

ГИДРАВЛИКА

Р. М. МИРЗАХАНИЯН

ПНЕВМОТРАНСПОРТ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
 В СПЛОШНОМ СЛОЕ

В работе [1] описаны способы осуществления и расчета пневмотранспорта сыпучих материалов в плотном слое. При этом виде пневмотранспорта по трубопроводу движется двухфазная взвесь, состоящая из агрегатов твердых частиц — «поршней» и пузырей воздуха. В тех случаях, когда износ перемещаемого зернистого материала недопустим (хрупкие катализаторы и др.), пневмотранспорт целесообразно осуществить в сплошном слое [2], в котором нет пузырей воздуха и частицы движутся в непосредственном соприкосновении друг с другом. Пористость ϵ движущегося слоя равна пористости нарыхлого неподвижного слоя данного материала.

Настоящая статья посвящена вопросам осуществления и расчета пневмотранспорта зернистых сыпучих материалов (размерами частиц 1—5 мм) в сплошном слое. Движущийся сплошной слой твердых частиц получается в установке для пневмотранспорта в плотном слое [1] с нижней поддувкой материала и установлением на конце транспортной трубы ограничителя (рис.). Последний создаст дополнительное сопротивление выходящему из транспортной трубы потоку твердых частиц и при определенном значении величины зазора h в трубе устанавливается пневмотранспорт в сплошном слое. Транспортная труба может быть постоянной (цилиндрическая труба, рис. а), переменного сечения (рис. б) и ступенчатая (рис. в).

Независимо от формы и направления транспортной трубы в элементарном ее участке длиной dl (x) перепад давления dP определяется по уравнению

$$dP = dP_0 + dP_z + dP_c, \quad (1)$$

где dP_0 — перепад давления, при котором начинается пневмотранспорт, Па; dP_z — потери давления на трение частиц о стенки трубы, Па; dP_c — потери давления на преодоление дополнительного сопротивления движения частиц, вызванного ограничителем, Па:

$$dP_0 = \Delta p_0 dl, \quad (2)$$

$$dP_c = \Delta p_c dl, \quad (3)$$

где Δp_0 — удельный перепад давления, при котором начинается пневмотранспорт, Па/м; Δp_c — удельный дополнительный перепад давления, Па/м. Используя полученное в [1] выражение для определения dP , можно вместо уравнения (1) написать

$$\frac{dP}{dl} = \Delta p_0 + \frac{C_2^{2,5} \rho_s (1-z) d^{2,5} \beta^{2,4}}{\phi D^{2,5}} + \Delta p_c \quad (4)$$

Показано [1], что dP определяется также по уравнению:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{137,59 (1-z)^2 u_{0z} P_x^2 \mu}{z^2 \phi^2 \sigma^2 \rho^2} + \frac{1,755 (1-z) u_{0z}^{2,5} \rho_s P_x^{1-6,35z} \mu^{1,25}}{P_x^{1-1,4z} z^3 \phi d} \quad (5)$$

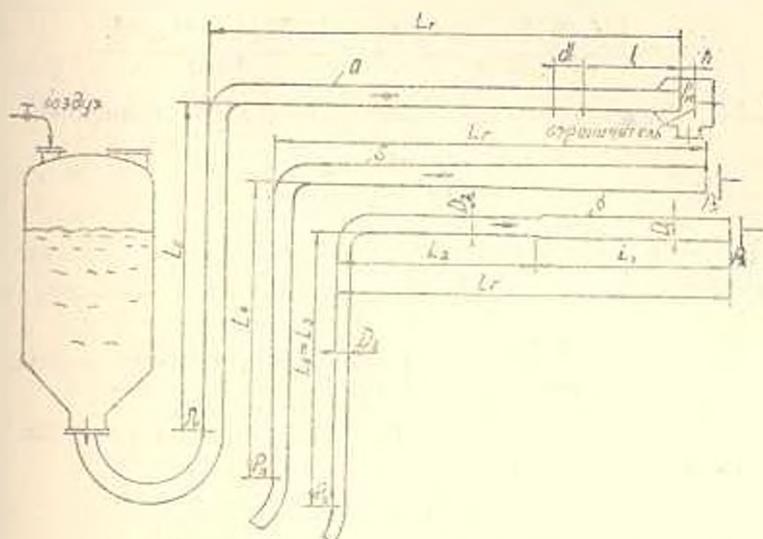


Рис. Схема пневмотранспортной установки.

В уравнениях (4) и (5): P , P_x — давление в данном и конечном сечениях трубопровода, Па; ρ_s — плотность твердых частиц, кг/м³; ρ_a — плотность воздуха в конечном сечении трубопровода, кг/м³; u — скорость воздуха относительно движущихся частиц, рассчитанная на полное сечение трубы, м/с; u_{0z} — скорость воздуха, при котором начинается пневмотранспорт в условиях конца транспортной трубы, м/с; μ — вязкость воздуха, Па·с; ϕ — коэффициент формы частиц; d — диаметр шара, эквивалентного по объему данной бесформенной частице, м; C — коэффициент: для вертикального потока $C = 2,56$, а для горизонтального — $C = 2$; g — ускорение силы тяжести, м/с²; D — диаметр трубы, м; β — скорость движения частиц, м/с; z — показатель степени, зависящий от критерия Архимеда:

$$Ar = \frac{g d^3 \rho_s (\rho_s - \rho_a)}{\mu^2} \quad (6)$$

Показано [3], что при $Ar < 10$, $z = 0$; $10 < Ar < 6300$, $z = 0,0115$; $6300 < Ar < 235500$, $z = 0,2455$; $Ar > 235500$, $z = 0,5$.

Для вертикального потока u_{0v} есть скорость начала псевдооживления твердых частиц — u_{0v} , а для горизонтального потока скорость u_{0h} связана с u_{0v} следующим уравнением [2]:

$$u_{0h} = 0,733 u_{0v}. \quad (7)$$

Для вертикального потока Δp_0 определяется по уравнению

$$\Delta p_0 = \rho_T (1 - \epsilon) g. \quad (8)$$

а для горизонтального потока при использовании уравнения (5), а также $P_k = P$, $u_{0k} = u = u_{0h}$ и $dP/dl = \Delta p_0$:

$$\Delta p_0 = \frac{137,59 (1 - \epsilon)^2 u_{0h} \mu}{\epsilon^3 \Phi^2 \partial^2} + \frac{1,755 (1 - \epsilon) \rho_k u_{0h}^2}{\epsilon^3 \Phi \partial}. \quad (9)$$

Скорость движения частиц β определяется по уравнению:

$$\beta = \frac{4G}{\pi D^2 \rho_T (1 - \epsilon)}, \quad (10)$$

где G — массовый расход твердых частиц, кг/с,

а скорость u —

$$u = (\omega - \beta) z, \quad (11)$$

где ω — скорость воздуха в порах между частицами движущегося слоя, относительно неподвижных стенок трубы, м/с.

В общем случае ω связана с этой же скоростью в конце трубы ω_k уравнением

$$\omega D^2 \rho = \omega_k D_k^2 \rho_k. \quad (12)$$

Здесь D , D_k — диаметры данного и конечного сечений трубы, м (в цилиндрической трубе $D = D_k$). Плотность воздуха в данном сечении трубы ρ (кг/м³) связана с ρ_k уравнением

$$\rho P_k = \rho_k P. \quad (13)$$

Совместное решение уравнений (10) — (13) дает выражение для определения переменного по длине трубы скорости u :

$$u = \frac{\rho_k \omega_k D_k^2 \epsilon}{\rho D^2} - \frac{4G \epsilon}{\pi D^2 \rho_T (1 - \epsilon)}. \quad (14)$$

Вышеприведенные формулы общие для всех трех форм транспортных труб. Покажем отдельно принципы расчета транспортной трубы каждой формы.

Цилиндрическую трубу целесообразно применять при небольших расстояниях транспортирования L . Расчет таких труб производится из условия отсутствия влияния ограничителя на общие потери давления в начале трубы, т. е. из условия $dP_k = 0$. Тогда в начальном сечении трубы общие потери давления будут:

$$dP = dP_0 + dP_k. \quad (15)$$

В остальных сечениях трубопровода общие потери давления определяются уравнением (1). Расчет цилиндрической трубы проводится следующим образом. Сначала определяется общий перепад давления на единицу длины в начале транспортной трубы Δp_n по уравнению, полученному из (4), при $\Delta p_c = 0$ и $dP/dl = \Delta p_n$:

$$\Delta p_n = \Delta p_0 + \frac{Cg^{0,8} \rho_T (1 - \epsilon) \bar{\rho}^{0,3} \beta^{0,4}}{\Phi D^{0,5}} \quad (16)$$

В расчетном дифференциальном уравнении (5) переменными являются P и l . Решая это уравнение, с учетом (14), одним из численных методов на ЭВМ и интегрируя его в пределах l от 0 до L и P от P_n до P_n , находим давление в начале транспортной трубы P_n . Величина скорости частиц β выбирается (рекомендуется $\beta \leq 2$ м/с), а диаметр трубы определяется по уравнению (10). Все остальные параметры в уравнениях (5) и (14) известны, кроме w_x . Оптимальное значение w_x соответствует условию $dP_c = 0$ в начале транспортной трубы. Для нескольких выбранных значений w_x по уравнению (5) определяются значения P_n , а затем значения Δp_n по следующему уравнению, полученному из (5) и (14) при $P = P_n$ и $dP/dl = \Delta p_n$:

$$\Delta p_n = \frac{137,59 (1 - \epsilon)^2 u_{0x} P_x^2 \mu}{\epsilon^2 \Phi^2 \bar{\rho}^2 P_x^2} + \frac{1,755 (1 - \epsilon) u_{0x}^{0,25} \rho_x P_{ir}^{1,75}}{P_x^{1,25} \epsilon^2 \Phi \bar{\rho}} \times \left(\frac{P_x w_x D^2 \epsilon}{l_n D^3} - \frac{4G\epsilon}{\pi D^2 \rho_T (1 - \epsilon)} \right)^{1,75} \quad (17)$$

Оптимальное значение P_n соответствует такому w_x , при котором величины Δp_n , определенные по уравнениям (17) и (16), равны. Расход воздуха в условиях конца транспортной трубы Q_k определяется уравнением

$$Q_k = 0,785 D^2 w_k \epsilon. \quad (18)$$

Расчетные данные пневмотранспорта сферических частиц алюмосиликатного катализатора ($\bar{\sigma} = 3,25$ мм, $\rho_T = 1260$ кг/м³, $\epsilon = 0,437$, $\Phi = 1$) по цилиндрической трубе приведены в таблице. Другие параметры, входящие в расчетные уравнения: $P_x = 90600$ Па; $u_{0x} = u_{0n} = 1,22$ м/с; $u_{0x} = u_{0r} = 0,894$ м/с; $\rho_x = 1,079$ кг/м³; $\mu = 0,018 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $z = 0,5$ ($Ar = 1,4 \cdot 10^6$).

Как показано в [2], наилучшие условия пневмотранспорта в сплошном слое можно создавать в трубе переменного сечения, рассчитанной так, чтобы по всей ее длине имело место условие $dP_c = 0$. Профиль такой трубы, а также изменение давления по ее длине можно определить совместным решением системы уравнений (4) и (5) (при $\Delta p_c = 0$). Результаты расчетов при $D_n = 60$ мм приведены в таблице.

Длины и диаметры ступеней ступенчатой трубы можно установить, имея профиль трубы переменного сечения. Расчет каждой ступени производится отдельно, начиная с конца транспортной трубы, по формулам (5), (16), (17). Расчетные данные при $L_1 = 5$ м, $L_2 = 5$ м, $L_3 = 5$ м, $D_1 = 52,55$ мм, $D_2 = 47,03$ мм, $D_3 = 34,95$ мм приведены в таблице.

Таблица

Расчетные и опытные данные пневмотранспорта алюмосиликатных шариков
($G = 0,4$ кг/с, $L_T = 10$ м, $L_3 = 5$ м)

№	Форма транспортной трубы	Расчетные данные		Опытные данные	
		P_n , кПа	Q_n , см ³ /с	P_n , кПа	Q_n , см ³ /с
1	Цилиндрическая труба, $D=52$ мм	392,5	9250	386,7	9200
2	Труба переменного сечения, $D_n=34,95$ мм, $D_k=60$ мм	241,9	4084	235,1	4150
3	Ступенчатая труба, $D_n=34,95$ мм, $D_k=52,55$ мм	288	4436	279,8	4360

Все рассчитанные трубы были изготовлены и испытаны. Сравнение вариантов показывает, что параметры трубы переменного сечения и ступенчатой трубы мало отличаются друг от друга и поэтому на практике можно применять ступенчатую трубу, изготовление которой легче.

ЕрПИ им. К Маркса

7 VII. 1980

Ի. Մ. ՄԻՐՉԱԽԱՆՅԱՆ

ՀԱՏԻԿԱՎՈՐ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀՈՒ ՇԵՐՏՈՎ ՊՆԵՎՄՈՓՈՆԱԿՐՈՒՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Նկարագրված է հատիկավոր սորուն նյութերի հոծ շերտով պնևմոփոխադրման իրականացման եղանակ՝ հաստատուն և փոփոխական կտրվածք ունեցող, ինչպես նաև սաստիճանաբար փոփոխվող տրամագծով տրանսպորտային խողովակներով: Առաջարկված բանաձևերի ճշտությունը ստուգված է ալյումոսիլիկատային գնդիկների պնևմոփոխադրման հաշվային և փորձնական տվյալների համեմատմամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мирзаханян Р. М., Акопян Р. Е., Даниелян Н. Х. Пневмотранспорт сыпучих материалов в плотном слое.— Изв. АН АрмССР (сер. ТН), 1978, т. XXXI, № 1, с. 27—33.
2. Мирзаханян Р. М., Гаспарян А. М. Пневмотранспорт крупнозернистых материалов в плотном слое.— Изв. АН АрмССР (сер. ТН), 1968, т. XXI, № 3, с. 3—7.
3. Мирзаханян Р. М. О скорости полного псевдооживления сыпучих материалов.— Арм. хим. журнал, 1980, т. 33, № 7, с. 535—539.