

УДК 622.648.6.65:622.647.7.65+531.555.1:531.384:532.51.542.012.4.001.24

Б.В. Пономарев

ВЫЛЕТ ЧАСТИЦ ПОЛИДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАМКНУТОЕ ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО ШАХТЫ ПРИ ПНЕВМОЗАКЛАДКЕ

У статті описано розрахункову схему для визначення геометричних і кінематичних параметрів повітряного струменя, а також руху частки закладального матеріалу у прямому та зворотному потоці повітря в замкнутому просторі шахтної виробки. Наведено вивід розрахункових формул математичної моделі процесу вильоту часток закладального матеріалу в замкнутий простір. Дано алгоритм, а також аналіз результатів розрахунку на прикладі конкретних значень параметрів.

START OF POLIDISPERSE MATERIAL IN THE CLOSED PRODUCED SPACE OF SHAFT AT A BACKFILLING

Described the method for determination of parameters of an air jet, and also movement of particles of backfilling material in direct and return flow of air in the closed space of mine development. The conclusion of the settlement formulas of mathematical model that process.

При закладке выработанного пространства шахты подача материала осуществляется пневмотранспортными машинами в заранее подготовленный объем в массиве, полученный после выемки полезного ископаемого. В технологии пневмозакладочных работ при подготовке выработанного пространства удаляют забойную крепь и ограждают закладочную полосу с заданной шириной и высотой.

В процессе формирования закладочного массива возникает обратный поток воздуха отраженный от откоса закладки, а сама струя представляет собой турбулентную затопленную струю [1].

Рассмотрим частицу эквивалентного радиуса a , вылетающую из трубопровода радиусом R_0 с начальной скоростью v_0 и движущуюся в турбулентной струе истекающей со скоростью u_0 в выработанное пространство высотой H и шириной b_1 . Ось трубопровода расположена на половине высоты $H/2$ выработанного пространства. Начало координат O поместим в точку центра выходного сечения трубопровода, ось Ox - вдоль оси трубопровода. Ось Oy - вниз перпендикулярно оси Ox (рис. 1).

Нахождение формы и размеров затопленной газовой струи с учетом обратного тока представляет собой сложную задачу газовой динамики. Определим форму и размеры струи приближенно. Сделаем допущение, что расширение струи в зависимости от пути, пройденного частицей газа от среза трубы к откосу закладочного массива и затем обратно до выхода ее из выработки, происходит так, что площадь поперечного сечения струи возрастает по линейному закону как в прямом так и в обратном потоке. Мысленно продолжим коридор выработки по направлению прямого тока на расстояние равное расстоянию L_1 от среза

трубы до тупика. Рассмотрим поперечное сечение струи прямого тока площадью S_1 на расстоянии $x = 2 L_1$. Это сечение должно быть эквивалентно сечению струи обратного тока на срезе трубопровода при $x = 0$, площадь которого равна $S_1 = b_1 H - \pi R_0^2$.

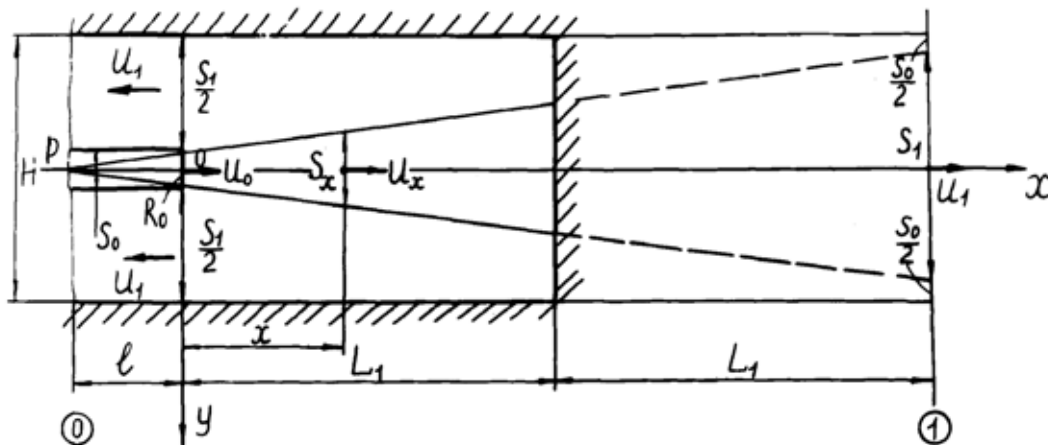


Рис. 1. - Схема для определения геометрических и кинематических параметров воздушной струи в замкнутом выработанном пространстве.

В работе [2] показано, что скорость газа в струе обратно пропорциональна площади поперечного сечения струи

$$u_x = u_0 S_0 / S_x. \quad (1)$$

Полагаем, что скорость газа в пределах поперечного сечения струи - постоянна.

Согласно принятого линейного закона изменения площади струи записываем в виде:

$$S_x = (b_1 H - 2\pi R_0^2) x / 2L_1 + \pi R_0^2. \quad (2)$$

Из (1) с учетом (2) получаем:

$$u_x = u_0 / ((b_1 H / 2\pi R_0^2 - 1) x / L_1 + 1). \quad (3)$$

На движущуюся частицу вдоль горизонтальной оси Ox действует аэродинамическая сила $F_{\text{аэр}}$

$$F_{\text{аэр}} = (\pi c_{\mu} \rho_1^0 a^2 (u_x - v_x)^2) / 2. \quad (4)$$

где c_{μ} - коэффициент аэродинамического сопротивления.

Вдоль вертикальной оси Oy на частицу действует сила тяжести $P = mg$ и сила сопротивления воздуха F_{μ} , определяемая по закону Стокса.

$$F_{\mu} = 6\pi\mu a\dot{y}. \quad (5)$$

где μ – вязкость воздуха.

Дифференциальные уравнения, описывающие движение частицы в прямом потоке воздушной струи, имеют вид:

$$\ddot{x} = A \left[\frac{u_0}{(b_1 H / 2\pi R_0^2 - 1)x / L_1 + 1} - \dot{x} \right]^2; \quad (6)$$

$$\ddot{y} = g - B \dot{y},$$

где

$$A = \frac{3c_{\mu}\rho_1^0}{8a\rho_2^0}; \quad (6a)$$

$$B = \frac{9\mu}{2a^2\rho_2^0}. \quad (6b)$$

ρ_1^0 , ρ_2^0 - плотности воздуха и материала частиц соответственно; $c_{\mu} = c_{\mu}(\text{Re})$ – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Заметим, что первое и второе уравнение (6) независимы.

Точку выхода частицы закладочного материала из прямого потока затопленной струи можно получить в результате пересечения траектории частицы с линией – границей прямого и обратного потоков, лежащей в осевой вертикальной плоскости трубопровода. Получим уравнение границы прямого и обратного потоков. Полагаем, что вертикальное поперечное сечение прямого потока имеет вид эллипса с полуосями B_x и R_x

$$B_x / R_x = (b_1 / H - 1) / (x / 2L_1) + 1. \quad (7)$$

Приравнивая площадь поперечного сечения струи в виде эллипса

$$S_x = \pi B_x R_x \quad (8)$$

и выражение для S_x из формулы (2), а также исключая величину B_x с помощью выражения (7) после несложных преобразований получаем

$$R_x = \sqrt{\frac{(b_1 H - 2\pi R_0^2)x + 2\pi R_0^2 L_1}{\pi(b_1 / H - 1)x + 2\pi L_1}}, \quad (9)$$

где R_x - вертикальная координата относительно оси струи точки на линии нижней границы прямого и обратного потоков, лежащей в осевой вертикальной

плоскости коридора выработки, x - горизонтальная координата. Величина B_x определяется из формулы (7) с помощью выражения (9) для R_x .

Возвращаемся к дифференциальным уравнениям (6). Первое из уравнений решается численно. Решение второго имеет вид

$$y = \left(\frac{g}{B^2} - \frac{v_{y0}}{B} \right) (-1 + e^{-Bt}) + \frac{g}{B} t \quad (10)$$

и

$$v_y = \dot{y} = \left(v_{y0} - \frac{g}{B} \right) e^{-Bt} + \frac{g}{B}. \quad (11)$$

С учетом разложения e^{-Bt} в степенной ряд из (10) и (11) получаем

$$y = v_{y0} t + \frac{1}{2} (g - Bv_{y0}) \left(t^2 - \frac{B}{3} t^3 + \frac{B^2}{12} t^4 - \dots \right); \quad (12)$$

$$v_y = \dot{y} = v_{y0} + (g - Bv_{y0}) \left(t - \frac{B}{2} t^2 + \frac{B^2}{6} t^3 - \dots \right). \quad (13)$$

При заданных начальных условиях: $t = 0$, $v_x = v_{x0}$, $v_y = v_{y0} = 0$ на каждом шаге интегрирования по t вычисляются из первого уравнения (6) величины x , v_x , из формулы (3) величина u_x , а из решения (10), (11) или (12), (13), величины y , v_y . Пары значений x , y позволяют построить траекторию частицы. Как только в процессе численного интегрирования будет выполнено условие

$$y \geq R_x, \quad (14)$$

то расчет в прямом потоке заканчивается, фиксируется выход частицы в обратный поток в точке В на траектории и запоминаются значения величин: $t = t_B$, $x = x_B$, $y = y_B$, $v_x = v_{xB}$, $v_y = v_{yB}$, после чего необходимо продолжить расчет движения частицы в обратном потоке воздуха.

Дифференциальные уравнения движения частиц в обратном потоке воздушной струи получаем аналогично уравнениям (6) с той разницей, что скорость газа имеет противоположный знак и определяется в соответствии с площадью поперечного сечения обратного потока воздуха. Последняя находится как разность площади поперечного сечения рассматриваемого коридора выработки и площади сечения прямого потока воздуха

$$S_x^{\text{обп}} = b_1 H - \pi R_0^2 - \left(\frac{b_1 H}{2} - \pi R_0^2 \right) \frac{x}{L_1}. \quad (15)$$

В соответствии с формулой (1) и (19) записываем для скорости обратного потока

$$u_x^{\text{обп}} = u_0 S_0 / S_x^{\text{обп}} = \frac{u_0}{\left(\frac{b_1 H}{2\pi R_0^2} - 1\right)x / L_1 + 1 - b_1 H / \pi R_0^2} \quad (16)$$

В итоге для движения в обратном потоке получаем

$$\ddot{x} = -A \left[\frac{u_0}{\left(\frac{b_1 H}{2\pi R_0^2} - 1\right)\frac{x}{L_1} + 1 - \frac{b_1 H}{\pi R_0^2}} - \dot{x} \right]^2 ; \quad (17)$$

$$\ddot{y} = g - B \dot{y} .$$

Получим решение первых уравнений (6) и (17) для координаты x частицы в прямом и обратном потоке воздуха. С использованием выражения $dx / dt = v_x$ приводим каждое из исходных дифференциальных уравнений второго порядка к системе двух уравнений первого порядка в форме Коши

$$\frac{dx}{dt} = v_x ; \quad (18)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = A Q |Q| , \quad (19)$$

где

$$Q = \frac{u_0}{\left(\frac{b_1 H}{2\pi R_0^2} - 1\right)\frac{x}{L_1} + 1} - v_x \quad (\text{прямой поток}); \quad (20)$$

$$Q = \frac{u_0}{\left(\frac{b_1 H}{2\pi R_0^2} - 1\right)\frac{x}{L_1} + 1 - \frac{b_1 H}{\pi R_0^2}} - v_x \quad (\text{обратный поток}); \quad (21)$$

$Q = (u_x - v_x)$ – скорость обтекания частицы газом.

Поскольку движение мелких частиц происходит при небольшой разности скоростей газа и частиц, то число Рейнольдса при обтекании такой частицы может быть невелико ($Re \sim 1$) и само обтекание приближается к вязкому процессу Стокса. Для крупных частиц обычно $Re > 10^3$ и $c_\mu = 0,5$. В общем случае необходимо рассматривать коэффициент аэродинамического сопротивления (c_μ) в широком диапазоне значений Re , представляемый формулой [3].

$$c_\mu = \frac{23,53}{Re} + \frac{3,481}{Re^{0,2879}} . \quad (22)$$

Отклонения (22) от эксперимента в диапазоне $0,05 < Re < 10^3$ [4] не превосходит 3 %.

Решение системы уравнений (18), (19) произведено методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Вычислялись величины: t, v_x, x, u_x, R_x . Соответствующие им значения v_y, y определялись по формулам (11), (10) для мелких и средних частиц ($a \leq 10^{-2}$ м) и по формулам (13), (12) для крупных частиц ($a > 10^{-2}$ м). При использовании формул (11), (10) для крупных частиц происходит накопление ошибок в процедуре вычисления величины $(1 - e^{-Bt})$, которая при малых B близка к нулю. В связи с этим для крупных частиц следует использовать формулы (13), (12).

Расчет движения частицы в обратном потоке начинается при $y \geq R_x$ со значений $t = t_B, x = x_B, v = v_{xB}$ и заканчивается при условии

$$y \geq H / 2, \quad (23)$$

что соответствует выпадению частицы на почву выработки.

Алгоритм выполняется в такой последовательности:

1. Задаются параметры: $a, \rho_2^0, \rho_1^0, \mu, R_0, b_1, L_1, H$; начальные значения переменных: $t_0, x_0, y_0, v_{x0}, v_{y0}, u_0$ и шаг интегрирования, который выбирается от $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с в прямом потоке до $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с в обратном потоке газа.

2. По формуле (6в) определяется параметр B , который остается постоянным в процессе решения задачи для $\rho_2 = \text{const}$ и $a = \text{const}$.

3. По формуле (3) определяется скорость газа u_x .

4. По формуле (20) для прямого потока или (21) для обратного потока газа определяется относительная скорость обтекания Q частиц газом.

5. По формуле

$$Re = |Q| 2a\rho_1^0 / \mu \quad (24)$$

определяется число Рейнольдса при обтекании частицы.

6. Если $Re < 1000$, то аэродинамический коэффициент c_μ определяется по формуле (22). Если $Re \geq 1000$, то принимается $c_\mu = 0,5$.

7. По формуле (6а) определяется параметр A .

8. Производится вычисление v_x, x посредством интегрирования методом Рунге-Кутты 4-го порядка системы дифференциальных уравнений (18), (19) и вычисление v_y, y по формулам (11), (10) для мелких и средних частиц ($a \leq 10^{-2}$ м) или по формулам (13), (12) для крупных частиц ($a > 10^{-2}$ м).

9. По формуле (9) определяется половина вертикальной ширины струи газа R_x в прямом потоке.

10. На каждом последующем шаге интегрирования алгоритм возвращается к п. 3 и для новых значений u_x, v_x , вычисляются новые Q, Re, c_μ, A, R_x .

11. При $y \geq R_x$ частица входит в обратный поток газа и скорость обтекания Q вычисляется по формуле (21).

12. При $y \geq H/2$ частица выпадает на почву выработки и расчет заканчивается.

Программа вычислений по этому алгоритму приведена в [3] (см. Progr. № 19).

Пример расчета по приведенной в [3] программе при значениях параметров: $L = 15$ м, $b_1 = 2,5$ м, $H = 1$ м, $R_0 = 0,075$ м, $\rho_2^0 = 2600$ кг/м³, $\rho_1^0 = \rho_{1,a}^0 = 1,293$ кг/м³, $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Па · с, $u_0 = 80$ м/с, $x_0 = y_0 = v_{y0} = 0$ с начальной скоростью вылета частиц, определяемой по эмпирической формуле [2]

$$v_{x0} = v_{2L} = \frac{6,853}{d(\text{м}) + 0,0917 - 2,94 \cdot 10^{-6} Q_1^V (\text{м}^3 / \text{ч}) - 58,63 + 9,22 \cdot 10^{-3} Q_1^V (\text{м}^3 / \text{ч})}, \text{ м/с} \quad (25)$$

где d - диаметр частиц закладочного материала, Q_1^V - объемный расход сжатого воздуха в трубопроводе, показывает что наибольшей дальностью полета обладают частицы средних размеров $d = 0,4 - 2$ см, которые ударяются непосредственно о тупиковую стенку коридора выработки. В диапазоне $0 - 3$ м от стенки выпадают мелкие $d = 1,5 - 4$ мм и крупные $d = 2 - 6$ см частицы. Эти три фракции составляют 90 % объема закладочной смеси. Еще на 2 метра ближе выпадают частицы $d = 1 - 1,5$ мм. Более мелкие частицы $d = 0,1 - 0,2$ мм оседают в $4 - 5$ м от среза пневмотранспортного трубопровода. Частицы $d \leq 40$ мкм (пыль) имеют малую скорость скольжения ($u_x - v_x$) т.е. их скорость близка к скорости воздушного потока. Скорость их осаждения v_y также мала, поэтому эти частицы выпадают на почву выработки ближе к тупиковой стенке, двигаясь назад в обратном потоке, другие на самой стенке, а еще более мелкие уносятся из выработки обратным потоком воздуха (рис. 2)

Зависимости дальности транспортирования (l) частиц закладочного материала и времени полета (T) от размера частицы ($a = d / 2$) в логарифмических координатах ($-\lg a$) при движении частиц в замкнутом пространстве шахтной выработки, полученные в результате расчета по приведенной программе представлены на рис. 3.

Таким образом, как показывают результаты этого примера, можно утверждать, что в рассмотренном случае дальность вылета 90 % закладочного материала составляет не менее 10 м. Последнее следует учитывать при разработке технологической схемы закладки и в частности при выборе шага перестановки секций пневмотранспортного трубопровода.

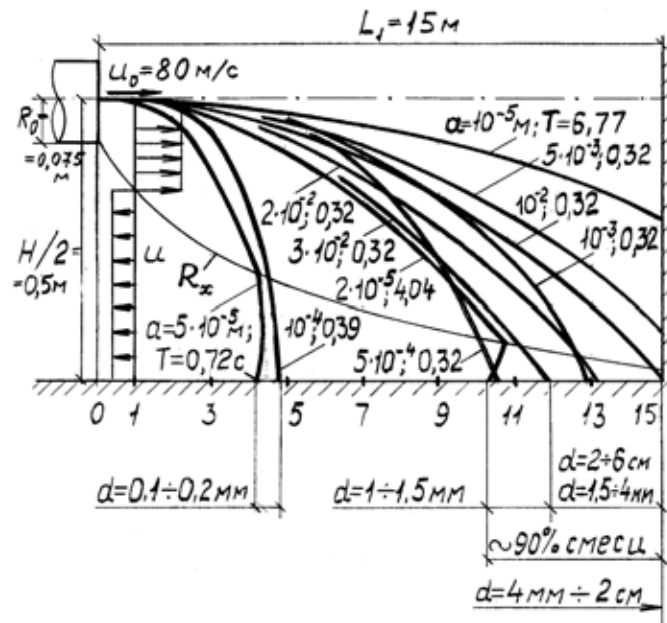


Рис. 2. - Траектории движения частиц полидисперсного закладочного материала в прямом и обратном потоке воздуха в замкнутом пространстве шахтной выработки

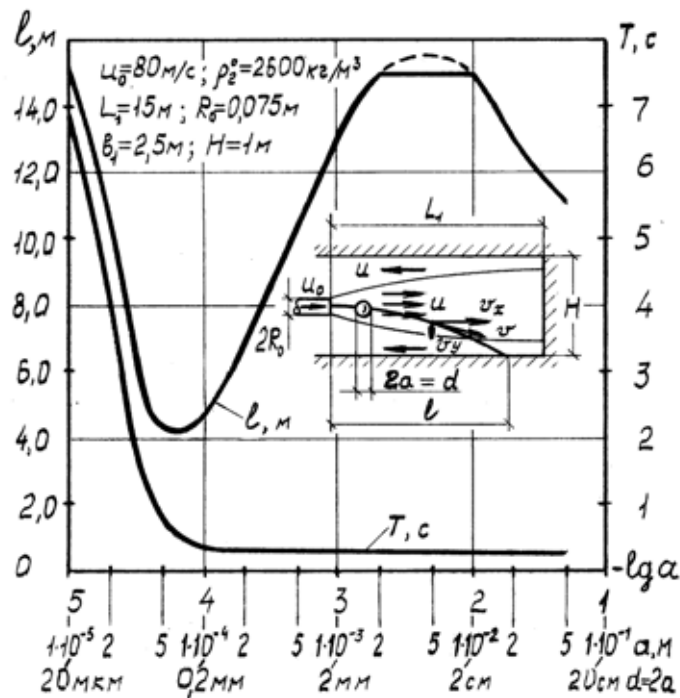


Рис. 3. - Зависимости дальности вылета (l) частиц закладочного материала и времени полета (T) от размера частицы ($a = d/2$) в логарифмических координатах ($-\lg a$) при движении частиц в замкнутом пространстве шахтной выработки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
2. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. – Киев. : Наук. думка, 2001. – 519 с.
3. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Алгоритмы и программы для расчета вибропневмотранспортных систем. – Киев. : Наук. думка, 2002. – 134 с.
4. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987. – 430 с.