

Рис. 2 - Распределение давления воды в порах угля  $P$  и дополнительных напряжений  $S$  в момент сброса давления

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Софийский К.К., Калфакчиян А.П., Воробьев Е.А. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля. – М.: Недра, 1994. – 192 с.
2. Самарский А.А. Разностные схемы газовой динамики. М.: Наука, 1975. – 315с.
3. Софийский К.К., Черный А.В. Интегральный метод жидкостного баланса в задачах фильтрации флюидов в пористых средах//Материалы IV Международной научной школы–семинара "Импульсные процессы в механике сплошной среды". – Николаев: Аттол. - 2001.–С. 58–59.

УДК 622.648.6.65+532.51.012.4.001.24

А.И. Волошин, Б.В. Пономарев,  
А.А. Волошин

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С НАКЛОННЫМ ТРУБОПРОВОДОМ

В роботі розглянуто побудову математичної моделі та інженерного алгоритму розрахунку пневмотранспортної системи з транспортним трубопроводом, розташованим під кутом до горизонту. Модель дозволяє проводити обчислення параметрів таких систем.

### MATHEMATICAL MODELING OF PNEUMOTRANSPORT SYSTEMS WITH INCLINED PIPELINE

In work the construction mathematical model and engineering algorithm of account pneumo-transport system with transport pipeline located under a corner to horizon is considered. The model allows to calculate parameters of such systems.

Используя методический подход, выполненный в работе [1] применительно к пневмотранспортным системам с горизонтальным трубопроводом, для систем

с наклонным трубопроводом, уравнения одномерной математической модели двухфазного потока с учетом собственного веса аэромеси записываются исходя из общих уравнений законов сохранения массы и импульса. Однако, в отличие от уравнений для одномерной стационарной задачи для горизонтального трубопровода, в них, после исключения сил Архимеда, содержатся приведенные объемные силы, каковыми являются проекции сил веса на ось наклонного трубопровода

$$\alpha_1 \rho_1^0 v_1 = M_1 = \text{const}; \quad (1)$$

$$\alpha_2 \rho_2^0 v_2 = M_2 = \text{const}; \quad (2)$$

$$\alpha_1 \rho_1^0 v_1 \frac{dv_1}{dx} = -\alpha_1 \frac{dp}{dx} + \alpha_1 \rho_1^0 g_x + F_\mu + F_\lambda; \quad (3)$$

$$\alpha_2 \rho_2^0 v_2 \frac{dv_2}{dx} = -\alpha_2 \frac{dp}{dx} - \alpha_2 \rho_2^0 g_x - F_\mu + F_B, \quad (4)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – объемная концентрация газовой (1) фазы и фазы твердых частиц (2) в двухфазном потоке;  $\rho_1^0, \rho_2^0$  – плотности газа и материала частиц (истинные) кг/м<sup>3</sup>;  $v_1, v_2$  – скорость газовой фазы и фазы твердых частиц, м/с;  $M_1, M_2$  – массовый расход газа и твердых частиц за единицу времени через единицу площади поперечного сечения потока, кг/м<sup>2</sup> · с;  $g_x$  – проекция ускорения силы тяжести на ось трубопровода.

Слагаемые в правой части уравнений (3) и (4)  $F_\mu, F_\lambda$  и  $F_B$  являются соответственно силами аэродинамического взаимодействия газа и частиц (Стокса), турбулентного трения в трубопроводе (Никурадзе) и сопротивления движению частиц (Бусройда):

$$F_\mu = -\frac{3}{8} c_\mu \frac{\rho_1^0}{a} \frac{\alpha_1^2 \alpha_2 v_{12} |v_{12}|}{(1 - 1,16 \alpha_2^{2/3})^2}, \quad v_{12} = v_1 - v_2; \quad (5)$$

$$F_\lambda = -\lambda \rho_1^0 v_1^2 / 2D; \quad (6)$$

$$F_B = -B_S g \alpha_2 \rho_2^0 v_2 / v_1 = -B_S g M_2 / v_1, \quad (7)$$

где  $c_\mu$  – коэффициент сопротивления при обтекании частиц газом ( $c_\mu = 0,5$  для  $Re \approx 10^3$ );  $a$  – радиус эквивалентной частицы, м;  $\lambda$  – коэффициент турбулентного трения газа (лямбда Никурадзе,  $\lambda \sim 10^{-2}$ );  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $B_S$  – коэффициент Бусройда ( $B_S \sim 1$ );  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Используя соотношения (1), (2), а также условие полноты объема двухфазной смеси  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , из уравнения состояния для газа

$$p = \rho_1^0 RT \quad (8)$$

получаем после его дифференцирования по  $x$

$$\frac{dp}{dx} = -P \left( \frac{1}{v_1} \frac{dv_1}{dx} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 v_2} \frac{dv_2}{dx} \right). \quad (9)$$

Исключая с помощью (9)  $P$  из выражений (3), (4) и решая их как систему алгебраических уравнений относительно  $dv_1/dx$  и  $dv_2/dx$  получаем

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dx} = \frac{v_1}{v_2} \left[ \left( \frac{M_2 v_1 v_2}{M_1 RT} - \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^2} \right) (F_\lambda + F_\mu) + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (F_B - F_\mu) + \right. \\ \left. + \left( M_2 \frac{v_2}{RT} - \frac{\alpha_2^2 M_1}{\alpha_1^2 v_1} + \frac{\alpha_2 M_2}{\alpha_1 v_2} \right) g_e \right] / M_2 \left( \frac{v_1^2}{RT} - \frac{\alpha_2^2 M_1 v_1}{\alpha_1^2 M_2 v_2} - 1 \right); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_2}{dx} = \left[ \left( \frac{v_1^2}{RT} - 1 \right) (F_B - F_\mu) + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (F_\lambda + F_\mu) + \right. \\ \left. + \left( \frac{M_2 v_1^2}{RT v_2} - \frac{M_2}{v_2} + \frac{\alpha_2 M_1}{\alpha_1 v_1} \right) g_r \right] / M_2 \left( \frac{v_1^2}{RT} - \frac{\alpha_2^2 M_1 v_1}{\alpha_1^2 M_2 v_2} - 1 \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Переходим к безразмерным переменным

$$\tilde{v}_i = \frac{v_i}{\sqrt{RT}}; \quad \tilde{M}_i = \frac{M_i}{\rho_{1,a}^0 \sqrt{RT}} \quad (i = 1, 2); \quad \tilde{x} = \frac{x}{D}; \quad \tilde{g}_x = \frac{D}{RT} g_x; \quad (12)$$

$$F_c = \varphi F_\mu; \quad F_n = \varphi F_\lambda; \quad \lambda_B = -\varphi F_B, \quad (13)$$

где  $F_c, F_n, \lambda_B$  – безразмерные представители сил Стокса, Никурадзе, Бусройда [1];  $D$  – диаметр трубопровода,  $\rho_{1,a}^0$  – истинная плотность газа при атмосферном давлении;  $\varphi$  – коэффициент, приводящий силы в правых частях выражений (13) к безразмерному виду:

$$\varphi = \frac{M_1}{M_2} \frac{D}{\alpha_1 \rho_1^0 \sqrt{RT}} = \frac{D v_1}{M_2 RT}. \quad (14)$$

Используя соотношения (12) – (14) записываем уравнения (10), (11) в безразмерном виде

$$\frac{d\tilde{v}_1}{d\tilde{x}} = \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2} \left[ \left( \frac{\tilde{v}_1 \tilde{v}_2}{\tilde{M}_{12}} - \alpha_{21}^2 \right) (F_H + F_C) - \alpha_{21} (\lambda_B + F_C) + (\tilde{v}_1 \tilde{v}_2 - \tilde{M}_{12} \alpha_{21}^2 + \alpha_{21} \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2}) \tilde{g}_x \right] / \left[ \tilde{v}_1 \left( \tilde{v}_1^2 - \tilde{M}_{12} \alpha_{21}^2 \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2} - 1 \right) \right]; \quad (15)$$

$$\frac{d\tilde{v}_2}{d\tilde{x}} = \left\{ \alpha_{21} (F_H + F_C) - (\tilde{v}_1^2 - 1) (\lambda_B + F_C) + \left[ \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2} (\tilde{v}_1^2 - 1) + \tilde{M}_{12} \alpha_{21} \right] \tilde{g}_x \right\} / \left[ \tilde{v}_1 \left( \tilde{v}_1^2 - \tilde{M}_{12} \alpha_{21}^2 \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2} - 1 \right) \right], \quad (16)$$

где  $\tilde{M}_{12} = \tilde{M}_1 / \tilde{M}_2 = M_1 / M_2$ ;  $\alpha_{21} = \alpha_2 / \alpha_1$ .

Уравнения (15), (16) представляют собой дифференциальные уравнения в безразмерных переменных, записанные в форме Коши, для случая, когда имеет место действие массовых сил вдоль оси двухфазного потока и в частности для пневмотранспортной системы с наклонным трубопроводом.

Переходим к получению уравнений инженерной методики для расчета таких пневмотранспортных систем.

В этом случае, как показано в [1], удобно использовать в качестве переменных процесса величины  $p$  и

$$J = M_1 V_1 + M_2 V_2 + P \quad (17)$$

или в безразмерных величинах

$$\tilde{p} = p / p_a = p / \rho_{1,a}^0 RT \quad (18)$$

и

$$\tilde{J} = \tilde{M}_1 \tilde{v}_1 + \tilde{M}_2 \tilde{v}_2 + \tilde{p} = J / p_a. \quad (19)$$

Формула (9) в безразмерных величинах принимает вид

$$\frac{d\tilde{p}}{d\tilde{x}} = -\tilde{p} \left( \frac{1}{\tilde{v}_1} \frac{d\tilde{v}_1}{d\tilde{x}} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 \tilde{v}_2} \frac{d\tilde{v}_2}{d\tilde{x}} \right). \quad (20)$$

Дифференцируя по  $\tilde{x}$  выражение (19), принимая во внимание соотношение (20) и подставляя вместо производных от безразмерных скоростей фаз их значения согласно выражениям правых частей уравнений (15), (16), после преобразований и упрощений получаем

$$\frac{d\tilde{J}}{d\tilde{x}} = \frac{\tilde{M}_2}{\tilde{v}_1} \left[ F_H - \lambda_B + \left( \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} + \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2} \right) \tilde{g}_r \right]. \quad (21)$$

С учетом того, что для положительного значения угла  $\beta$  (подъем слева направо)  $g_x = -g \sin \beta$ , где  $\beta$  – угол наклона к горизонту оси транспортного трубопровода, и принимая во внимание соотношения (6), (7), (2), (13), (14), а также первую формулу (12), записываем выражение (21) в виде

$$\frac{d\tilde{J}}{d\tilde{x}} = -\frac{\tilde{M}_2}{\tilde{v}_1} \left[ \frac{\lambda}{2} \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} \frac{\tilde{v}_1^2}{\alpha_1} + \left( B_S + \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} \sin \beta \right) \frac{gD}{RT} + \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_2} \frac{gD}{RT} \sin \beta \right]. \quad (22)$$

Величина  $\alpha_1$  в первом слагаемом в квадратных скобках (22) быстро возрастает и в пределах  $x \cong 5D$  от начального сечения по длине трубопровода достигает значения  $\alpha_1 = 0,95 - 0,97$ . С погрешностью (3 - 5) % принимаем далее  $\alpha_1 = 1$ . Используя выведенные в [1] формулы:

$$\tilde{v}_1 = \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{p}}; \quad (23)$$

$$\tilde{v}_2 = \frac{\tilde{J} - \tilde{p}}{\tilde{M}_2} - \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{M}_2 \tilde{p}}, \quad (24)$$

а также учитывая обозначение

$$\tilde{g} = gD/RT \quad (25)$$

записываем выражение (22) в следующем виде

$$\frac{d\tilde{J}}{d\tilde{x}} = - \left[ \frac{\lambda}{2} \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{p}} + \left( B_S \frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1} + \sin \beta \right) \tilde{g} \tilde{p} + \frac{\tilde{M}_2^2}{\tilde{J} - \tilde{p} - \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{p}}} \tilde{g} \sin \beta \right]. \quad (26)$$

Используя для  $\tilde{p}$  и  $\tilde{J}$  линейные по  $\tilde{x}$  аппроксимации, содержащие  $\tilde{p}_0$ ,  $\tilde{p}_L = 1$ ,  $\tilde{J}_0$ ,  $\tilde{J}_L$  - давление и полный импульс в начале и конце транспортного трубопровода, выражая  $\tilde{J}_0$ ,  $\tilde{J}_L$  через:  $\alpha_1^*$ ,  $\alpha_2^*$  - объемные концентрации при плотной упаковке частиц,  $\tilde{M}_1$ ,  $\tilde{M}_2$ ,  $N = \rho_{1a}^0 / \rho_2^0$  - отношение плотностей,  $k_L = v_{2L} / v_{1L}$  - отношение скоростей в конце трубопровода, после выполнения



соответствующих преобразований, получим выражение для знаменателя последнего слагаемого формулы (26) в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{J} - \tilde{p} - \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{p}} = & \left[ \tilde{M}_1^2 \left( 1 - \frac{1}{\alpha_1^* \tilde{p}_0} \right) + k_L \tilde{M}_1 \tilde{M}_2 - \frac{N}{\alpha_2^*} \tilde{M}_2^2 \right] \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} + \\ & + \frac{N \tilde{M}_2^2}{\alpha_2^*} + \frac{\tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{p}_0} - \frac{\tilde{M}_1^2}{1 - \tilde{p}_0 \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} + \tilde{p}_0}. \end{aligned} \quad (27)$$

График функции от  $\tilde{x}$  для последнего слагаемого в правой части (27) на участке от 0 до  $\tilde{L}$  представляет собой пологую кривую, которую аппроксимируем прямой из условий совпадения прямой и кривой на концах отрезка (0,  $\tilde{L}$ ). В итоге выражение (27) принимает следующий вид

$$\tilde{J} - \tilde{p} - \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{p}} = \left( k_L \tilde{M}_1 \tilde{M}_2 - \frac{N \tilde{M}_2^2}{\alpha_2^*} - \frac{\alpha_2^* \tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{p}_0} \right) \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} + \frac{N \tilde{M}_2^2}{\alpha_2^*} + \frac{\alpha_2^* \tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{p}_0}. \quad (28)$$

Подставляя (28) в выражение (26) получаем

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{J}}{d\tilde{x}} = & - \left\{ \frac{\frac{\lambda}{2} \tilde{M}_1^2}{1 - \tilde{p}_0 \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} + \tilde{p}_0} + \left( B_s \frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1} + \sin \beta \right) \tilde{g} \left( \frac{1 - \tilde{p}_0 \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} + \tilde{p}_0}{\tilde{L}} \right) + \right. \\ & \left. + \tilde{g} \sin \beta \left/ \left[ \left( k_L \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} - \frac{N}{\alpha_2^*} - \frac{\alpha_2^* \tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{M}_2^2 \tilde{p}_0} \right) \frac{\tilde{x}}{\tilde{L}} + \frac{N}{\alpha_2^*} + \frac{\alpha_2^* \tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{M}_2^2 \tilde{p}_0} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (29)$$

Умножая обе части выражения (29) на  $d\tilde{x}$  и интегрируя в левой части в пределах от  $\tilde{J}_0$  до  $\tilde{J}_L$ , а в правой части в пределах от 0 до  $\tilde{L}$ , после преобразований получаем

$$\begin{aligned} \tilde{L} = & \left[ \left( \frac{1}{\alpha_1^* \tilde{p}_0} - 1 \right) \tilde{M}_1^2 - k_L \tilde{M}_1 \tilde{M}_2 + \frac{N \tilde{M}_2^2}{\alpha_2^*} + \tilde{p}_0 - 1 \right] \left/ \left[ \frac{\lambda \tilde{M}_1^2 \ln \tilde{p}_0}{2(\tilde{p}_0 - 1)} + \frac{\tilde{g}}{2} \left( B_s \frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + \sin \beta \right) (\tilde{p}_0 + 1) + \frac{\tilde{g} \sin \beta}{k_L \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} - \frac{N}{\alpha_2^*} - \frac{\alpha_2^* \tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{M}_2^2 \tilde{p}_0}} \ln \left( \frac{k_L \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2}}{\frac{N}{\alpha_2^*} + \frac{\alpha_2^* \tilde{M}_1^2}{\alpha_1^* \tilde{M}_2^2 \tilde{p}_0}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

Выражение (30) представляет собой формулу дальности транспортирования с учетом собственного веса аэросмеси для пневмотранспортной системы с наклонным трубопроводом. От формулы дальности транспортирования для горизонтального трубопровода, формула (30) отличается наличием слагаемых, содержащих  $\sin \beta$ , где  $\beta$  угол наклона к горизонту оси трубопровода.

Как следует из формулы (30), наклонному трубопроводу с подъемом, что характеризуется положительным значением угла  $\beta$ , соответствует уменьшение, а наклонному трубопроводу со спуском ( $\beta < 0$ ) - увеличение дальности транспортирования по сравнению с горизонтальным трубопроводом при тех же значениях основных параметров пневмотранспортной системы.

После преобразований из (30) получаем первое разрешающее уравнение для наклонного трубопровода, когда учитывается собственный вес аэросмеси:

$$F_1 = \left[ \frac{\lambda L \ln \tilde{p}_0}{2D(\tilde{p}_0 - 1)} - \frac{1}{\alpha_i^* \tilde{p}_0} + 1 \right] \tilde{M}_1^2 + k_L \tilde{M}_1 \tilde{M}_2 - \tilde{p}_0 + 1 - \frac{N}{\alpha_2^*} \tilde{M}_2^2 + \frac{gL}{2RT} \times \\ \times \left( B_s \frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1} + \sin \beta \right) (\tilde{p}_0 + 1) + \frac{Lg \sin \beta}{RT \left( k_L \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} - \frac{N}{\alpha_2^*} - \frac{\alpha_2^*}{\alpha_i^*} \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{M}_2^2 \tilde{p}_0} \right)} \ln \left( \frac{k_L \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2}}{\frac{N}{\alpha_2^*} + \frac{\alpha_2^*}{\alpha_i^*} \frac{\tilde{M}_1^2}{\tilde{M}_2^2 \tilde{p}_0}} \right) = 0. \quad (31)$$

При фиксированных значениях всех параметров кроме  $\tilde{M}_1$  и  $\tilde{p}_0$  зависимость (31) представляет собой характеристику пневмотранспортной системы с наклонным трубопроводом. Уравнение (31) необходимо рассмотреть совместно с уравнением характеристики компрессора при учете подводящего воздухопровода и особенностей пневмотранспортной машины.

В эжекторных пневмотранспортных машинах происходит потеря давления в сопловом аппарате так, что избыточное давление после эжектора ( $\tilde{p}_0 - 1$ ) составляет  $n_3 = 0,05 - 0,1$  от избыточного давления, подводимого к эжектору ( $\tilde{p}_0 - 1$ ). Полное давление в начале транспортного трубопровода  $\tilde{p}$  в зависимости от давления, подводимого к эжектору пневмотранспортной машины  $\tilde{p}_0$  составит

$$\tilde{p}_0 = (\tilde{p} - 1) n_3 + 1 = n_3 \tilde{p} + (1 - n_3), \quad (32)$$

откуда давление перед пневмотранспортной машиной через давление в начале транспортного трубопровода записывается в виде

$$\tilde{p} = \frac{\tilde{p}_0 + n_3 - 1}{n_3}. \quad (33)$$

С другой стороны это давление и давление на выходе из компрессора при учете сопротивления воздухоподающего трубопровода связано с помощью следующей формулы [1]:

$$\tilde{p}^2 = \tilde{p}_{\text{кмп}}^2 - \left(\frac{D}{D_{\text{п}}}\right)^4 \tilde{M}_1^2 \frac{\lambda_{\text{п}} L_{\text{п}}}{D_{\text{п}}}, \quad (34)$$

где  $\tilde{p}_{\text{кмп}}$  – давление на выходе из компрессора,  $D$  – диаметр транспортного трубопровода;  $D_{\text{п}}$ ,  $L_{\text{п}}$  – диаметр и длина воздухоподающего трубопровода,  $\lambda_{\text{п}} = 0,02$  – коэффициент Никурадзе для воздухоподающего трубопровода. Давление на выходе из компрессора задается с помощью уравнения характеристики компрессора [1]

$$\tilde{p}_{\text{кмп}} = a(Q_1^v)^2 + bQ_1^v + c = a(k\tilde{M}_1)^2 + b k\tilde{M}_1 + c, \quad (35)$$

где  $Q_1^v = Q_{1,a}^v$  – объемный расход воздуха при атмосферном давлении, м<sup>3</sup>/мин;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты характеристики;  $k = 15\pi D^2 \sqrt{RT}$ .

Подставляя (35), (33) в выражение (34) и перенося все слагаемые в левую часть равенства, получаем второе разрешающее уравнение

$$F_2 = [a(k_L\tilde{M}_1)^2 + b k_L \tilde{M}_1 + c]^2 - \frac{(\tilde{p}_0 + n_3 - 1)^2}{n_3^2} - \left(\frac{D}{D_{\text{п}}}\right)^4 \tilde{M}_1^2 \frac{\lambda_{\text{п}} L_{\text{п}}}{D_{\text{п}}} = 0, \quad (36)$$

которое совместно с уравнением (31) составляет основу инженерного алгоритма расчета пневмотранспортной системы с эжекторной машиной и компрессором при наклонном транспортном трубопроводе.

В качестве примера рассмотрен пневмотранспортный комплекс для закладки выработанного пространства шахты, состоящий из винтового компрессора 7ВКМ-50/8 с уравнением характеристики компрессора  $\tilde{p}_{\text{кмп}} = -2,2 Q_1^v + 122,1$ , где  $Q_1^v$  – объемный расход воздуха в м<sup>3</sup>/мин, воздуховода длиной  $L_{\text{п}} = 2000$  м, диаметром  $d_{\text{п}} = 0,15$  м, вибропневмотранспортной машины непрерывного действия (ВПМН) с загрузочным устройством эжекторного типа, в слововом аппарате которого теряется 95 % избыточного давления ( $n_3 = 0,05$ ); транспортного трубопровода диаметром  $d = 0,2$  м, длиной  $l = 50$  м, проходящего с подъемом наклонно к горизонту под углом  $\beta$ . Средняя крупность транспортируемого сыпучего материала  $D = 2A = 0,06$  м, производительность установки по материалу  $Q_2^v = 20$  м<sup>3</sup>/ч, коэффициенты: Никурадзе  $\lambda = 0,01$ ; Бусройда  $B_S = 0,75$ ;  $K_L = V_{2L} / V_{1L} = 0,5$ ; температура воздуха  $T = 303^0$  К.

Результаты решения для  $\beta = 0 - 20$  град., приведенные на рис. 1, показывают, что давление в характерных сечениях воздухоподающего и транспортного трубопроводов возрастает при увеличении наклона транспортного трубопровода. Перепад давления в воздухопроводе  $\Delta\tilde{p}_1 = \tilde{p}_{\text{кмп}} - \tilde{p}_{\text{до эж.}}$ , который пропорционален квадрату скорости воздуха, уменьшается, т.к. при возрастании давления воздуха скорость его падает – поскольку массовый расход не меняется.



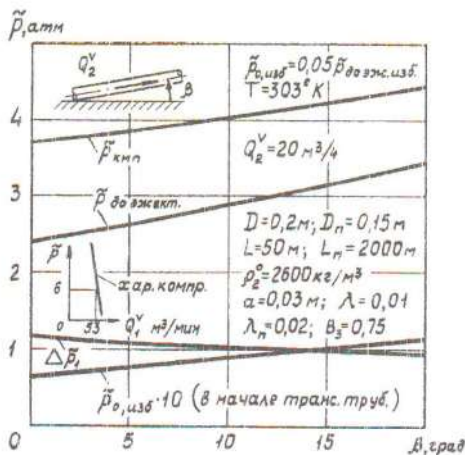


Рис. 1 – Зависимости параметров давления  $\bar{p}_{кмпн}$ ,  $\bar{p}_{до\ эжект.}$ ,  $\bar{p}_{0, атм.}$ ,  $\Delta\bar{p}_1$  от угла наклона к горизонту  $\beta$  транспортного трубопровода для системы с винтовым компрессором и эжекторной вибропневмотранспортной машиной

При увеличении угла наклона трубопровода к горизонту до  $\beta = 20^\circ$ , давление перед входом в ВПМН возрастает на  $\sim 40\%$ , а избыточное давление в начале транспортного трубопровода увеличивается в  $\sim 2$  раза, при неизменной длине последнего.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. – К.: Наукова думка, 2001. – 519 с.

УДК 622.233.3

Л.М. Хныкин, Е.А. Воробьев,  
В.В. Андреева

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БУРОВОГО СТАВА

Приведена математична модель просторової стійкості початкової ділянки бурового става, алгоритм розрахунку параметрів силового навантаження та визначення кутів повороту кінцевого перерізу бурового става. Модель може бути використана при проектуванні бурового інструменту для вибування вугілля.

### THE MATHEMATICAL MODEL OF SPATIAL STABILITY OF DRILLING ROD

The given mathematical model of spatial stability of an initial site drill rod and algorithm of calculation of power parameters loading and definition of a corner turn of final section of drilling rod. The model can be used at designing the drilling tool for drilling coal.

Бурение технологических скважин на высоту этажа в угольных пластах сопровождается высокой динамической нагруженностью бурового инструмен-