

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., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ В ПНЕВМОКАМЕРНОМ НАСОСЕ\*

GawrilenkoAW18@yandex.ru

Основным условием процесса транспортирования сыпучих материалов с помощью пневмокамерных насосов является наличие однородного псевдоожигенного слоя, то есть двухфазной среды, состоящей из транспортируемого материала и рабочего агента – сжатого воздуха. Это необходимо для успешного вовлечения транспортируемого материала в разгрузочную трубу пневмокамерного насоса и для придания скорости пылевоздушной среды в транспортируемом тракте. При расчете пневмотранспорта следует большое внимание уделять силам, действующим на псевдоожигенный материал, а также на скорости, которые необходимо придавать материалу в определенные моменты процесса псевдоожигения. В статье приведены уравнения для расчета минимальной и максимальной скоростей псевдоожигения, а также рассмотрены силы, действующие на материал в пневмокамерном насосе.

**Ключевые слова:** пневмокамерный насос, псевдоожигение, псевдоожигенный слой, скорость движения, скорость витания, двухфазная среда.

**Введение.** Псевдоожигение – это переходное состояние между неподвижным слоем материала и уносом материала потоком газа. Псевдоожигение наступает в определенном диапазоне скоростей протекания газа через слой, а именно от некоторой минимальной скорости до скорости витания частиц материала, при которой возникает их унос.

В неподвижном слое тонкодисперсного материала, например, цемента, свободный объем и свободное сечение (просвет) между частицами малы. Поэтому и скорость течения воздуха между частицами значительно больше средней скорости, отнесенной ко всему сечению слоя. Если средняя скорость повышается, то скорость течения газа между частицами возрастает настолько, что под действием потока газа (и прежде всего сил, вызываемых вязкостью газа) частицы срываются и всплывают в потоке газа. Частицы стремятся покинуть слой, однако при их движении увеличивается свободный объем в слое и свободное сечение для протекания газа [1, 8]. Это приводит к снижению скорости восходящего потока и стабилизации толщины слоя.

**Основная часть.** Считается, что слои мелкозернистого (сыпучего) материала являются псевдоожигенными лишь постольку, поскольку имеется четко определенная верхняя граница или поверхность слоя. Однако, когда при достаточно высокой скорости потока газа повышается скорость движения частиц, верхняя граница слоя исчезает, унос становится заметным и частицы выносятся из слоя с потоком ожимающего агента. В этом случае мы имеем псевдоожигенный слой в разбавленной фазе с пневмотранспортом частиц [2, 7].

Рассмотрим нижнюю часть пневмокамерного насоса, где находится основной элемент псевдоожигения – аэрационное устройство (рисунки 1). Под действием воздуха, выходящего из сопел аэрационного устройства, создается псевдоожигенный слой. Псевдоожигенный слой материала отличается, прежде всего, тем, что при увеличении его объема частицы отделяются друг от друга под действием протекающего газа (сжатого воздуха), вследствие чего внутреннее трение в слое снижается настолько, что материал приобретает свойства жидкости.

Рассмотрим слой материала, который находится в пневмокамерном насосе выше псевдоожигенного слоя. Этот слой подвержен действию сил тяжести, напорных сил и силы реакции работы аэрационного устройства.

Если через слой материала не проходит какой-либо газ, то на этот слой действует сила тяжести и сила реакции [1]. Для определения величины реакции служит выражение

$$R_n = Q_m \cdot \quad (1)$$

При фильтрации сжатого воздуха через слой материала он должен преодолевать сопротивление, вызываемое трением о поверхность частиц материала в тонких поровых каналах между ними (рассматриваем нижнюю часть неподвижного слоя материала, лежащую выше псевдоожигенного слоя). На слой материала действует перепад давления, а также и напорная сила  $P$ . Величина реакции слоя определяется из следующего равновесия

$$R_n = Q_m - P = Q_m - F(p_1 - p_2)g, \quad (2)$$

где  $F$  - площадь сечения камеры, м<sup>2</sup>;  $p_1$  - давление ниже псевдооживленного слоя, Па;  $p_2$  - давление над уровнем слоя, Па.

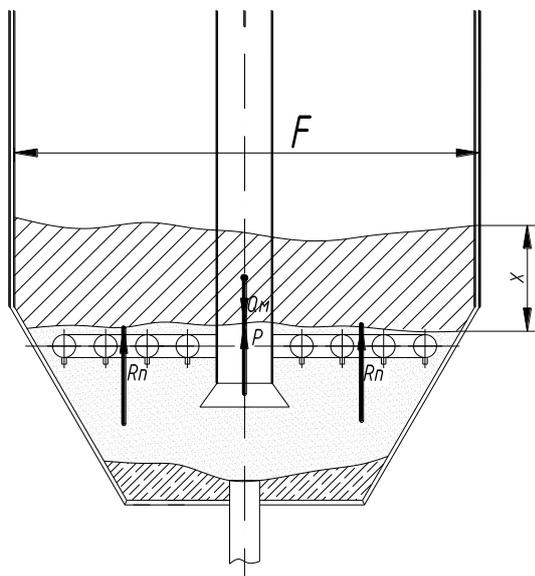


Рис. 1. Силы, действующие на спокойный слой материала:  $R_n$  – сила реакции работы аэрационного устройства,  $Q_m$  – сила тяжести материала,  $P$  – напорная сила,  $x$  – высота слоя материала,  $F$  – площадь сечения камеры насоса

Если через слой материала не проходит какой-либо газ, то на этот слой действует сила тяжести и сила реакции [1]. Для определения величины реакции служит выражение

$$R_n = Q_m. \quad (1)$$

При фильтрации сжатого воздуха через слой материала он должен преодолевать сопротивление, вызываемое трением о поверхность частиц материала в тонких поровых каналах между ними (рассматриваем нижнюю часть неподвижного слоя материала, лежащую выше псевдооживленного слоя). На слой материала действует перепад давления, а также и напорная сила  $P$ . Величина реакции слоя определяется из следующего равновесия

$$R_n = Q_m - P = Q_m - F(p_1 - p_2)g, \quad (2)$$

где  $F$  - площадь сечения камеры, м<sup>2</sup>;  $p_1$  - давление ниже псевдооживленного слоя, Па;  $p_2$  - давление над уровнем слоя, Па.

Вес слоя складывается из веса частиц материала и веса газа, содержащегося между частицами. В единице объема слоя свободный объем, занимаемый газом, равен  $\varepsilon$ . Тогда объем, занимаемый частицами, равен  $1 - \varepsilon$  ( $\varepsilon$  - пористость или газосодержание, безразмерная вели-

чина, указываемая обычно в процентах) [5]. Вес частиц материала равен

$$Q_m = (1 - \varepsilon) \cdot F \gamma_m x g, H, \quad (3)$$

а вес газа (сжатого воздуха) в слое

$$Q_g = \varepsilon F \gamma_g x g, H, \quad (4)$$

где  $\gamma_m$  и  $\gamma_g$  - объемная масса материала и воздуха соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $x$  - высота слоя материала, м.

Общий вес слоя определяется по формуле

$$Q = Q_m + Q_g = [(1 - \varepsilon) \cdot \gamma_m + \varepsilon \cdot \gamma_g] \cdot F x g, H. \quad (5)$$

Перепад давлений, вызванный трением газа при прохождении его через слой материала, определяется выражением

$$p_1 - p_2 = 2k'_g \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_F^2 \gamma_g}{gd} \cdot x, \text{ Па}, \quad (6)$$

где  $k'_g$  - коэффициент, зависящий от режима течения воздуха в поровых каналах, то есть от числа Рейнольдса,  $Re$ ;  $v_F$  - скорость, отнесенная ко всему сечению слоя, м/с;  $d$  - средний диаметр частиц материала, м.

Число Рейнольдса определяется по формуле [3].

$$Re = \frac{v_F d \gamma_g}{\mu g} \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon)} \quad (7)$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Тогда для перепада давления получаем выражение

$$p_1 - p_2 = 18\pi^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu v_F x}{d^2}. \quad (8)$$

При расчете перепада давления исходили из того, что частицы материала имеют сферическую форму. Для реального материала, например, цемента, состоящего из частиц различных размеров и форм, в формуле (8) вместо  $d$  следует брать среднеповерхностный размер частиц  $d_{cp}$

$$\frac{1}{d_{cp}} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{d_i}, \quad (9)$$

где  $X_i$  - массовая доля  $i$ -ой фракции со средним размером  $d$ .

При повышении скорости течения газа перепад давлений в неподвижном слое материала возрастает до тех пор, пока напорная сила, действующая на слой, не станет равной его весу. Тогда сила реакции, возникающая в результате работы аэрационного устройства будет равна нулю, а вес слоя материала определяется формулой (5).

Рассмотрим разгрузку пневмокамерного насоса, подходящую к концу. В этом случае весь остающийся в камере материал находится в псевдооживленном состоянии, и на него действует воздух, находящийся в камере насоса. Для упрощения расчетов примем высоту камеры насоса равной исходной высоте  $x$  слоя материала, тогда

$$Q_g = \gamma_g F x g, \quad (10)$$

а вес частиц материала в слое определяется выражением

$$Q - Q_g = (1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_m - \gamma_g) F x g. \quad (11)$$

В свою очередь для перепада давления получим

$$(p_1 - p_2) \cdot F g = (1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_m - \gamma_g) F x g; \quad (12)$$

$$(p_1 - p_2) = (1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_m - \gamma_g) x.$$

Подставив выражение (12) в формулу (8), получим выражение для скорости, необходимой для поддержания материала в псевдооживленном состоянии

$$v_{F \min} = \frac{1}{18\pi^2} \cdot \frac{d_{cp}^2}{\mu} \cdot (\gamma_m - \gamma_g) \cdot \frac{\varepsilon_m^3}{1 - \varepsilon_m}, \text{ м/с.} \quad (13)$$

Эта скорость является минимальной скоростью псевдооживления. Ее значение зависит от минимального значения пористости материала  $\varepsilon_m$ , которая устанавливается в результате действия на загрузку материала собственного веса и давления сжатого воздуха, подаваемого в верхнюю часть камеры. Для типичных условий работы пневмокамерного насоса  $\varepsilon_m \approx 0,4$ . В реальных условиях псевдооживление материала ведется в стесненных условиях, поэтому приведенная скорость оживающего воздуха выше  $v_{F \min}$  и должна уточняться опытным путем [4, 6].

**Выводы.** Приведенное соотношение для минимальной скорости псевдооживления материала в камере пневмокамерного насоса определяет остальные факторы, влияющие на процесс псевдооживления и позволяет оценить рас-

ход сжатого воздуха, необходимого для работы пневмокамерного насоса.

*\*Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства Образования РФ на 2014–2016 годы.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Урбан Я. Пневматический транспорт. Под ред. Л.М. Шведова. М.: Машиностроение, 1967. 253с.
2. Кунии Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунии, О. Левеншпиль. Под ред. чл.-корр. АН СССР М.Г. Слинько и канд. хим. наук. Г.С. Яблонского. М.: Издательство «Химия», 1978. 447 с.
3. Труды всесоюзного научно-исследовательского института подъемно-транспортного машиностроения ВНИИПТ-МАШ. Методика расчета установок пневматического транспорта. Под редакцией Сегаль И.С. Москва. 1962г. 131 с.
4. Вельшоф Г. Пневматический транспорт при высоких концентрациях перемещаемого материала. М.; Колос, 1964. – 156с.
5. Артыков Н.А. Пневмотранспорт легкоповреждаемых материалов. Ташкент: Фан, 1984. 152с.
6. Василевский М.В. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография / М.В. Василевский, В.И. Романдин, Е.Г. Зыков. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 288 с.
7. Зарницына Э.Г. Вентиляционные установки и пневмотранспорт: учебное пособие / Э.Г. Зарницына, О.Н. Терехова. Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. 228 с.
8. Шишкин С.Ф., Гаврилюк Д.Н. Расчет высоконапорного пневмотранспорта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №3. С. 114-117.