

УДК 622.242: 534-16

Є.В. Харченко, В.М. Левринець
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра деталей машин

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В БУРИЛЬНІЙ КОЛОНІ ПІД ЧАС ГАЛЬМУВАННЯ

© Харченко Є. В., Левринець В. М., 2001

Розглядається алгоритм розрахунку динамічних процесів, що виникають в найбільш несприятливих режимах роботи підйомальної системи бурових установок при монтажу бурильних та обсадних колон – в режимах гальмування. Розрахунок виконується з врахуванням експериментально обґрунтованого закону зміни гальмівного моменту в часі і хвильових процесів в колоні бурильних труб. Інтегрування рівнянь з частковими похідними виконується методом скінченних різниць. Аналізується вплив довжини колони на значення динамічних навантажень на вишку, талевий канат і бурильні труби.

The algorithm of calculation of dynamic processes originating in the most unfavorable modes of operation of a lifting system of drill units at wiring drilling and casings – in conditions of braking is esteemed. The calculation is executed with the account experimentally of justified law of variation of brake torque in time and undular processes in a string of drill-pipes. The integrating of partial equations is executed by a method of finite differences. Influencing length of a string on values of dynamic loads on a tubular derrick, rotary line and drill-pipes is parsed.

Технологічний процес монтажу бурильної колони супроводжується періодичним її нарощуванням пригвинчуванням до верхньої труби наступної свічки і опусканням зібраної частини колони в свердловину на глибину, що дорівнює довжині свічки [1–3]. Найбільш несприятливим режимом роботи підйомальної системи бурової установки під час монтажу колони є гальмування довгомірної конструкції, що опускається у свердловину [1, 5, 6]. Визначення динамічних навантажень, що виникають в елементах бурових установок при перехідних режимах роботи, має істотне практичне значення.

Математичну модель динамічних процесів складаємо, одночасно аналізуючи обертовий рух барабана бурової лебідки і поступальний рух кронблока, талевого блока та бурильної або обсадної колони труб [5]. Масу бурової вишки зводимо до кронблока, бурильну або обсадну колону розглядаємо як пружне тіло, площа поперечного перерізу якого змінюється за ступінчастим законом.

Зупинимось на особливостях побудови алгоритму аналізу динамічних явищ в колоні, оскільки хвильові процеси, що в ній виникають, суттєво впливають на характер коливань механічної системи бурової установки. Рівняння руху ділянок колони в поздовжньому напрямі мають вигляд [4, 5]

$$a_i^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} - 2b_i \frac{\partial u_i}{\partial t} - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = -g_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

де u_i – функція, що визначає поступальні переміщення перерізів колони і залежить від часу і поздовжньої координати відповідної ділянки; a_i – швидкість розповсюдження хвилі

пружних деформацій; b_i – коефіцієнт лінійного опору рухові колони в свердловині; g_i – функція, за допомогою якої враховується розподілене навантаження; n – кількість ділянок, в межах кожної з яких поперечний переріз колони є сталим.

Значення a_i^2 , $2b_i$, g_i визначаються виразами

$$a_i^2 = \frac{E_i}{\rho_i}; \quad 2b_i = \frac{\kappa_i}{A_i \rho_i};$$

$$g_i = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_i} \sin^2 \alpha_0 \right) \cos \alpha_0 - \frac{a_i^2 f}{\rho_0} \operatorname{abs} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \operatorname{sign} \frac{\partial u_i}{\partial t}, \quad (2)$$

тут A_i – площа поперечного перерізу колони; E_i , ρ_i – модуль пружності першого роду і густина матеріалу труб; ρ – густина промивальної рідини; κ_i – коефіцієнт, що чисельно дорівнює силі, яка діє на ділянку труби одиничної довжини при її русі з одиничною швидкістю; α_0 – усереднений кут нахилу осі колони до вертикалі; f – коефіцієнт сухого тертя колони в стінку свердловини; ρ_0 – усереднений радіус кривизни свердловини; g – прискорення вільного падіння.

Крайові умови інтегрування рівняння (1) для верхнього кінця колони записуємо у вигляді

$$m_2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - E_1 A_1 \frac{\partial U_1}{\partial x_1} = m_2 g - F_2, \text{ якщо } x_1 = 0, \quad (3)$$

де m_2 – маса талевого блока з елеватором; F – зусилля, що діє з боку талевої системи на крюкоблок.

Для перерізів сусідніх ділянок колони крайові умови визначаються виразами

$$E_i A_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - E_{i+1} A_{i+1} \frac{\partial U_{i+1}}{\partial x_{i+1}} = 0, \quad U_i = U_{i+1}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n-1), \text{ якщо } x_i = l, \quad x_{i+1} = 0, \quad (4)$$

де l_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) – довжини відповідних ділянок колони.

Аналогічно записуємо крайову умову для нижнього кінця колони

$$E_n A_n \frac{\partial U_n}{\partial x_n} + m_3 \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} = m_3 g, \text{ якщо } x_n = l_n. \quad (5)$$

Тут l_n – довжина n -ї ділянки колони; m_3 – маса обважненого низу бурильної колони з інструментом.

Початкові умови інтегрування рівнянь (1) подаємо як

$$U_i(x_i, 0) = f_{1i}(x_i); \quad \frac{\partial U_i(x_i, t)}{\partial t} = f_{2i}(x_i), \text{ якщо } t = 0. \quad (6)$$

Тут $f_{1i}(x_i)$, $f_{2i}(x_i)$ – функції, за допомогою котрих задаємо початкові переміщення і швидкості руху поперечних перерізів колони.

Явну скінченно-різницеву схему рівнянь (1) з урахуванням позначень (2) записуємо у вигляді

$$u_i(x_i, t + \tau) = c_{1i} u_i(x_i, t - \tau) + c_{2i} u_i(x_i - h, t) + c_{3i} u_i(x_i, t) +$$

$$+ c_{4i} u_i(x_i + h, t) + c_{0i} g_{1i} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

де h і τ – значення кроків інтегрування за просторовою і часовою координатами відповідно; c_{0i} , c_{1i} , ..., c_{4i} – коефіцієнти апроксимації,

$$c_{0i} = \frac{\tau^2}{b_i \tau + 1}, \quad c_{1i} = \frac{b_i \tau - 1}{b_i \tau + 1}, \quad c_{2i} = \frac{\tau^2 (a_i^2 + g_{2i} h)}{h^2 (b_i \tau + 1)},$$

$$c_{3i} = \frac{2(a_i^2 \tau^2 + h^2)}{h^2 (b_i \tau + 1)}, \quad c_{4i} = \frac{\tau^2 (a_i^2 - g_{2i} h)}{h^2 (b_i \tau + 1)};$$

g_{1i}, g_{2i} – функції, що характеризують навантаження,

$$g_{1i} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_i} \sin^2 \alpha_0 \right) \cos \alpha_0, \quad g_{2i} = \frac{a_i^2 f}{2\rho_0} \operatorname{sign} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \operatorname{sign} \frac{\partial u_i}{\partial t}.$$

Під час числової реалізації виразу (7) необхідно притримуватися умови Куранта

$$\tau < \frac{h}{a},$$

в протилежному випадку слід користуватися більш складною – неявною скінченно-різницевою схемою, що має абсолютну стійкість.

Виконуючи скінченно-різницеву апроксимацію рівності (3) і приймаючи до уваги (7), отримуємо дискретний вираз крайової умови для верхнього кінця колони

$$u_1(0, t + \tau) = q_{10} u_1(0, t - \tau) + q_{20} u_1(0, t) + q_{30} u_1(h, t) + q_{40}, \quad (8)$$

де

$$q_{10} = \frac{s_{10}}{s_{00}}; \quad q_{20} = \frac{s_{20}}{s_{00}}; \quad q_{30} = \frac{s_{30}}{s_{00}}; \quad q_{40} = \frac{s_{40}}{s_{00}},$$

причому

$$s_{00} = E_1 A_1 \tau^2 + 2(m_0 + m_2) c_{21} h;$$

$$s_{10} = E_1 A_1 c_{11} \tau^2 - 2(m_0 + m_2) c_{21} h;$$

$$s_{20} = E_1 A_1 c_{31} \tau^2 + 4(m_0 + m_2) c_{21} h; \quad s_{30} = E_1 A_1 (c_{21} + c_{41}) \tau^2;$$

$$s_{40} = E_1 A_1 c_{01} g_{11} \tau^2 + 2[(m_0 + m_2)g - F_2] c_{21} \tau^2 h.$$

Аналогічно перетворюємо крайову умову (5) для нижнього кінця колони

$$u_n(l_n, t + \tau) = q_{1n} u_n(l_n, t - \tau) + q_{2n} u_n(l_n, t) + q_{3n} u_n(l_n - h, t) + q_{4n}, \quad (9)$$

де

$$q_{1n} = \frac{s_{1n}}{s_{0n}}; \quad q_{2n} = \frac{s_{2n}}{s_{0n}}; \quad q_{3n} = \frac{s_{3n}}{s_{0n}}; \quad q_{4n} = \frac{s_{4n}}{s_{0n}}.$$

Тут

$$s_{0n} = E_n A_n \tau^2 + 2m_3 c_{4n} h; \quad s_{1n} = E_n A_n c_{1n} \tau^2 - 2m_3 c_{4n} h;$$

$$s_{2n} = E_n A_n c_{3n} \tau^2 + 4m_3 c_{4n} h; \quad s_{3n} = E_n A_n (c_{2n} + c_{4n}) \tau^2;$$

$$s_{4n} = E_n A_n c_{0n} g_{1n} \tau^2 + 2(m_3 g + F_n - P_3) c_{4n} \tau^2 h.$$

Виконуючи скінченно-різницеву апроксимацію першої з граничних умов (4) і приймаючи до уваги друге співвідношення (4), а також рівність (7), отримуємо такі співвідношення для перерізів стику ділянок колони:

$$u_i(l_i, t + \tau) = u_{i+1}(0, t + \tau) = q_{1i} u_i(l_i, t - \tau) + q_{2i} u_i(l_i - h, t) +$$

$$+ q_{3i} u_i(l_i, t) + q_{4i} u_{i+1}(h, t) + q_{5i} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1), \quad (10)$$

де

$$q_{1i} = \frac{s_{1i}}{s_{0i}}; \quad q_{2i} = \frac{s_{2i}}{s_{0i}}; \quad q_{3i} = \frac{s_{3i}}{s_{0i}}; \quad q_{4i} = \frac{s_{4i}}{s_{0i}}; \quad q_{5i} = \frac{s_{5i}}{s_{0i}},$$

причому

$$\begin{aligned} s_{0i} &= E_i A_i c_{2,i+1} + E_{i+1} A_{i+1} c_{4i}; \\ s_{1i} &= E_i A_i c_{1i} c_{2,i+1} + E_{i+1} A_{i+1} c_{1,i+1} c_{4i}; \quad s_{2i} = E_i A_i c_{2,i+1} (c_{2i} + c_{4i}); \\ s_{3i} &= E_i A_i c_{2,i+1} c_{3i} + E_{i+1} A_{i+1} c_{3,i+1} c_{4i}; \quad s_{4i} = E_{i+1} A_{i+1} c_{4i} (c_{2,i+1} + c_{4,i+1}); \\ s_{5i} &= E_i A_i c_{0i} c_{2,i+1} g_{1i} + E_{i+1} A_{i+1} c_{0,i+1} c_{4i} g_{1,i+1} + 2c_{2,i+1} c_{4i} F_i h. \end{aligned}$$

Для виконання кожного наступного кроку інтегрування рівнянь (1) за формулами (7)–(10) необхідно мати значення невідомих функцій на двох попередніх шарах. В момент часу $t=0$ невідомі задані першим співвідношенням (6) лише на одному шарі. Перетворимо скінченно-різницеву схему (7) з урахуванням початкових умов (6) до вигляду, що дозволить виконувати перший крок інтегрування:

$$\begin{aligned} u_i(x_i, \tau) &= d_{2i} f_{1i}(x_i - h) + d_{3i} f_{1i}(x_i) + d_{4i} f_{1i}(x_i + h) + \\ &+ d_{5i} f_{2i}(x_i) + d_{0i} g_{1i} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} d_{0i} &= \frac{\tau^2}{2}; \quad d_{2i} = \frac{\tau^2 (a_i^2 + g_{2i} h)}{2h^2}; \quad d_{3i} = \frac{a_i \tau^2 + h^2}{h^2}; \\ d_{4i} &= \frac{\tau^2 (a_i^2 - g_{2i} h)}{2h^2}; \quad d_{5i} = -\tau (b_i \tau + 1), \end{aligned}$$

З урахуванням (6), (8)–(10) записуємо формули для визначення невідомих функцій на першому кроці інтегрування в крайніх перерізах ступінчастого стрижня

$$\begin{aligned} u_1(0, \tau) &= p_{20} f_{11}(0) + p_{30} f_{11}(h) + p_{40}; \\ u_n(l_n, \tau) &= p_{2n} f_{1n}(l_n) + p_{3n} f_{1n}(l_n - h) + p_{4n}; \\ u_i(l_i, \tau) &= u_{i+1}(0, \tau) = p_{2i} f_{1i}(l_i - h) + p_{3i} f_{1i}(l_i) + p_{4i} f_{1,i+1}(h) + p_{5i} \\ &(i = 1, 2, \dots, n-1), \end{aligned} \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} p_{20} &= r_0 s_{20}, \quad p_{30} = r_0 s_{30}, \quad p_{40} = r_0 [s_{40} - 2s_{00} \tau f_{21}(0)]; \\ p_{2n} &= r_n s_{2n}, \quad p_{3n} = r_n s_{3n}, \quad p_{4n} = r_n [s_{4n} - 2s_{0n} \tau f_{2n}(l_n)]; \\ p_{2i} &= r_i s_{2i}, \quad p_{3i} = r_i s_{3i}, \quad p_{4i} = r_i s_{4i}, \quad p_{5i} = r_i [s_{5i} - 2s_{0i} \tau f_{2i}(l_i)], \end{aligned}$$

тут

$$\begin{aligned} r_1 &= (b_1 \tau + 1) h / [2E_1 A_1 \tau^2 h + 4(m_0 + m_2)(a_1^2 + g_{21} h) \tau^2]; \\ r_2 &= (b_n \tau + 1) h / [2E_n A_n \tau^2 h + 4m_3(a_n^2 - g_{2n} h) \tau^2]; \\ r_i &= (b_i \tau + 1)(b_{i+1} \tau + 1) h^2 / [2E_i A_i (a_{i+1}^2 + g_{2,i+1} h) \tau^2 + 2E_{i+1} A_{i+1} (a_i^2 - g_{2,i} h) \tau^2] \end{aligned}$$

Для виконання розрахунку нестационарного процесу гальмування колони бурильних труб рівняння руху (1) інтегруємо за формулами (7)–(12) сумісно зі звичайними

диференціальними рівняннями руху барабана лебідки та кронблока. Зусилля взаємодії барабана, кронблока і талевого блока через талевий канат вираховуємо за значеннями переміщень і швидкостей руху вказаних елементів згідно з відомими залежностями [4, 5]. Гальмівний момент, що діє на барабан лебідки, задаємо у вигляді

$$M_m = M_{cm} + \alpha t, \text{ якщо } t < t_n;$$

$$M_m = M_{cm} + M_n, \text{ якщо } t \geq t_n,$$

тут M_{cm} – момент гальмівного пристрою, що зрівноважує сили ваги колони і талевого блока; t_n і α – час і швидкість наростання гальмівного моменту; M_n – надлишковий момент гальмівного пристрою.

Таблиця 1

Максимальні значення зусиль у верхньому крайньому перерізі колони бурильних труб (в кН) при наростанні гальмівного моменту протягом часу $t_1 = 0,09$ с

$l, \text{ м}$	$M_n, \text{ кН}$				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
59,23	14,36	18,96	23,71	27,81	32,61
87,43	18,63	24,43	30,19	35,77	41,75
115,63	22,52	29,14	35,57	42,54	48,84
143,83	25,73	32,75	39,93	47,52	54,75
172,03	28,58	36,55	44,41	52,60	60,47
200,23	31,15	39,39	47,28	55,28	63,74
228,43	33,27	42,16	50,59	58,46	67,11
256,63	35,51	43,98	52,53	61,16	70,00
284,83	37,46	46,25	54,72	63,74	72,77
313,03	39,59	48,67	57,51	66,74	75,97
341,23	41,73	50,70	60,08	69,45	78,83
369,43	43,79	53,00	62,45	71,90	81,35
397,63	45,94	54,87	64,31	73,74	83,19
425,83	47,55	56,92	66,31	75,75	85,21
454,03	49,69	59,29	68,89	78,49	88,08
482,23	51,89	61,53	71,17	80,84	90,11
510,43	53,80	63,39	73,02	82,68	91,34

Таблиця 2

**Максимальні значення зусиль у верхньому крайньому перерізі колони
бурильних труб (в кН) при наростанні гальмівного моменту протягом часу $t_1 = 0,18$ с**

$l, \text{ м}$	$M_n, \text{ кН}$				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
59,23	14,26	18,80	23,46	28,31	32,28
87,43	18,54	23,85	29,40	35,34	40,59
115,63	21,47	27,65	34,29	40,56	47,20
143,83	24,10	30,84	37,58	44,08	51,15
172,03	26,26	33,11	40,01	46,76	53,97
200,23	28,12	35,36	42,45	49,20	56,66
228,43	29,98	36,64	43,94	50,86	58,28
256,63	31,59	38,42	45,23	52,54	59,14
284,83	33,89	40,36	46,93	54,24	60,03
313,03	36,21	42,71	49,73	56,36	63,26
341,23	38,63	46,02	53,42	59,91	67,20
369,43	41,01	48,67	56,33	62,85	70,33
397,63	43,25	51,12	58,83	65,79	73,64
425,83	45,58	53,66	61,15	68,64	76,68
454,03	47,68	55,45	63,17	77,08	79,02
482,23	49,63	56,75	64,74	72,76	80,95
510,43	51,61	58,39	66,57	74,78	82,99

У табл. 1 і 2 наведено результати розрахунків гальмівних режимів роботи підйомальної системи бурової установки, обладнаної буровим агрегатом ЗИФ–650М і буровою щоглою МРУГУ–18/20, виконаних згідно з узагальненою математичною моделлю перехідних процесів [5] та викладеним у даній праці алгоритмом аналізу хвильових явищ в бурильній колоні. Параметри механічної системи бурової установки для проведення розрахунків прийняті такими: момент інерції барабана лебідки $J = 1,55 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; зведена маса щогли $m_1 = 300,0 \text{ кг}$; маса крюкоблока $m_2 = 39,6 \text{ кг}$; маса обважненої частини бурильної колони $m_3 = 23,89 \text{ кг}$; жорсткість висотної металоконструкції $c_b = 51,2 \text{ МН/м}$; жорсткість талевого каната $c_s = 1,9 \text{ МН/м}$; коефіцієнти лінійного опору згаданих пружних елементів $v_b = 0,5 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$, $v_s = 1 \text{ кН}\cdot\text{с}$; радіус навивання каната на барабан $r_t = 0,13 \text{ м}$; кратність поліспасти $k = 2$; початкові значення швидкостей елементів системи $\omega_0 = 30,76 \text{ рад/с}$; $v_{10} = v_{20} = v_{30} = 4 \text{ м/с}$. Параметри механічної системи бурильної колони: $n = 1$; $A_1 = 768,5 \text{ мм}^2$;

$E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\rho_1 = 9066$ кг/м³; $\rho = 1200$ кг/м³; $b_1 = 0,4$ с⁻¹; $\rho_0 = 500$ м; $\alpha_0 = 0,1$; $f = 0$.
Довжину колони під час числового експерименту змінювали у межах 59,23 – 510,43 м.

Як видно з одержаних результатів, на максимальне зусилля у найбільш навантаженому (крайньому верхньому) поперечному перерізі бурильної колони впливають не лише довжина колони та максимальне значення гальмівного моменту, а й швидкість наростання вказаного моменту у початковий період гальмування. Вплив режиму вмикання гальмівного пристрою на динамічні навантаження зростає із збільшенням як довжини колони, так і максимального значення гальмівного моменту. Це свідчить про важливе значення докладного аналізу процесів гальмування бурових установок на стадії їх проектування.

1. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы. М., 1988. 2. Вадецкий Ю. В. Бурение нефтяных и газовых скважин. М., 1985. 3. Ильский А.Л., Миронов ЮВ., Чернобыльский А.Г. Расчёт и конструирование бурового оборудования. М., 1985. 4. Харченко Е.В. Динамические процессы буровых установок. Львов, 1991. 5. Харченко Є.В., Левринець В.М. Розрахунок гальмівних режимів роботи підіймальної системи бурових установок // Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2000. № 396. С. 98–103. 6. Юртаев В.Г. Динамика буровых установок. М., 1987.