в целом.

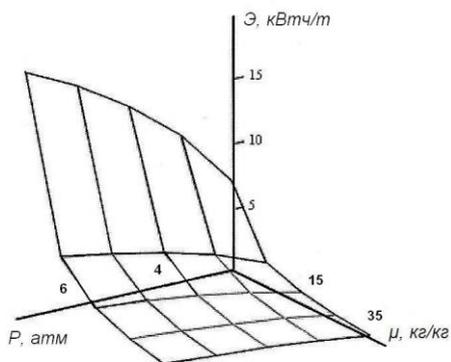


Рисунок 1 – Зависимость удельных энергозатрат на пневмотранспортирование цемента от рабочего давления в камере насоса и расходной концентрации цемента

Неотъемлемой составной частью высоконапорной установки для пневмотранспортирования цемента является цементопровод, гидравлическое сопротивление которого определяет давление сжатого воздуха в камере насоса в период ее стабильной разгрузки. Сопротивление цементопровода зависит от ее приведенной длины, диаметра, скорости движения цементно-воздушной смеси и

концентрации материала. Приведенная длина цементопровода зависит его аксонометрической схемы и вычисляется по формуле

$$L_{np} = \Sigma L_{\Gamma} + \Sigma L_{\ominus}, \text{ м}, \quad (5)$$

где L_{Γ} – геометрические длины прямых горизонтальных, вертикальных и наклонных участков, м; L_{\ominus} – эквивалентные длины прямых участков для местных сопротивлений (отводов, колен, переключателей).

К вертикальным (горизонтальным) участкам относят также участки с отклонениями их оси от вертикали (горизонтали) не менее чем на 15° .

Гидравлическое сопротивление цементопровода ΔP включает в себя потери давления на трение воздуха и материала ΔP_T , на подъем цементной аэросмеси ΔP_H и на ее разгон (динамические потери) ΔP_D [2, 4]

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_H + \Delta P_D, \text{ Па}, \quad (6)$$

где

$$\Delta P_T = \lambda \frac{L_{ПП}}{D} \frac{\rho U_{CP}^2}{2} + \lambda_M \frac{L_{ПП}}{D} \frac{\beta \rho_M v_{CP}}{2}, \text{ Па}, \quad (7)$$

$$\Delta P_H = \beta \rho_M (1 - \varepsilon) gH, \text{ Па}, \quad (8)$$

$$\Delta P_D = \frac{G_M v_{CP}}{F}, \text{ Па}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения воздуха

$$\lambda = 0,0052 + \frac{0,5}{\text{Re}^{0,32}}, \quad (10)$$

Re – число Рейнольдса для трубопровода

$$\text{Re} = \frac{U_{CP} D}{\nu}, \quad (11)$$

$\lambda = 0,0074$ – коэффициент гидравлического трения воздуха; D – диаметр цементопровода, м; U_{CP}, v_{CP} – средние скорости движения воздуха и материала, которые связаны между собой соотношением

$$v_{CP} = \frac{U_{CP}}{i}, \quad (12)$$

где $i = 1,18$ – коэффициент скольжения фаз для цемента.

Потери давления на трение на горизонтальных участках цементопровода при $\mu < 15$ кг/кг можно оценить также по формуле

$$\Delta P_T = \lambda \frac{L_{TP}}{D} \frac{\rho U_{CP}^2}{2} (1 + k\mu), \text{ Па}, \quad (13)$$

где k – коэффициент Гастерштадта, который для цемента принимает значения 0,2–0,3.

Применение формул (7, 8) и (13) затрудняется тем, что они содержат средние скорости движения фаз, которые сами зависят от искомого распределения давления вдоль трассы цементопровода. В связи с этим средние значения скоростей движения фаз могут определяться по-разному. Чаще всего среднюю скорость воздуха определяют как среднее арифметическое ее начального и конечного значений [4]

$$U_{CP}^2 = \frac{U_H + U_K}{2}, \text{ м/с}, \quad (14)$$

где U_H – начальная скорость аэросмеси (скольжением фаз на входе в разгрузочный патрубок можно пренебречь), м/с; U_K – конечная, то есть на выходе из цементопровода, скорость воздуха, м/с.

Рекомендуемые значения начальной скорости 3–4,5 м/с [3]. Истечение цементной смеси из цементопровода происходит при нормальных условиях, поэтому

$$U_K = \frac{Q_{HV}}{F}, \text{ м/с}, \quad (15)$$

где Q_{HV} – объемный расход транспортирующего воздуха, приведенный к нормальным условиям

$$Q_{HV} = \left(V_{KM} + \frac{V_u}{\beta_0} (1 - \beta_0) \right) \frac{P}{P_0 \tau_P}, \quad (16)$$

где V_{KM} – объем камеры насоса, м³; $V_u = m_s / \rho_M$ – объем зерен цемента, находящихся в загрузке, м³; $\beta_0 = 1 - \varepsilon_0$ – относительное объемное содержание цемента в загрузке; P, P_0 – давление в камере во время ее стабильной разгрузки и нормальное давление, Па; τ_P – продолжительность разгрузки камеры насоса, приближенное значение которой можно найти по формуле

$$\tau_P = \frac{\tau}{2} = \frac{m}{2G_T}, \text{ ч}, \quad (17)$$

где τ – продолжительность рабочего цикла насоса, ч; G_T – его техническая производительность.

Вместе со скоростью аэроаэроми в доль цементопровода меняется также содержание в ней материала, которое характеризуется параметром ε или $\beta = 1 - \varepsilon$. Для высоконапорных установок с пневмокамерными питателями, транспортирующими цемент потоками с высокими концентрациями, среднее относительное объемное содержание материала в аэроаэроми β_{CP} близко к его значению в насыпном состоянии β_0 , поэтому следуя работе [4] для предварительных оценок будем считать

$$\beta_{CP} = 0,95\beta_0. \quad (18)$$

Для более точного моделирования работы установок с пневмокамерными насосами необходимо учитывать зависимость гидравлического сопротивления от содержания материала в цементной аэроаэроми. Выражение, определяющее потерю давления на вертикальных участках цементопровода с учетом изменения ε имеет вид

$$\Delta P_H = \rho_{AC} (1 - \varepsilon) g \Delta H + \frac{\lambda_H}{(1 - \varepsilon)^{1,75}} \cdot \frac{\Delta H}{D} \cdot \frac{\rho_{AC} v^2}{2}, \text{ Па}, \quad (19)$$

где $\rho_{AC} = (1 - \varepsilon) \rho_M$ – плотность аэроаэроми, кг/м³; λ – коэффициент трения

$$\lambda_H = \frac{0,316}{\left(\frac{\rho_{AC} v D}{\mu_{AC}} \right)^{0,25}}, \quad (20)$$

где μ_{AC} – коэффициент вязкости аэроаэроми

$$\mu_{AC} = \mu_D \frac{3 - 2\varepsilon_0}{\varepsilon_0}, \quad (21)$$

где μ_D – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Потеря давления на участке горизонтального трубопровода ΔL с учетом изменения \mathcal{E} определяется соотношением [3]

$$P(L + \Delta L) = P(L) \exp(-k \mu v(L) \Delta L), \quad (22)$$

где $k = 22,4 \cdot 10^{-6}, c / m^2$.

Расходная концентрация цемента μ и давление воздуха в камере насоса главным образом зависят от конструктивно-режимных параметров насоса, от характеристик цементопровода и физико-математических свойств цемента. Установлено, что расходная концентрация уменьшается с увеличением дальности транспортирования L и может быть предварительно оценена с помощью соотношения [6, 8]

$$\mu = 55,5 / \exp(0,00157L). \quad (23)$$

Путем обработки результатов компьютерного моделирования процесса загрузки насоса с учетом опытных и паспортных данных по пневмокамерным насосам для перекачки цемента получено соотношение, связывающее расходную концентрацию с конструктивно-режимными параметрами насоса

$$\mu = \frac{130,8}{\left(\frac{pT_0}{Tp_0}\right)^{2,6} \cdot \left(\frac{D}{D_k}\right)^{0,8}}, \quad (24)$$

где T_0, p_0 – температура и давление воздуха в камере насоса при нормальных условиях; D, D_k – внутренние диаметры цементопровода и камеры насоса, м.

Следует подчеркнуть, что расходная концентрация является отношением массовых расходов материала и транспортирующего воздуха на входе в материалопровод, поэтому ее можно рассматривать как отношение массы загрузки насоса m_3 к массе воздуха m_6 , потребного для ее перемещения в силос [4]

$$\mu = \frac{G_M t_3}{G t_3} = \frac{m_3}{m_6}, \text{ кг} / \text{кг}. \quad (25)$$

Для транспортирования цемента он предварительно с помощью аэрационного устройства переводится в псевдооживленное состояние (аэросмесь) с объемной концентрацией

$$\mu = \frac{V_M(1-\beta_{AC})}{\beta_{AC}} = \frac{m_3(1-\beta_{AC})}{\rho_M\beta_{AC}}, \text{ м}^3 / \text{м}^3. \quad (26)$$

Масса этого воздуха с учетом зависимости его плотности от давления и температуры определяется соотношением

$$\mu_B = \rho(P) \frac{m_3(1-\beta_{AC})}{\rho_M\beta_{AC}}, \quad (27)$$

где $\rho(P)$ – плотность воздуха в камере насоса

$$\rho(P) = \frac{\rho_0 T_0 P}{p_0 T}. \quad (28)$$

Подставив соотношение (27) в формулу (28), найдем выражение связывающее усредненную объемную концентрацию цемента, а также газосодержание аэросмеси с расходной концентрацией

$$\beta_{AC} = (1 - \varepsilon_{AC}) = \frac{\mu\rho(P)}{\rho_M + \mu\rho(P)}. \quad (29)$$

Создаваемые пневмокамерными насосами двухфазные потоки имеют пульсирующий характер и отличаются сильно выраженной неоднородностью как в поперечном сечении трубопроводов, так и по их длине. По вертикальным участкам цементопровода перемещаются потоки сгустков (пробок) псевдожидкости, разделенных воздушными пузырями. Газосодержание сгустков псевдожидкости или локальная пористость ε принимает значения $\varepsilon = 0,26 - 0,48$, что в несколько раз меньше усредненной пористости цементной аэросмеси, определяемой соотношением (29).

Локальная пористость восходящего потока цементной аэросмеси определяется соотношением [3]

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{v_{BX}}{U_{BX}} \varepsilon_0}{C \left(1 + \frac{v_{BX}}{U_{BX}} (1 - \varepsilon_0) \right)}, \quad (30)$$

где ε_0 – пористость цемента в насыпном неподвижном состоянии; v_{BX} , U_{BX} – скорость дисперсной фазы и воздуха на входе в разгрузочный патрубок насоса, м/с; C – эмпирическая постоянная

$$C = 8,2 \left(\frac{\rho_0 P}{\rho_{II} P_0} \right)^{0,125} D^{0,3}, \quad (31)$$

где ρ_{II} – плотность сгустков всевозможности, которая в рамках модели неоднородного двухфазного потока [3] считается близкой к насыпной плотности материала

$$\rho_{II} = \rho_M (1 - \varepsilon_0). \quad (32)$$

Из определения расходной концентрации как отношения массовых расходов фаз на входе в разгрузочный патрубок

$$\mu = \frac{v_{BX} F \rho_{II}}{U_{BX} F \rho(P)} = \frac{v_{BX} \rho_{II}}{U_{BX} \rho(P)} \quad (33)$$

следует выражение для v_{BX} / U_{BX}

$$\frac{v_{BX}}{U_{BX}} = \mu \frac{\rho_0 P}{\rho_M (1 - \varepsilon_0) P_0}. \quad (34)$$

С учетом формул (28) – (34) получается следующая зависимость локальной пористости псевдожидкости в восходящем потоке цементно-воздушной смеси от давления

$$\varepsilon(P) = \frac{\rho_M \left(\rho_M \beta_0 - 1, 2 \mu \varepsilon_0 P \right)}{8,2 (\rho_M \beta_0)^{0,875} \left(\rho_M + 1, 2 \mu P \right) D^{0,3} \left(1, 2 P \right)^{0,125}}, \quad (35)$$

где $p = p / p_0$ – приведенное давление воздуха в цементопроводе, численно равно давлению, выраженному в атмосферах.

Величина $\varepsilon(P)$ входит в выражение для потери давления неоднородного цементно-воздушного потока в вертикальной трубе (19), в котором удерживается лишь главная гидростатическая составляющая

$$\Delta P_B = \rho_M (1 - \varepsilon_0) (1 - \varepsilon(P)) g H. \quad (36)$$

Потеря давления неоднородного цементно-воздушного потока на горизонтальных участках цементопровода определяется соотношением (2.105), которое приводится к виду

$$\Delta P_G = P_M \left(1 - \exp \left(-22,4 \cdot 10^{-6} \mu U_{HT} L \right) \right), \quad (37)$$

где P_{HG} , U_{HG} – давление и скорость воздуха в начале горизонтального участка.

Одним из основных параметров установки для пневмотранспортирования цемента является внутренний диаметр цементопровода D . Его величина связана с расходной концентрацией μ соотношением

$$\mu = \frac{G_M}{G_{BX}} = \frac{4G_M}{\pi \rho_0 D^2 U_{BX} P}, \quad (38)$$

из которого следует

$$\mu P = \frac{A}{D^2 U_{BX}}. \quad (39)$$

Здесь

$$A = \frac{4G_M}{\pi \rho_0}. \quad (40)$$

В конце вертикального участка цементопровода давление воздуха равно $P - \Delta P_B$. Тогда для среднего по его высоте давления получим выражение

$$P_{CP} = \frac{P + P - \Delta P_B}{2} = P - \frac{\Delta P_B}{2}. \quad (41)$$

Подставив следующее преобразование

$$\frac{1}{\left(P - \frac{\Delta P_B}{2}\right)^{0,125}} \approx \frac{1}{(P)^{0,125}} \left(1 + \frac{\Delta P_B}{16P}\right) \quad (42)$$

и формулу (39) в соотношение (35), получим из (36) уточненное выражение для потери давления на вертикальных участках цементопровода

$$\Delta P_B = \frac{16B P \left(1 - \varepsilon \left(P\right)\right)}{16P + B \varepsilon \left(P\right)}, \quad (43)$$

где

$$B = \frac{\rho_M(1 - \varepsilon_0)gH}{P_0}, \quad (44)$$

$$\varepsilon(P) = \frac{0,119\rho_M^{0,125}(\rho_M\beta_0 D^2 U_{BX} - 1, 2\varepsilon_0 A)}{\beta_0^{0,875}(\rho_M D^2 U_{BX} + 1, 2A) D^{0,3} P^{0,125}}. \quad (45)$$

Начало горизонтального участка цементопровода совпадает с концом вертикального участка, а на конце горизонтального участка давление равно атмосферному давлению P_0 .

Скорость воздуха в цементопровode с падением давления возрастает и в начале горизонтального участка принимает значение

$$U_{HG} = U_{KB} = U_{BX} \frac{P}{P - \Delta P_B}. \quad (46)$$

С учетом этих замечаний уравнение (2.120) принимает вид

$$\left(P - \Delta P_B \right) \exp \left(-\mu \frac{C P}{P - \Delta P_B} \right) = 1, \quad (47)$$

где

$$C = 22,4 \cdot 10^{-6} U_{BX} L \quad (48)$$

Система уравнений (24), (43) и (47) представляет собой математическую модель процесса пневмотранспортирования цемента камерными насосами. Приведем ее к виду более удобному для численного решения.

Из уравнений (24) и (39) выразим приведенное давление в камере насоса через его конструктивные и режимные параметры

$$P = \Phi D^{0,75}, \quad (49)$$

где

$$\Phi = \frac{20,3 T^{1,625} D_K^{0,5} U_{BX}^{0,625}}{G_M^{0,625}}. \quad (50)$$

Здесь $T = T / T_0$ – приведенная абсолютная температура воздуха в камере насоса, $T_0 = 273\text{К}$. Температура свежемолотого цемента, поступающего в камеру насоса, находится в пределах от 130 до 140°C. При аэрации цемента вследствие его большой удельной поверхности и большой массы загрузки воздух прогревается до температуры 120 °С.

Подставив в формулы (36), (45), (47) и (49) значения $\rho_M = 3100 \text{ кг/м}^3$; $\beta_0 = 0,6$; $U_{BK} = 4,5 \text{ м/с}$; $T = 408 \text{ К}$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $\varepsilon = 0,4$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ после простых преобразований получим следующую систему уравнений

$$\varepsilon = \frac{0,29(8370D^2 - 0,51G_M)G_M^{0,08}}{D_K^{0,06}(13950D^2 + 1,27G_M)D^{0,4}}, \quad (51)$$

$$P - \Delta P_B = \frac{88,8D_K^{0,5}D^{0,75}}{G_M^{0,625}} - \frac{255,7D_K^{0,5}HD^{0,75}(1 - \varepsilon)}{1421D_K^{0,5}D^{0,75} + 0,18G_M^{0,625}H\varepsilon}, \quad (52)$$

$$\left(P - \Delta P_B \right) \exp \left(\frac{-23,78 \cdot 10^{-6} G_M L}{D^2 (P - \Delta P)} \right) = 1. \quad (53)$$

Уравнения (51-53) связывают диаметр цементопровода D с диаметром камеры насоса D_K , его рабочей производительностью в период стабильной разгрузки G_K , а также параметрами трассы цементопровода: приведенной длиной L и высотой подъема H . Решая систему уравнений (51-53) с помощью одного из пакетов прикладных программ (например, Mathcad) можно реализовать два варианта расчета: по заданным параметрам D_K , G_M , L , H найти диаметр цементопровода D , или же задавшись параметрами D_K , D , L , H найти рабочую производительность насоса G_K . На основе уравнений (51-53) можно решать и оптимизационные задачи по минимизации энергозатрат на пневмотранспортирование цемента.

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.

Список литературы:

1. Василевский М.В., Романдин В.И., Зыков Е.Г. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2013. 288 с.
2. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М.: Химия. 1972. 238 с.
3. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. Л.: Химия. 1984. 100 с.
4. Малис А.Я. Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях. М.: Машиностроение, 1969. 177 с.
5. Артыков Н.А. Пневмотранспорт легкоповреждаемых материалов. Ташкент: Фан. 1984. 152 с.
6. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Шапала В.В., Гавриленко А.В. Расчет параметров псевдооживленного слоя в пневмокамерном насосе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 65-67.
7. Бухмиров В.В., Родионов Г.А. Математическое моделирование двухфазных потоков в установках пневмотранспорта мелкодисперсных материалов // Вест. Иван. Гос. ун-та. 2013. Вып. 5. С. 24-28.
8. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. М.: Машиностроение. 1977. 224 с.