

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ БАГАТООПОРНОЇ КОМПОНОВКИ З ГІДРОНАВАНТАЖУВАЧЕМ

¹В.М.Мойсишин, ¹Р.С.Яремійчук, ¹І.М.Гураль, ²Я.С.Яремійчук

¹ ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
тел. (03422) 42123, e-mail: public@ifdtung.if.ua

² ДК "Укргазвидобування", 04053, м. Київ, вул. Кудрявська, 26/28,
тел. (044) 2123174, e-mail: ugvmail@ugr.viaduk.net

С целью обоснования новых энергоаккумулирующих компоновок низа буровой колонны (КНБК) для вращательного бурения скважин предложена математическая модель расчёта поперечных колебаний многоопорных компоновок с полно- и неполно-размерными опорно-центрирующими элементами и гидравлическими усилителями нагрузки на долото.

To prove the validity of a new energy accumulating Bottom Part of Drilling String (BPDS) used in the rotary drilling there has been developed the mathematical model of transversal oscillations in multi-bearing assemblies with completely and incompletely dimensional centering elements and hydraulics amplifiers of weight on bit.

Шляхи вирішення проблеми забезпечення України вуглеводневою сировиною власного виробництва передбачають відкриття нових нафтогазових територій та освоєння технологій глибокого і горизонтального буріння свердловин. Тому особливої ваги набирають питання проектування нових компоновок бурової колони, вивчення їх кінетики під дією прикладених сил і моментів.

Серед таких нових компоновок до найбільш перспективних, на нашу думку, слід віднести конструкції з опорно-центруючими елементами (ОЦЕ) і гідронавантажувачами. Ці компоновки виконують одночасно функцію амортизатора поперечних коливань за рахунок включення до свого складу центраторів та функцію стабільної передачі осьового навантаження на долото за рахунок пристроїв гідравлічної дії. Крім цього, використання в компоновках низу бурової колони (КНБК) останніх дає змогу захистити надпристрійну частину колони від підвищених віброударних навантажень, генерованих породоруйнівним інструментом, акумулювати енергію коливань у привибійній зоні і за рахунок цього підвищити [1] механічну швидкість буріння на 15%, скоротити кількість полومок труб на 40-50 %.

Роботу присвячено моделюванню поперечних коливань компоновки з центраторами і гідронавантажувачем, оскільки найімовірнішою причиною полумок КНБК є знакозмінні поперечні коливання навантаження [2].

Розрахункова схема наведена на рис. 1. Вона включає стіл ротора, квадрат і рухомі частини талевої системи 1, які в сукупності змодельовано масою m_0 і осьовим моментом інерції I_0 , секції бурових 2 і обважнених бурових 3, 5, 7, 9, 11 труб, опорно-центруючі елементи 4, 6, 10 і гідронавантажувач 8. До верхнього кінця компоновки прикладені розтягуюча сила $P_0 = F_1^c(0)$, крутний момент $M_0 = M_1^e(0)$, що визначаються як розв'язки відповідно статичної задачі при вивченні поздовжніх коливань ком-

поновки та задачі про переносний рух при вивченні її крутильних коливань [3,4]. До долота прикладені статична P_l і динамічна F_l^d складові осьової сили, відносний M_l^c і переносний M_l^r крутні моменти.

Умови закріплення стола ротора і долота змодельовано в'язкопружними елементами з жорсткостями $k_0^{yz}, k_1^{yz}, k_0^\psi, k_1^\psi$ і коефіцієнтами демпфування $\alpha_0^{yz}, \alpha_1^{yz}, \alpha_0^\psi, \alpha_1^\psi$. Індекс yz відповідає за всличини, пов'язані зі зміщенням у площині, перпендикулярній до осі свердловини, а індекс ψ – за величини, пов'язані з кутом згину.

Ввівши комплексний прогин $w_k(x,t) = y_k(x,t) + iz_k(x,t)$, диференціальні рівняння малих поперечних коливань пружної лінії труб k -тої секції при роторному бурінні подано у такому вигляді:

$$I_k E_k \frac{\partial^4 w_k(x,t)}{\partial x^4} - i \frac{\partial}{\partial x} \left[M_k^e(x) \frac{\partial^2 w_k(x,t)}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[F_k^c(x) \frac{\partial w_k}{\partial x} \right] + h_k^p \left[\frac{\partial w_k(x,t)}{\partial x} - i \omega_0 w_k(x,t) \right] + \frac{q_k^0}{g} \left[\frac{\partial^2 w_k(x,t)}{\partial t^2} - 2i \omega_0 \frac{\partial w_k(x,t)}{\partial t} - \omega_0^2 w_k(x,t) \right] = 0;$$

$$k = \overline{1, l},$$

де: $y_k(x,t), z_k(x,t)$ – проекції прогину осі колони на дві взаємно перпендикулярні осі Oy та Oz як функції координати x пружної лінії і часу t ;

$F_k^c(x), M_k^e(x)$ – статична складова осьової сили та крутний момент переносного, викликаного рівномірним обертанням з кутовою швидкістю ω_0 , руху бурової колони;

I_k, h_k^0, E_k, q_k^0 – осьовий момент інерції поперечного перерізу, коефіцієнт в'язкого тертя при обертанні труб у промивальній рідині, модуль пружності матеріалу та вага погонного метра труб k -ої секції у повітрі;

i – уявна одиниця.

В загальному вигляді граничні умови для x -перерізу довільної секції труб такі:

$$f_{i1} w(x,t) + f_{i2} \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} + f_{i3} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + f_{i4} \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} = b_i, \quad i = \overline{1,4}, \quad (2)$$

де $f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}, b_i$ – постійні або змінні в часі коефіцієнти.

Конкретизуємо умови (2) для фіксованих перерізів l – розмірної бурильної колони:

для верхнього перерізу

$$x = 0$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 E_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} - \frac{i}{2} M_0 \frac{\partial w_1}{\partial x} - k_0^\psi \frac{\partial w_1}{\partial x} - \alpha_0^\psi \frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial t} = -I_0 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial t}, \\ I_1 E_1 \frac{\partial^3 w_1}{\partial x^3} + \frac{i}{2} M_0 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + P_0 \frac{\partial w_1}{\partial x} + k_0^{yz} w_1 - \alpha_0^{yz} \frac{\partial w_1}{\partial t} = m_0 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2}; \end{aligned} \right\} (3)$$

у місцях з'єднання секцій труб різних типорозмірів прирівнюємо прогини, кути згину, згинальні моменти і поперечні сили

$$x = L_k$$

$$\left. \begin{aligned} w_k = w_{k+1}, \quad \frac{\partial w_k}{\partial x} = \frac{\partial w_{k+1}}{\partial x}, \\ I_k E_k \frac{\partial^2 w_k}{\partial x^2} = I_{k+1} E_{k+1} \frac{\partial^2 w_{k+1}}{\partial x^2}, \\ I_k E_k \frac{\partial^3 w_k}{\partial x^3} = I_{k+1} E_{k+1} \frac{\partial^3 w_{k+1}}{\partial x^3}; \end{aligned} \right\} (4)$$

при з'єднанні секцій труб через повнорозмірні ОЦЕ зафіксуємо рівність поперечних зміщень нулю, а кутів згину, згинальних моментів (або поперечних сил) між собою

$$x = L_n$$

$$\left. \begin{aligned} w_n = 0, w_{n+1} = 0, \quad \frac{\partial w_n}{\partial x} = \frac{\partial w_{n+1}}{\partial x}, \\ I_n E_n \frac{\partial^2 w_n}{\partial x^2} = I_{n+1} E_{n+1} \frac{\partial^2 w_{n+1}}{\partial x^2}, \\ \left(\text{або } I_n E_n \frac{\partial^3 w_n}{\partial x^3} = I_{n+1} E_{n+1} \frac{\partial^3 w_{n+1}}{\partial x^3} \right) \end{aligned} \right\} (5)$$

Для неповнорозмірних ОЦЕ дві перші з умов (5) слід переписати у вигляді $w_n = r_1, w_{n+1} = r_1$, де $r_1 = 0,5(D_c - D_y)$ – зазор, D_c – діаметр свердловини, D_y – зовнішній діаметр центратора. В роботі [5] пропонується включити до складу КНБК три ексцентричних ОЦЕ. Контактні поверхні нижчих елементів зміщені відносно вищих на кут 120° . Граничні умови у цьому випадку можна подати таким чином:

$$x = L_n \quad y_{n-1} = y_n = \delta \cos 240^\circ = -\frac{\delta}{2},$$

$$z_{n-1} = z_n = \delta \sin 240^\circ = -\delta \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$x = L_{n+1} \quad y_n = y_{n+1} = \delta \cos 120^\circ = -\frac{\delta}{2},$$

$$z_n = z_{n+1} = \delta \sin 120^\circ = \delta \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$x = L_{l-1} \quad y_{l-1} = y_l = \delta \cos 0^\circ = \delta,$$

$$z_{l-1} = z_l = \delta \sin 0^\circ = 0,$$

де δ – відхилення пружної лінії бурильної колони від осі свердловини, викликане включенням в компоновку ексцентричного ОЦЕ

$$\left(\delta = |w_k| = \sqrt{y_k^2 + z_k^2}; k = n-1, n, n+1, l-1, l \right).$$

При з'єднанні секцій труб через гідронавантажувач скористаємося граничними умовами (4) при $x = L_m$. Зрозуміло, що для поздовжніх коливань граничні умови при $x = L_k$ та $x = L_m$, які використовуємо при знаходженні статичної і динамічної складових осьової сили, будуть суттєво відрізнятися.

Гідронавантажувач працює як гідравлічний поршень, створюючи при правильному його розміщенні в компоновці осьові сили вгору і вниз за рахунок перепаду тиску у промивальних насадках та інших компонентах гідравлічного пристрою. Включення до КНБК кількох таких пристроїв дає змогу відчутно вкоротити секцію об'єднаних бурильних труб або взагалі від неї відмовитись.

Трипараметрична феноменологічна модель гідронавантажувача наведена на рис. 2. Вона характеризується параметрами $k'_m, \alpha'_m, \alpha_m$ і складена з одиначної пружнов'язкої моделі (з паралельним з'єднанням пружного і в'язкого реологічних тіл), з'єднаної послідовно з в'язким тілом, що в сукупності являє собою стандартну в'язку рідину. При розв'язуванні задачі статички граничні умови матимуть такий вигляд:

$$x = L_m \quad u_m^c = u_{m+1}^c, \\ A_m E_m \frac{\partial u_m^c}{\partial x} = A_{m+1} E_{m+1} \frac{\partial u_{m+1}^c}{\partial x} + \Delta P,$$

де: u_m^c, u_{m+1}^c – статичні складові поздовжніх зміщень m -ої та $(m+1)$ -ої секцій;

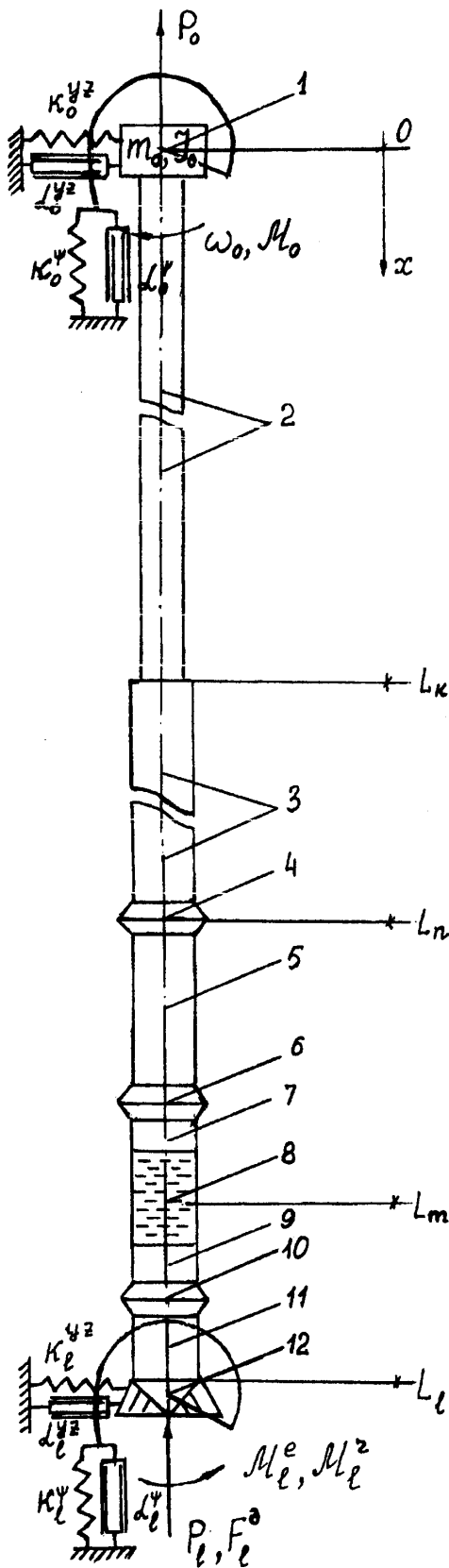


Рисунок 1 — Розрахункова схема для вивчення поперечних коливань бурильної колони

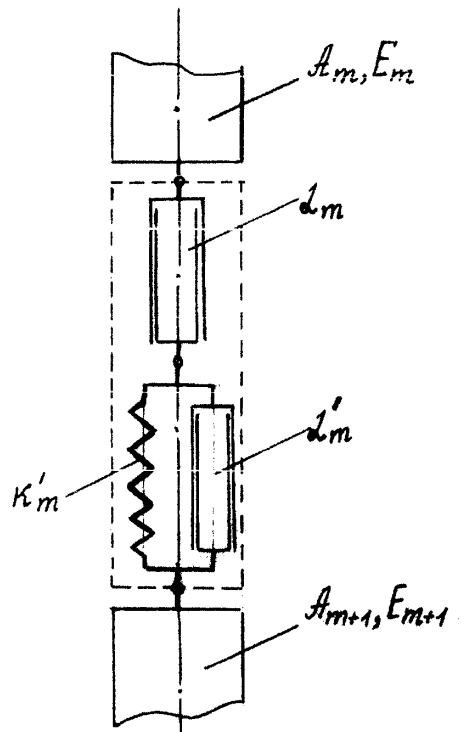


Рисунок 2 — Гідронавантажувач з феноменологічною моделлю в'язкої рідини

Таблиця 1

Коефіцієнт динамічності k_d	Амплітуди крутильного моменту M_* (Н/м) при амплітуді поздовжніх коливань a_0 (м)				
	$a_0 = 10^{-3}$	$a_0 = 2 \cdot 10^{-3}$	$a_0 = 5 \cdot 10^{-3}$	$a_0 = 10 \cdot 10^{-3}$	$a_0 = 15 \cdot 10^{-3}$
0,2	6	12	30	60	90
0,5	15	30	75	150	225

A_m, A_{m+1} – площі поперечних перерізів труб;

ΔP – приріст осьової сили у перерізі $x = L_m$ за рахунок роботи гідронавантажувача.

Для динаміки (поздовжні коливання) граничні умови такі:

$$x = L_m$$

$$\left. \begin{aligned} & \alpha_m \left(\frac{\partial u_m^\partial}{\partial t} - \frac{\partial u_{m+1}^\partial}{\partial t} \right) + k'_m e^{-\frac{k'_m t}{\alpha_m}} \times \\ & \times \int \left(\frac{\partial u_m^\partial}{\partial t} - \frac{\partial u_{m+1}^\partial}{\partial t} \right) e^{-\frac{k'_m t}{\alpha_m}} dt = A_m F_m \frac{\partial u_m^\partial}{\partial t} \\ & A_m E_m \frac{\partial u_m^\partial}{\partial t} = A_{m+1} E_{m+1} \frac{\partial u_{m+1}^\partial}{\partial t} \end{aligned} \right\}$$

де $\partial u_m^\partial, \partial u_{m+1}^\partial$ – динамічні складові зміщень m -ої та $(m+1)$ -ої секцій труб.

При формуванні граничних умов на долоті ($x = L_l$) слід враховувати динамічну складову осьової сили і відносний момент. Для випадку “грунтових” коливань подамо їх у вигляді

$$F_l^\partial(L_l, t) = -iP_* e^{i(pt+\chi)},$$

$$M_l^\partial(L_l, t) = -iM_* e^{i(pt+\chi)},$$

де: P_*, M_* – амплітуди осьової сили і крутильного моменту;

p, χ – частота і зсув фаз “грунтової” гармоніки.

Амплітуду P_* знаходимо із співвідношень

$$P_* = \frac{a_0}{Re \left[tg(\beta_l L_l + \tilde{b}_l) / (A_l E_l \beta_l) \right]},$$

$$\beta_l^2 = \frac{P^2 q_l^0 - ip h_l}{A_l E_l},$$

в яких a_0 – амплітуда зміщення на “грунтової” гармоніці; A_l, q_l^0, h_l – площа поперечного перерізу, вага погонного метра та коефіцієнт зовнішнього в'язкого тертя труб l -ої секції, \tilde{b}_l – комплексна стала, яку визначаємо за рекурентними формулами з граничних умов динамічної задачі при моделюванні поздовжніх коливань компоновки [3].

Умовно розгортаючи на площину лінію поверхні вибою (з горбами і впадинами) з циліндричною поверхнею стінок свердловини, одержимо деяку криву з числом впадин рівним (рідше кратним) кількості шарошок. Апроксимуючи її в першому наближенні синусоїдою, після елементарних перетворень одержимо [6]

$$M_* = 1,5 a_0 k_d P_*,$$

де k_d – коефіцієнт динамічності компоновки при поздовжніх коливаннях на “грунтової” гармоніці [3].

Дані табл. 1 для тришарошкового долота діаметром 215,9 мм при $P_* = 200$ кН свідчать, що внесок крутильних коливань в енергетичний баланс невеликий. Але будь-яка зміна усталеного режиму буріння веде до порушення стійкості коливань і, як результат, до відскоків та інших форм руху або вирівнювання поверхні вибою (в цьому випадку визначальними стають зубкові коливання, амплітуди яких на порядок менші).

Користуючись варіаційною постановкою задачі [3], натуральні граничні умови на долоті подамо таким чином:

$$x = L_l$$

$$\left. \begin{aligned} & I_l E_l \frac{\partial^2 w_l}{\partial x^2} - \frac{i}{2} (M_l - i M_* e^{i(pt+\chi)}) \frac{\partial w_l}{\partial x} - \\ & - k_l^\psi \frac{\partial w_l}{\partial x} - \alpha_l^\psi \frac{\partial^2 w_l}{\partial x \partial t} = 0, \\ & I_l E_l \frac{\partial^3 w_l}{\partial x^3} - \frac{i}{2} (M_l - i M_* e^{i(pt+\chi)}) \frac{\partial^2 w_l}{\partial x^2} + \\ & + (P_l + p_0 s_0 - i P_* e^{i(pt+\chi)}) \frac{\partial w_l}{\partial x} + \\ & + k_l^{yz} w_l + \alpha_l^{yz} \frac{\partial^2 w_l}{\partial t} = 0, \end{aligned} \right\} (6)$$

де: p_0 – питома втрата тиску на долоті,

S_0 – площа вихідних отворів породоруйнівого інструменту.

Розв'язок диференціальних рівнянь (1) для випадку усталених поперечних коливань буде мати вигляд

$$w_k(\xi, t) = w_k(\xi e^{i(pt+\chi)}) = (a_{k0} + a_{k1} \xi + a_{k2} \xi^2 + \dots + a_{kn} \xi^n + \dots) \cdot e^{i(pt+\chi)}, \quad (7)$$

де $\xi = x / L_l$ – безрозмірна змінна.

Перші чотири комплексних коефіцієнти $a_{k0}, a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}$ степеневих рядів $w_k(\xi)$ знайдемо з граничних умов (3)-(6), а всі наступні $a_{ki} (i=4,5,6...)$ виразимо через них за рекурентними формулами.

Подаючи складову $M_k^e(x)$ крутного моменту співвідношенням

$$M_k^e(x) = -h_k^\varphi \omega_0 x - C_k^\varphi J_k G_k,$$

в якому C_k^φ – коефіцієнт, що визначається з граничних умов задачі про переносний обертальний рух компоновки; J_k – полярний момент інерції поперечного перерізу; G_k – модуль зсуву труб k -ої секції, та ввівши позначення

$$\left. \begin{aligned} \alpha_k &= \frac{M_{k-1}^e L_l}{I_k E_k}, \beta_k = \frac{h_k^\varphi L_l^2}{I_k E_k}, \gamma_k = \frac{F_{k-1}^e L_l^2}{I_k E_k}, \\ \delta_k &= \frac{q_k^0 L_l^3}{g I_k E_k}, \varepsilon_k = \frac{h_k^\varphi L_l^4}{I_k E_k}, \mu_k = \frac{q_k^0 L_l^4}{g I_k E_k}, \end{aligned} \right\}$$

перепишемо рівняння (1) у вигляді

$$\frac{d^4 w_k}{d\xi^4} - i(\alpha_k + \beta_k \omega_0 \xi) \frac{d^3 w_k}{d\xi^3} + (\gamma_k - i\beta_k \omega_0 - \delta_k \xi) \frac{d^2 w_k}{d\xi^2} - \delta_k \frac{dw_k}{d\xi} + i\varepsilon_k (p - \omega_0) w_k - \mu_k (\omega_0^2 + 2ip\omega_0 + p^2) w_k = 0, \quad (8)$$

звідки з урахуванням (7) одержимо для a_{kn} рекурентну формулу

$$\begin{aligned} a_{kn} &= \frac{i\alpha_k}{n} a_{kn-1} + \frac{i\beta_k \omega_0 (n-3) - \gamma_k}{n(n-1)} a_{kn-2} + \\ &+ \frac{\delta_k (n-3)}{n(n-1)(n-2)} a_{kn-3} - \\ &- \frac{i\varepsilon_k (p - \omega_0) - \mu_k (\omega_0^2 + 2ip\omega_0 + p^2)}{n(n-1)(n-2)(n-3)} a_{kn-4}, \end{aligned} \quad (9)$$

$n \geq 4.$

За рахунок повторного застосування (9), починаючи з $n=4$, a_{kn} можна виразити лінійною комбінацією $a_{k0}, a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}$. Таким чином, в загальному випадку

$$a_{kn} = F_{kn} a_{k0} + G_{kn} a_{k1} + H_{kn} a_{k2} + I_{kn} a_{k3}; \quad (10)$$

$n \in N,$

де: $F_{k0} = 1, F_{k1} = 0, F_{k2} = 0, F_{k3} = 0,$

$$G_{k0} = 0, G_{k1} = 1, G_{k2} = 0, G_{k3} = 0,$$

$$H_{k0} = 0, H_{k1} = 0, H_{k2} = 1, H_{k3} = 0,$$

$$I_{k0} = 0, I_{k1} = 0, I_{k2} = 0, I_{k3} = 1.$$

Згідно з рекурентним співвідношенням (9)

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F_{kn} \\ G_{kn} \\ H_{kn} \\ I_{kn} \end{pmatrix} &= \frac{i\alpha_k}{n} \begin{pmatrix} F_{kn-1} \\ G_{kn-1} \\ H_{kn-1} \\ I_{kn-1} \end{pmatrix} + \frac{i\beta_k \omega_0 (n-3) - \gamma_k}{n(n-1)} \times \\ &\times \begin{pmatrix} F_{kn-2} \\ G_{kn-2} \\ H_{kn-2} \\ I_{kn-2} \end{pmatrix} + \frac{\delta_k (n-3)}{n(n-1)(n-2)} \begin{pmatrix} F_{kn-3} \\ G_{kn-3} \\ H_{kn-3} \\ I_{kn-3} \end{pmatrix} - \\ &- \frac{i\varepsilon_k (p - \omega_0) - \mu_k (\omega_0^2 + 2ip\omega_0 + p^2)}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \times \\ &\times \begin{pmatrix} F_{kn-4} \\ G_{kn-4} \\ H_{kn-4} \\ I_{kn-4} \end{pmatrix}, \quad n \geq 4. \end{aligned} \quad (11)$$

Процес знаходження перших чотирьох коефіцієнтів $a_{k0}, a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}$ для кожної з k секцій проілюструємо на випадку дворозмірної компоновки без проміжних елементів. Для цього перепишемо граничні умови (3), (4), (6) у безрозмірному вигляді:

– для верхнього перерізу $\xi = 0$

$$w_1'' + f_{13} w_1' = 0; \quad (3a)$$

$$w_1''' + f_{22} w_1'' + f_{23} w_1' + f_{24} w_1 = 0,$$

$$\text{де } f_{13} = - \frac{(0,5iM_0 + k_0^\psi + ip\alpha_0^\psi + p^2 J_0) L_2}{I_1 E_1},$$

$$f_{22} = \frac{0,5iM_0 L_2}{I_1 E_1}, \quad f_{23} = \frac{P_0 L_2^2}{I_1 E_1},$$

$$f_{24} = \frac{(k_0^{\psi z} + ip\alpha_0^{\psi z} + p^2 m_0) L_2^3}{I_1 E_1},$$

– в місці з'єднання секцій труб $\xi = \xi_1 = \frac{L_1}{L_2}$

$$w_1 - w_2 = 0, \quad w_1' - w_2' = 0, \quad (4a)$$

$$w_1'' - k_{21} w_2'' = 0, \quad w_1''' - k_{21} w_2''' = 0,$$

$$\text{де } k_{21} = \frac{I_2 E_2}{I_1 E_1},$$

– на долоті $\xi = 1$

$$w_2'' + f_{77} w_2' = b_7, \quad (6a)$$

$$w_2''' + f_{86} w_2'' + f_{87} w_2' + f_{88} w_2 = b_8,$$

$$\text{де } f_{77} = - \frac{(0,5iM_2 + k_2^\psi + ip\alpha_2^\psi) L_2}{I_2 E_2},$$

$$f_{86} = \frac{0,5iM_2 L_2}{I_2 E_2}, \quad f_{87} = \frac{(P_2 + P_0 S_0) L_2^2}{I_2 E_2},$$

$$f_{88} = \frac{(k_2^{yz} + ip\alpha_2^{yz})L_2^3}{I_2 E_2}, \quad b_7 = \frac{0,5M \cdot L_2}{I_2 E_2},$$

$$b_8 = \frac{-0,5M \cdot L_2 + iP \cdot L_2^2}{I_2 E_2}.$$

Система рівнянь (3а), (4а), (6а) у матричному вигляді буде такою:

$$\|D\| \cdot \|a\| = \|b\|, \quad (12)$$

де

$$\|a\| = \begin{pmatrix} a_{10} \\ a_{11} \\ \vdots \\ a_{22} \\ a_{23} \end{pmatrix}, \quad \|b\| = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_7 \\ b_8 \end{pmatrix}, \quad \|D\| = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{18} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{28} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{81} & d_{82} & \dots & d_{88} \end{bmatrix}.$$

У матриці $\|D\|$:

$$d_{11}=0, \quad d_{12}=f_{13}, \quad d_{13}=2, \quad d_{14}=0, \quad d_{15}=0, \quad d_{16}=0, \quad d_{17}=0, \\ d_{18}=0, \quad d_{21}=f_{24}, \quad d_{22}=f_{23}, \quad d_{23}=2f_{22}, \quad d_{24}=6, \quad d_{25}=0, \\ d_{26}=0, \quad d_{27}=0, \quad d_{28}=0,$$

$$d_{31} = \sum_{n=0}^s F_{1n} \xi_1^n, \quad d_{32} = \sum_{n=0}^s G_{1n} \xi_1^n, \quad d_{33} = \sum_{n=0}^s H_{1n} \xi_1^n,$$

$$d_{34} = \sum_{n=0}^s I_{1n} \xi_1^n, \quad d_{35} = - \sum_{n=0}^s F_{1n} \xi_1^n, \quad d_{36} = - \sum_{n=0}^s G_{1n} \xi_1^n,$$

$$d_{37} = - \sum_{n=0}^s H_{1n} \xi_1^n, \quad d_{38} = - \sum_{n=0}^s I_{1n} \xi_1^n,$$

$$d_{41} = \sum_{n=1}^s n \cdot F_{1n} \xi_1^{n-1}, \quad d_{42} = \sum_{n=1}^s n G_{1n} \xi_1^{n-1},$$

$$d_{43} = \sum_{n=1}^s n H_{1n} \xi_1^{n-1}, \quad d_{44} = \sum_{n=1}^s n I_{1n} \xi_1^{n-1},$$

$$d_{45} = - \sum_{n=1}^s n F_{1n} \xi_1^{n-1}, \quad d_{46} = - \sum_{n=1}^s n G_{1n} \xi_1^{n-1},$$

$$d_{47} = - \sum_{n=1}^s n H_{1n} \xi_1^{n-1}, \quad d_{48} = - \sum_{n=1}^s n I_{1n} \xi_1^{n-1},$$

$$d_{51} = \sum_{n=2}^s n(n-1) F_{1n} \xi_1^{n-2}, \quad d_{52} = \sum_{n=2}^s n(n-1) G_{1n} \xi_1^{n-2},$$

$$d_{53} = \sum_{n=2}^s n(n-1) H_{1n} \xi_1^{n-2}, \quad d_{54} = \sum_{n=2}^s n(n-1) I_{1n} \xi_1^{n-2},$$

$$d_{55} = -k_{21} \sum_{n=2}^s n(n-1) F_{1n} \xi_1^{n-2},$$

$$d_{56} = -k_{21} \sum_{n=2}^s n(n-1) G_{1n} \xi_1^{n-2},$$

$$d_{57} = -k_{21} \sum_{n=2}^s n(n-1) H_{1n} \xi_1^{n-2},$$

$$d_{58} = -k_{21} \sum_{n=2}^s n(n-1) I_{1n} \xi_1^{n-2},$$

$$d_{61} = \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) F_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{62} = \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) G_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{63} = \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) H_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{64} = \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) I_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{65} = -k_{21} \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) F_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{66} = -k_{21} \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) G_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{67} = -k_{21} \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) H_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{68} = -k_{21} \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) I_{1n} \xi_1^{n-3},$$

$$d_{71}=0, \quad d_{72}=0, \quad d_{73}=0, \quad d_{74}=0,$$

$$d_{75} = f_{77} \sum_{n=1}^s n F_{2n} + \sum_{n=2}^s n(n-1) F_{2n},$$

$$d_{76} = f_{77} \sum_{n=1}^s n G_{2n} + \sum_{n=2}^s n(n-1) G_{2n},$$

$$d_{77} = f_{77} \sum_{n=1}^s n H_{2n} + \sum_{n=2}^s n(n-1) H_{2n},$$

$$d_{78} = f_{77} \sum_{n=1}^s n I_{2n} + \sum_{n=2}^s n(n-1) I_{2n},$$

$$d_{81}=0, \quad d_{82}=0, \quad d_{83}=0, \quad d_{84}=0,$$

$$d_{85} = f_{88} \sum_{n=0}^s F_{2n} + f_{87} \sum_{n=1}^s n F_{2n} + \\ + f_{86} \sum_{n=2}^s n(n-1) F_{2n} + \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) F_{2n},$$

$$d_{86} = f_{88} \sum_{n=0}^s G_{2n} + f_{87} \sum_{n=1}^s n G_{2n} + \\ + f_{86} \sum_{n=2}^s n(n-1) G_{2n} + \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) G_{2n},$$

$$d_{87} = f_{88} \sum_{n=0}^s H_{2n} + f_{87} \sum_{n=1}^s n H_{2n} + \\ + f_{86} \sum_{n=2}^s n(n-1) H_{2n} + \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) H_{2n},$$

$$d_{88} = f_{88} \sum_{n=0}^s I_{2n} + f_{87} \sum_{n=1}^s n I_{2n} + \\ + f_{86} \sum_{n=2}^s n(n-1) I_{2n} + \sum_{n=3}^s n(n-1)(n-2) I_{2n};$$

s – кількість членів степенювого ряду, що забезпечує бажану точність обчислень. Для ком-

поновок, число секцій яких $l > 2$, розмірність матриці $\|D\|$ складає $2l \times 2l$.

Коефіцієнти матриці-стовпчика $\|a\|$ шукаємо за формулою

$$\|a\| = \|D\|^{-1} \|b\|, \quad (14)$$

де $\|D\|^{-1}$ – матриця, обернена до $\|D\|$.

Алгоритм розв'язку задачі про усталені поперечні коливання бурильної колони можна подати таким чином:

- 1) обчислити $F_{k4}, G_{k4}, H_{k4}, I_{k4}$ за допомогою співвідношень (11);
 - 2) знайти коефіцієнти матриці $\|D\|$;
 - 3) повторювати перших два етапи для більшого порядку n доти, поки не буде досягнуто бажаної точності визначення кожного коефіцієнта;
 - 4) знайти коефіцієнти $a_{k0}, a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}$ за формулою (14);
 - 5) застосувати рекурентне співвідношення (9) для визначення наступних коефіцієнтів a_{kn} ($n \geq 4$);
 - 6) знайти розв'язок задачі за формулою (7).
- Цей алгоритм дає можливість визначити поперечні зміщення $w_k(\xi, t)$ (прогини), кути згину $\psi_k(\xi, t)$ (кути відхилення від вертикалі дотичної до пружної лінії), згинальні моменти $N_k(\xi, t)$ і поперечні сили $Q_k(\xi, t)$ як функції безрозмірної координати ξ і часу t . Відповідні формули містять як складові дійсні та уявні частини перерахованих характеристик (тобто їх проекції на осі Oy та Oz) і мають вигляд

$$w_k(\xi, t) = \sqrt{Re^2 w_k(\xi, t) + Im^2 w_k(\xi, t)} = \sqrt{y_k^2(\xi, t) + z_k^2(\xi, t)};$$

$$\psi_k(\xi, t) = \frac{1}{L_l} \sqrt{Re^2 \left[\frac{\partial w_k(\xi, t)}{\partial \xi} \right] + Im^2 \left[\frac{\partial w_k(\xi, t)}{\partial \xi} \right]} = \sqrt{\psi_{ky}^2(\xi, t) + \psi_{kz}^2(\xi, t)};$$

$$N_k(\xi, t) = \frac{I_k E_k}{L_l^2} \sqrt{Re^2 \left[\frac{\partial^2 w_k(\xi, t)}{\partial \xi^2} \right] + Im^2 \left[\frac{\partial^2 w_k(\xi, t)}{\partial \xi^2} \right]} = \sqrt{N_{ky}^2(\xi, t) + N_{kz}^2(\xi, t)};$$

$$Q_k(\xi, t) = \frac{I_k E_k}{L_l^3} \sqrt{Re^2 \left[\frac{\partial^3 w_k(\xi, t)}{\partial \xi^3} \right] + Im^2 \left[\frac{\partial^3 w_k(\xi, t)}{\partial \xi^3} \right]} = \sqrt{Q_{ky}^2(\xi, t) + Q_{kz}^2(\xi, t)}.$$


Запропонована математична модель поперечних коливань бурильної колони дає можливість оцінювати вплив основних параметрів механічної системи (зокрема, параметрів режиму буріння, кількості та місць розташування ОЦЕ і гідронавантажувачів) на статичні і динамічні характеристики багатопорних КНБК та показники відробки доліт, дає можливість розробити методики вибору багатопорних КНБК з гідронавантажувачами, обґрунтовуючи тим самим пропонований спосіб обертального буріння енергоакумуляуючою компоновкою.

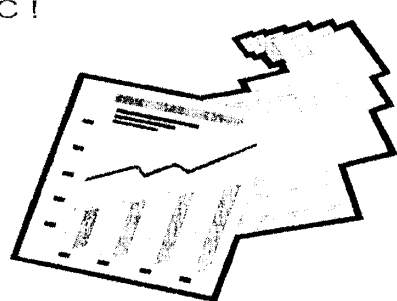
Література

1. Гидравлические усилители нагрузки повышают эффективность бурения / К.А.Джайлс, Т.Сисахей, Д.В.Брукс, В.Джонетти // Нефтегазовые технологии. – 2002. – № 1. – С. 50-54.
2. Митчел Р.Ф., Аллен М.Б. Исследование поперечных вибраций тяжелого низа бурильных колонн // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1985. – № 4. – С. 30-34.
3. Мойсишин В.М. Основы механики бурильной колони при поглибленні свердловин роторним способом // Дис. ... д-ра техн. наук. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1996. – 498 с.
4. Мойсишин В.М. Крутильні коливання бурильної колони з амортизатором // Нафтова і газова промисловість. – 1993. – № 2. – С. 24-25.
5. Саврей С.Я. Инструкция по расчёту компонок нижней части бурильной колонны. – М.: Мингео СССР, 1988. – 54 с.
6. Янгури А.Ш. Выбор рациональных конструкций бурильных колонн // ЭИ ВНИИОЭНГ: Техника и технология бурения скважин, 1988. – 52 с.

МИ ЧЕКАЄМО НА ВАС !

МІСЦЕ
ВАШОЇ
РЕКЛАМИ





З питань виготовлення і розміщення реклами звертатися:
м. Івано-Франківськ, 76019, вул. Карпатська 15, ІФНТУНГ,
Редакція журналу "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ", тел.: (03422) 42002, тел./факс: (03422) 42139,
ел. пошта: rozvidka@ifdtung.if.ua