

Рис. 1 – Зависимости параметров давления $\bar{p}_{\text{кнп}}$, $\bar{p}_{\text{до эжкт.}}$, $\bar{p}_{0, \text{нзб.}}$, $\Delta \bar{p}_1$ от угла наклона к горизонту β 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 ~ 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-

та, проявляющейся в виде резких толчков и ударов его по стенкам скважины. Это приводит к разбиванию стенок скважины, изгибу и уходу става, искривлению скважины, а в условиях выбросоопасных пластов к провокации микровыбросов, прихватам и обрыву става, что представляет опасность для обслуживающего персонала.

Такое явление определяется прецессией бурового става, которая обусловлена: криволинейной формой начального участка бурового става; горно-геологическими условиями, проявляющимися в виде неоднородности забойного массива; конструктивными особенностями исполнительного органа.

Для улучшения прямолинейности буримых скважин, необходимо снизить прецессию исполнительного органа. Параметры прецессии и источник ее образования возможно выяснить, рассмотрев механизм искривления бурового става. Для этого разработана математическая модель пространственного искривления начального участка бурового става. На рис. 1 представлена схема расчета начального участка бурового става после потери статической устойчивости.

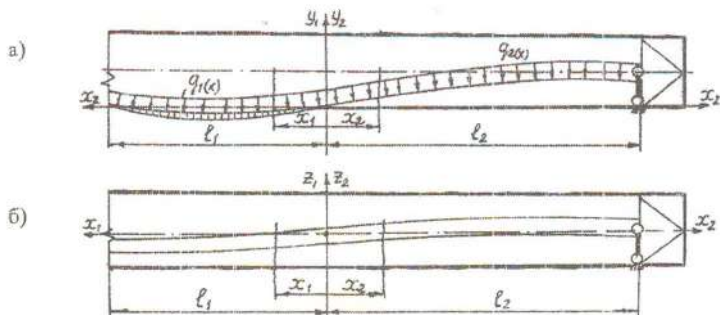


Рис. 1 — Расчетная схема бурового става в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Став представлен как кривой брус, один конец которого опирается на исполнительный орган, а второй имеет скользящее опирание по длине l_1 на упругое основание, и отстоит от исполнительного органа на расстояние l_2 . Нагружение става и действие основного участка на начальный элемент заменим реакциями связи $M(l_1)$, $Q(l_1)$, $N(l_1)$.

Связь между параметрами кривизны става, внешней нагрузкой и параметрами прецессии $y(l_2)$, $Q(l_2)$, $N(l_2)$ исполнительного органа представим в виде дифференциальных уравнений упругой линии в двух плоскостях:

- вертикальной:

$$y = \begin{cases} y_1, 0 \leq x_1 \leq l_1 \quad EJ \frac{d^4}{dx_1^4} y_1 + N \frac{d^2}{dx_1^2} y_1 + Ky_1 = q_1(x_1) & (1) \\ y_2, 0 \leq x_2 \leq l_2 \quad EJ \frac{d^4}{dx_2^4} y_2 + N \frac{d^2}{dx_2^2} y_2 = q_2(x_2) & (2) \end{cases}$$

- горизонтальной:

$$z = \begin{cases} z_1, 0 \leq x_1 \leq l_1, EJ \frac{d^4}{dx_1^4} z_1 + N \frac{d^2}{dx_1^2} z_1 + Kz_1 = 0 & (3) \\ z_2, 0 \leq x_2 \leq l_2, EJ \frac{d^4}{dx_2^4} z_2 + N \frac{d^2}{dx_2^2} z_2 = 0. & (4) \end{cases}$$

где EJ – жесткость става; N – осевое усилие; K – коэффициент упругого опирания;

$$q_{1(x_1)} = q_0 \cdot \left(1 + \frac{\omega^2 y_0}{g} \right); \quad q_{2(x_2)} = q_0 \cdot \left(1 + \frac{\omega^2 y_0}{g} \cdot \cos\left(\frac{\pi x_2}{l_2}\right) \right)$$

- интенсивность распределенной нагрузки по длине става, кН/м; ω – угловая частота вращения, c^{-1} ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Решение уравнения (1) представим в виде:

$$y_1 = e^{a \cdot x_1} (C_2 \cos(bx_2) + C_2 \sin(bx_2)) + e^{-a \cdot x_1} (C_3 \cos(bx_2) + C_4 \sin(bx_2)) + \frac{q_0}{K} \left(1 + \frac{\omega^2 y_0}{g} \right), \quad (5)$$

где a и b – действительная и мнимая части комплексного корня характеристического уравнения

$$t^4 + \frac{N}{EJ} t^2 + \frac{K}{EJ} = 0,$$

$$a = \sqrt{\frac{K}{EJ}} \cdot \cos\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\arccos\left(-\frac{N}{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot J}}\right) \right)\right]; \quad b = \sqrt{\frac{K}{EJ}} \cdot \cos\left[\frac{1}{2} \cdot \left(\arcsin\left(-\frac{N}{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot J}}\right) \right)\right].$$

Решение уравнения (2) представим в виде решения однородного уравнения

$$y_2^0 = D_1 \cdot \cos(k \cdot x_2) + D_2 \cdot \sin(k \cdot x_2) + D_3 \cdot x_2 + D_4 \quad (6)$$

и частного решения уравнения, которое в соответствии с правилом Коши [1] выражается интегралом

$$y_2 = -c^2 \int_0^{x_2} y_2^0(x_2 - \xi) \cdot q_{\xi} \cdot d\xi,$$

где $\kappa = \sqrt{\frac{N}{EJ}}$, $C^2 = (EJ)^{-1}$, $y_2^0(x_2 - \xi)$ – функция от аргумента $(x_2 - \xi)$ полученная из (6) при условии что в ней произвольные постоянные при $y_2^0(0) = 0, y_2^0(0) = 0, y_2^0(0) = 0, y_2^0(0) = 1$ равны:

$$\begin{aligned} y_2^0(0) = \overline{D}_1 + \overline{D}_4 = 0 \rightarrow \overline{D}_1 = -\overline{D}_4; y_2^0(0) = \kappa^2 \overline{D}_2 + \overline{D}_3 = 0 \rightarrow \kappa \overline{D}_2 = -\overline{D}_3; y_2^0(0) = -\kappa^2 \overline{D}_1 = 0 \rightarrow \overline{D}_1 = 0; \\ y_2^0(0) = -\kappa^3 \overline{D}_1 = 1 \rightarrow \overline{D}_1 = -1/\kappa^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда с учетом значений приведенных констант имеем: $y_2^0 = \frac{\kappa x_2 - \sin \kappa x_2}{\kappa^3}$.

Заменяя x_2 на $(x_2 - \xi)$ и внося в $y_2^0 = \frac{\kappa x_2 - \sin(\kappa \cdot x_2)}{\kappa^3}$ получим:

$$y_2^* = -\frac{c^2}{k^2} \int_0^{x_2} q_2(\xi) \cdot (x_2 - \xi) d\xi + \frac{c^2}{k^3} \int_0^{x_2} q_2(\xi) \cdot (x_2 - \xi) \cdot \sin[\kappa \cdot (x_2 - \xi)] d\xi. \quad (8)$$

После подстановки $q_\xi = q_1 \cdot \left(1 + \frac{\omega^2 \cdot y_0}{g} \cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2}\right)\right)$ в (8) получим:

$$\begin{aligned} y_2^* = \frac{q_0 \cdot c^2}{k^2} \cdot \left[\int_0^{x_2} (x_2 - \xi) d\xi + \frac{\omega^2 \cdot y_0}{g} \cdot \int_0^{x_2} \cos\left(\frac{\pi \cdot \xi}{2 \cdot l_2}\right) \cdot (x_2 - \xi) d\xi \right] + \frac{q_0 \cdot c^2}{k^2} \cdot \\ \times \left[\int_0^{x_2} \sin(x_2 - \xi) d\xi + \frac{\omega^2 \cdot y_0}{g} \cdot \int_0^{x_2} \cos\left(\frac{\pi \cdot \xi}{2 \cdot l_2}\right) \cdot \sin(x_2 - \xi) d\xi \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Производя отдельно интегрирование каждого слагаемого в скобках после преобразования выражение (9) сводится к виду:

$$y_2^* = \frac{q \cdot c^2}{k^2} \cdot \left[0.5 \cdot (x_2)^2 - \frac{4l_2^2 \cdot \omega^2 \cdot y_0}{\pi^2 \cdot g} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2}\right) - 1 \right) + \frac{4\omega^2 \cdot y_0 l_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2} - 1\right)}{[4k^2 \cdot l_2^2 - \pi^2] \cdot g} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, в соответствии с решениями (5), (6) и (9) уравнение изогнутой оси в вертикальной плоскости имеет вид:

$$y_1 = e^{-a \cdot x_1} \cdot (C_1 \cdot \cos(b \cdot x_1) + C_2 \cdot \sin(b \cdot x_1)) + e^{-a \cdot x_1} \cdot (C_3 \cdot \cos(b \cdot x_1) + C_4 \cdot \sin(b \cdot x_1)) + \frac{q_0}{K} \left(1 + \frac{\omega^2 \cdot y_0}{g} \right), \quad (11)$$

$$y_2 = D_1 \cdot \cos(k \cdot x_2) + D_2 \cdot \sin(k \cdot x_2) + D_3 \cdot x_2 + D_4 - \frac{q \cdot c^2}{k^2} \times \left[0.5 \cdot (x_2)^2 - \frac{4(l_2)^2 \cdot \omega^2 \cdot y_0}{\pi^2 \cdot g} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2}\right) - 1 \right) + \frac{4\omega^2 \cdot y_0 l_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2} - 1\right)}{\left[4k^2 \cdot (l_2)^2 - \pi^2\right] \cdot g} \right]. \quad (12)$$

Обозначим:

$$F_1 = \frac{q_1}{K} \left(1 + \frac{\omega^2 \cdot y_0}{g} \right), \quad (13)$$

$$F_2 = \frac{q \cdot c^2}{k^2} \cdot \left[0.5 \cdot (x_2)^2 - \frac{4(l_2)^2 \cdot \omega^2 \cdot y_0}{\pi^2 \cdot g} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2}\right) - 1 \right) + \frac{4\omega^2 \cdot y_0 l_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x_2}{2l_2} - 1\right)}{\left[4k^2 \cdot (l_2)^2 - \pi^2\right] \cdot g} \right]. \quad (14)$$

В горизонтальной плоскости искривление начального участка бурового става в соответствии с уравнениями (3) и (4) имеет вид:

$$z_1 = e^a \cdot (C_5 \cdot \cos(b \cdot x_1) + C_6 \cdot \sin(b \cdot x_1)) + e^{-a \cdot x_1} \cdot (C_7 \cdot \cos(b \cdot x_1) + C_8 \cdot \sin(b \cdot x_1)), \quad (15)$$

$$z_2 = D_5 \cdot \cos(k \cdot x_2) + D_6 \cdot \sin(k \cdot x_2) + D_3 \cdot x_2 + D_8. \quad (16)$$

Для определения постоянных интегрирования $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8$ а также длин участков l_1 и l_2 , используем граничные условия участков в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рис. 1 а, б):

$$y_1(l_1) = 0, y_1(0) = 0, y_2(0) = 0, y_1'(0) = y_2'(0), y_1''(0) = y_2''(0), y_1'''(0) = y_2'''(0), y(l_2) = y_6, y(l_2) = 0, y_1'(l_1) = y_2'(0), y_1''(l_1) = y_1''(0), z_1(l_1) = 0, z_2(0) = 0, z_2'(0) = 0, z_1''(0) = z_2''(0), z_1'''(0) = z_2'''(0), z(l_2) = z_0, z(l_2) = 0, z_1'(l_1) = z_2'(0) \quad (17)$$

Подставим решения (15), (16) и (19), (20) в граничные условия и после преобразований получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
y_1(l) &= 0 & e^{\mu l} \cdot ((C_1 \cdot \cos(b \cdot l) + C_2 \cdot \sin(b \cdot l))) + e^{-\mu l} \cdot (C_3 \cdot \cos(b \cdot l) + C_4 \cdot \sin(b \cdot l)) + F_2 &= 0 \\
y_1(0) &= 0 & C_1 + C_3 + F_1 &= 0 \\
y_2(0) &= 0 & D_1 &= -D_4 \\
y_1'(0) &= y_2'(0) & k \cdot D_2 + D_3 &= 2 \cdot a \cdot C_1 + b(C_2 + C_4) + F_2 \\
y_1''(0) &= y_2''(0) & -k^2 \cdot D_1 &= (a^2 - b^2) \cdot (C_1 + C_3) + 2 \cdot a \cdot b \cdot (C_2 + C_4) + F_2'' \\
y_2''(0) &= y_2''(0) & -k^2 \cdot D_2 &= (a^2 - 3 \cdot a \cdot b^2) \cdot (C_1 + C_3) + b \cdot (3 \cdot a^2 \cdot b - b^3) \cdot (C_2 + C_4) + F_2''' \\
y(l_2) &= y_0 & D_3 \cdot \cos(k \cdot l_2) + D_4 \cdot \sin(k \cdot l_2) + D_1 \cdot L_2 + D_4 + F_2 &= 0 \\
y'(l_2) &= 0 & -k^2 D_3 \cdot \cos(k \cdot l_2) - k^2 \cdot D_4 \cdot \sin(k \cdot l_2) &= 0 \\
y_1'(l_2) &= y_2'(0) & a \cdot e^{\mu l_2} \cdot ((C_1 \cdot \cos(b \cdot l_2) + C_2 \cdot \sin(b \cdot l_2))) + e^{-\mu l_2} \cdot (C_3 \cdot \cos(b \cdot l_2) + C_4 \cdot \sin(b \cdot l_2)) - b \times \\
& & \times e^{\mu l_2} \cdot ((C_1 \cdot \sin(b \cdot l_2) + C_2 \cdot \cos(b \cdot l_2))) + e^{-\mu l_2} \cdot (C_3 \cdot \sin(b \cdot l_2) + C_4 \cdot \cos(b \cdot l_2)) = a \cdot (C_1 - C_3) + \\
& & + b \cdot (C_2 + C_4) \\
y_1''(l_2) &= y_1''(0) & (a^2 - b^2) \cdot e^{\mu l_2} \cdot ((C_1 \cdot \cos(b \cdot l_2) + C_2 \cdot \sin(b \cdot l_2))) - 2 \cdot b \cdot e^{\mu l_2} \cdot C_2 \cdot \sin(b \cdot l_2) - C_2 \cdot \cos(b \cdot l_2) + \\
& & + (a^2 - b^2) \cdot (C_3 \cdot \cos(b \cdot l_2) + C_4 \cdot \sin(b \cdot l_2)) + 2 \cdot a \cdot b \cdot e^{\mu l_2} \cdot (C_3 \cdot \sin(b \cdot l_2) - C_4 \cdot \cos(b \cdot l_2)) = \\
& & = (a^2 - b^2) \cdot (C_1 + C_3) + 2 \cdot a \cdot b \cdot (C_2 + C_4) \\
z_1(l) &= 0 & e^{\mu l} \cdot ((C_5 \cdot \cos(b \cdot l) + C_6 \cdot \sin(b \cdot l))) + e^{-\mu l} \cdot (C_7 \cdot \cos(b \cdot l) + C_8 \cdot \sin(b \cdot l)) + F_2 &= 0 \\
z_1(0) &= 0 & C_5 + C_7 &= 0 \\
z_2(0) &= 0 & D_5 &= -D_8 \\
z_1'(0) &= z_2'(0) & -k \cdot D_6 + D_7 &= a \cdot (C_5 - C_7) + b \cdot (C_6 + C_8) \\
z_2''(0) &= z_2''(0) & -k^2 \cdot D_5 &= 2 \cdot a \cdot b \cdot (C_6 - C_8) \\
z(l_2) &= z_0 & D_5 \cdot \cos(k \cdot l_2) + D_8 \cdot \sin(k \cdot l_2) + D_1 \cdot L_2 + D_4 &= 0 \\
z'(l_2) &= 0 & -k^2 D_5 \cdot \cos(k \cdot l_2) - k^2 \cdot D_8 \cdot \sin(k \cdot l_2) &= 0 \\
z_1'(l_2) &= z_1'(0) & e^{\mu l_2} \cdot ((C_5 \cdot \cos(b \cdot l_2) + C_6 \cdot \sin(b \cdot l_2))) - a \cdot e^{\mu l_2} \cdot C_6 \cdot \cos(b \cdot l_2) - C_6 \cdot \sin(b \cdot l_2) - \\
& & - b \cdot e^{\mu l_2} \cdot (C_5 \cdot \sin(b \cdot l_2) - C_6 \cdot \cos(b \cdot l_2)) - b \cdot e^{-\mu l_2} \cdot (C_7 \cdot \sin(b \cdot l_2) - C_8 \cdot \cos(b \cdot l_2)) = \\
& & = a \cdot (C_5 - C_7) + b \cdot (C_6 + C_8)
\end{aligned} \tag{18}$$

Для нахождения констант $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8$ из системы алгебраических уравнений (18) используем пакет программ MathCAD. Найденные значения констант подставляем в уравнение прогибов (11), (12) и (15), (16), и находим форму изгиба бурового става на длине начального участка.

Последовательным дифференцированием выражений (11), (12) и (15), (16) получим выражения поперечных сечений бурового става:

$$\theta_{y1} = \frac{d}{dx_1} y_1, \theta_{z1} = \frac{d}{dx_1} z_1, \theta_{y2} = \frac{d}{dx_2} y_2, \theta_{z2} = \frac{d}{dx_2} z_2, \tag{19}$$

изгибающих моментов:

$$M_{(y1)} = EJ \cdot \frac{d^2}{dx_1^2} y_1, M_{(z1)} = EJ \cdot \frac{d^2}{dx_1^2} z_1, M_{(y2)} = EJ \cdot \frac{d^2}{dx_2^2} y_2, M_{(z2)} = EJ \cdot \frac{d^2}{dx_2^2} z_2, \tag{20}$$

и поперечных сил:

$$Q_{(y1)} = EJ \cdot \frac{d^3}{dx_1^3} y_1, Q_{(z1)} = EJ \cdot \frac{d^3}{dx_1^3} z_1, Q_{(y2)} = EJ \cdot \frac{d^3}{dx_2^3} y_1, Q_{(z2)} = EJ \cdot \frac{d^3}{dx_2^3} z_2 \quad (21)$$

по длине начального участка бурового става.

С учетом исходных данных $\alpha=0,95$, $\epsilon=0,97$, $EJ=653 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$, $y_0=0,2 \text{ м}$, $N=60 \text{ кН}$, $q_0=0,56 \text{ кН/м}$, $f=0,4$, $\omega=10,5 \text{ с}^{-1}$, $q=9,81 \text{ м/с}^2$ по выражениям (19), (20), (21) с помощью ЭВМ рассчитаны графики прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил по длине начального участка бурового става (рис. 2) на участке 1 (см. рис. 1).

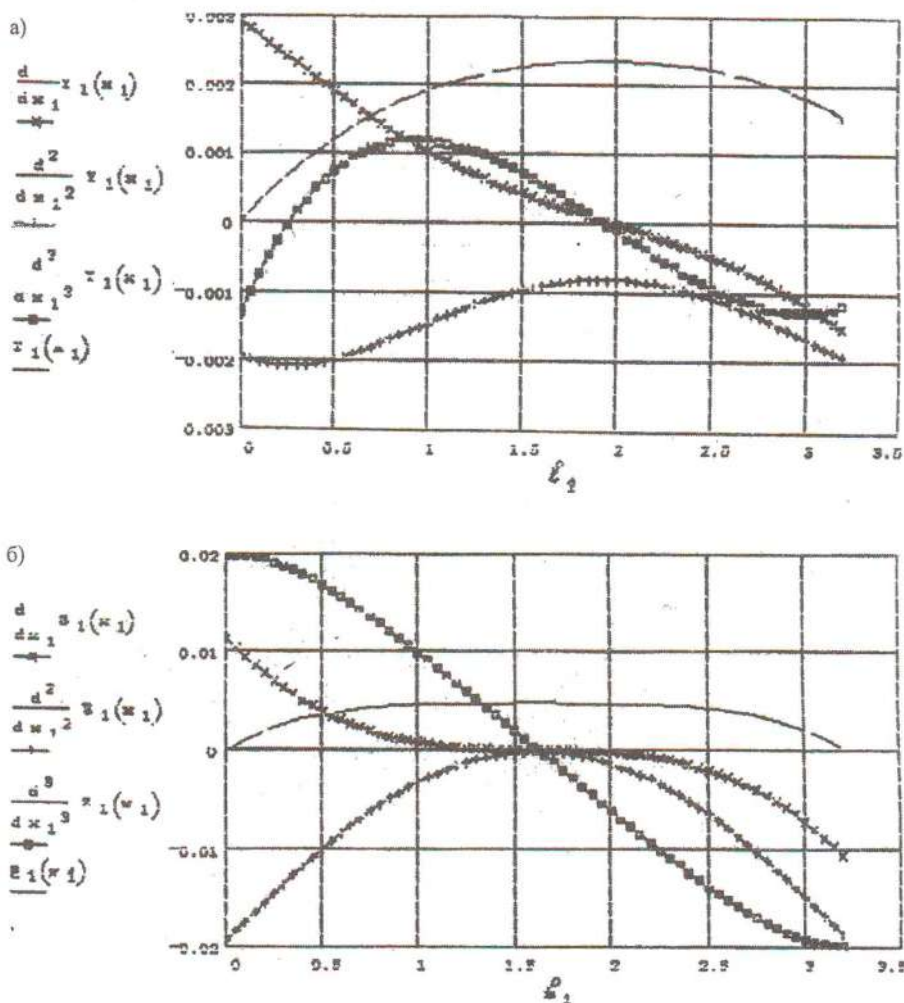


Рис. 2 – Графики прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Приведенная модель использована при разработке бурового инструмента, конструкция которого обеспечивает автоматическое выравнивание нагрузок на резцах и снижение неравномерности его загрузки [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филоненко-Бородач М.М., Изюмов С.М. и др. Курс сопротивления материалов. – М., 1956. Часть II. – 643 с.
2. Москалев А.Н., Хныкин Л.М., Шмаков Б.М., Васильченко В.Ф. Исполнительные буровые органы с демпфирующими элементами // Уголь Украины. – 1994. - №1. - С. 22-23.

УДК 622.271

З.Р. Маланчук

УТОЧНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РАСЧЕТА РАЗДАТОЧНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ СКВАЖИННОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В статті наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень з уточнення розрахункових залежностей для роздаткових трубопроводів систем свердловинного гідравлічного видобування корисних копалин.

SPECIFICATION OF THEORETICAL DEPENDENCES OF ACCOUNT OF PIPELINES OF DISTRIBUTION OF SYSTEMS DOWNHOLE HYDRAULIC MININGS OF MINERAL RESOURCES

In clause the results theoretical and experimental researches on specification of design dependences for pipelines of distribution of systems downhole hydraulic minings of mineral resources are given.

При проектировании раздаточных трубопроводов в системах скважинной гидравлической добычи ставится условие, чтобы отсоединяемый расход в начальном сечении трубопровода не отличался от расхода в конечном сечении, что обеспечивает равномерное распределение жидкости и нормальную работу гидромониторов и гидротранспорта. Такие же требования предъявляются и к напору, который должен быть в пределах

$$0,9H_1 \leq H_x \leq 1,1H_1, \quad (1)$$

где H - пьезометрический напор в произвольном сечении трубопровода.

Зависимость для определения потерь пьезометрического напора по длине раздаточного перфорированного трубопровода при $X=L$, где L -длина перфорированного трубопровода и $Q=Q_{тр}$, $Q_x=Q_n$ запишется в виде

$$h_p = H_1 - H_p + i L, \quad (2)$$

где h_p - потери пьезометрического напора по длине перфорированной трубы; $H_1 = \frac{P_1}{\gamma}$ - напор в начальном сечении перфорированного трубопровода; $H_p = \frac{P_x}{\gamma}$ - напор в произвольном сечении перфорированной трубы.