



Мойсишин В. М.

Левчук К. Г.

*Івано-Франківський  
національний технічний  
університет  
нафти і газу*

Moisyshyn V. M.

Levchuk K. G.

*Ivano-Frankivsk National  
Technical University  
of Oil and Gas*

УДК 622.242:534-16

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВІЛЬНЕННЯ ПРИХОПЛЕННЯ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ УДАРНИМ ПРИСТРОЄМ

На основі статичного розв'язку теорії пружності та методу плоскої хвилі проведено аналіз динаміки прихопленої секції бурильної колони (БК) при використанні ударного пристрою. Авторами було математично змодельовано коливальні рухи перерізів бурильної труби, визначено швидкості й момент зустрічі компоновок БК, побудовано хвильову діаграму ударних сил на межах зустрічі секцій та місця прихоплення.

Отримані аналітичні залежності для оцінки динамічних характеристик удару, швидкості звільнення прихопленої частини БК та її переміщення за час удару дозволили створити алгоритм чисельного розв'язування нелінійних динамічних рівнянь за допомогою комп'ютерних пакетів символічної математики. Також проведено чисельне дослідження на прикладі заданої компоновки БК. Для цієї бурильної колони розраховано тривалість удару, коефіцієнт поновлення, накопичену енергію внаслідок пружних деформацій БК, енергію, втрачену на удар, побудовано ударний імпульс плоскої хвилі у місці прихоплення.

**Ключові слова:** бурильна колона, прихоплення, поздовжній удар, математична модель, хвильова теорія, колювання, втрачена енергія, хвильова діаграма.

**Постановка проблеми.** При звільненні прихопленої бурильної колони ударним способом узагальнена математична модель системи містить динамічну модель пружних коливань БК, ударного пристрою і хвильову модель плоского удару.

Задачею даної статті є з'ясування характеру зміни сили опору під дією ударних сил і хвильових процесів. Особливу увагу відведено вивченню залежності коефіцієнта тертя між породою й матеріалом, з якого виготовлена БК, від зміни фізико-механічних властивостей.

**Аналіз останніх публікацій.** Серед всіх аварій найчастіше зустрічаються прихоплення бурильного інструменту, що характеризується втратою рухомості БК, яку не вдається вивільнити шляхом прикладання навантажень [1]. Зазвичай, виникнення прихоплень викликані: перепадом тиску, заклинюванням у свердловині, звуження свердловини (осідання шламу, обвали, утворення сальників і т.і.) [2].

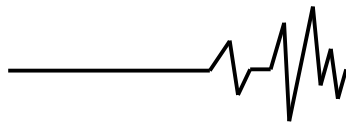
Переважає більшість дослідників висвітлила у літературі механізми виникнення та методи ліквідації прихоплень, статистику аварій [3-5]. Разом з тим, узагальненої математичної моделі, яка б враховувала

особливості динаміки аварійної, прихопленої частини БК та ударного пристрою, нема.

**Мета дослідження.** Метою цієї роботи є побудова хвильової діаграми бурильної колони, чисельні розрахунки й дослідження ударного імпульсу, що дозволяє ліквідувати прихоплення БК.

**Хвильова діаграма ударного яса.** Бурильна колона складається з двох частин: верхньої і нижньої. Верх бурильної колони – талева система з масою рухомих частин  $m_0$  і жорсткістю канатів  $c_0$ , секція бурильних труб і обважнена бурильна труба, приєднана до бойка ударного механізму. Низ бурильної колони – прихоплена секція труб, верхня частина якої є ковадлом.

Розглянемо абсолютно пружний удар описаних частин БК, знехтуємо залишковими деформаціями і розсіюванням енергії. Досліджується бурильна колона має чотири граничні поверхні: місце кріплення гаку талевої системи, стик торців першої секції та обважненої труби, місце зустрічі бойка і ковадла, місце прихоплення БК. Після зустрічі бойка з ковадлом можливе багаторазове відбиття, переломлення на граничних



поверхнях та як наслідок накладання ударних хвиль.

Дослідження були проведені на двох компоновках БК, параметри яких зведено до табл. 1. Бурильні труби виготовлені зі сталі,

модуль пружності Юнга для яких  $E = 210$  ГПа, а порода стовбура свердловини має модуль пружності Юнга  $E_{пов} = 33$  ГПа і густину  $\rho_{пов} = 2320$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблиця 1

Геометричні та фізичні параметри компоновок БК

компоновка	$D_1$	$d_1$	$D_2$	$d_2$	$F_3 = F_4$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3 = \rho_4$
	мм				см <sup>2</sup>	кг/м <sup>3</sup>		
1	139,7	117,7	177,8	71,4	260	7869,5	7772,5	7845
2	127	108,6	177,8	71,4	260	9457,4	7491,1	7845
компоновка	$m_1$	$m_2$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_{41}$	$\alpha_1$	$\alpha_2 = \alpha_3$
	кг		м			кг/с		
1	35	161,9	1400	130	1	7,85	48,4	380,4
2	32,2	156	1350	150	1	8,07	43,9	250

Для обраних компоновок приєднано талеву систему зі зведеною масою  $m_0 = 9855$  кг і жорсткістю канатів  $c_0 = 53$  МН/м. У представленій моделі роботи ударного пристрою враховано циркуляцію промивальної рідини у стовбурі свердловини з густиною  $q = 1200$  кг/м<sup>3</sup> та сухе тертя БК об кірку свердловини з коефіцієнтом  $f_0 = 0,3$ . Низ бурильної труби прихоплений з інтенсивністю розподіленої прихоплювальної

сили  $F_0 = 0,6$  МН/м.

Послідовність відбиттів від граничних поверхонь залежить від тривалості руху ударних хвиль до різних поверхонь  $t_j = l_j/a_j$ ,

де  $a_j = \sqrt{E/\rho_j}$  - швидкість розповсюдження хвиль. Черговість переходу хвиль із однієї секції труб до іншої визначається кількістю відбиттів між сусідніми поверхнями, розраховану величину яких зведено до табл. 2.

Таблиця 2

Геометричні та фізичні параметри компоновок БК

компоновка	$t_1 = l_1/a_1$	$t_2 = l_2/a_2$	$t_3 = l_3 + l_{41}/a_3$	$n_1 = [t_1/t_2]$	$n_2 = [t_2/t_3]$
	мсек.			разів	
1	271	25,01	1,71	10	14
2	286,4	28,33	1,753	10	16

Основні рівняння розрахунку ударної сили в місці прихоплення БК. Динамічні рівняння руху секцій БК на проміжку часу

$t \in [0, t_y]$ , який передуватиме удару, мають вигляд [6]

$$\ddot{u}_j(x_j, t) + 2h_j \dot{u}_j(x_j, t) - a_j^2 u_j''(x_j, t) = g_j, \quad j = \overline{1, 4}. \quad (1)$$

До системи рівнянь (1) було додано граничні умови

$$E_1 F_1 u_1'(0, t) + m_0 g = c_0 u_1(0, t) + m_0 a_1^2 u_1''(0, t); \quad (2)$$

$$u_1(l_1, t) = u_2(0, t); \quad E_1 F_1 u_1'(l_1, t) = E_2 F_2 u_2'(0, t) + q(F_2 - F_1) g l_1, \quad (3)$$

$$E_2 F_2 u_2'(l_2, t) = -q F_2 g (l_1 + l_2); \quad E_3 F_3 u_3'(0, t) = -q F_3 g (l_1 + l_2) \quad (4)$$

$$u_3(l_3, t) = u_4(0, t); \quad E_3 F_3 u_3'(l_3, t) = E_4 F_4 u_4'(0, t) + q(F_4 - F_3) g (l_1 + l_2 + l_3); \quad (5)$$

$$u_4(l_{41}, t) = u_4(l_{42}, t) = 0; \quad u_4'(l_{41}, t) = u_4'(l_{42}, t) = 0, \quad (6)$$

$$E_4 F_4 u_4'(l_4, t) = -q F_4 g (l_1 + l_2 + l_3 + l_4). \quad (7)$$

За диференціальними рівняннями (1) з урахуванням граничних умов (2)-(7) при початкових умовах, що визначаються умовами статички чисельними методами комп'ютерної

математики знаходиться момент зустрічі бойка і ковадла для заданого ходу ударного пристрою 50 см. У цей момент були розраховані координати, швидкості, пружні сили граничних



поверхонь хвильової діаграми удару.

В основі розрахунку власне самого ударного імпульсу лежить закон збереження імпульсу. Як відомо, ударні імпульси змінюються миттєво і ударна хвиля триває до тих пір, поки хвиля не досягне граничної поверхні. Відповідно сили удару і швидкості розповсюдження ударної хвилі розраховуються покроково аж до відокремлення обох компонентів БК за співвідношеннями

$$\begin{cases} R_i - R_{i-1} = D_2(v_{i-1} - v_i), \\ R_i - Q_{i-1} = D_3(v_i - w_{i-1}); \quad i = \overline{1, n} \\ Q_i - R_i = D_3(v_i - w_i), \\ Q_i - Q_{i-1} = D_{пов}w_i, \end{cases} \quad (8)$$

де  $R_i, Q_i$  – реакції поверхонь (ударні сили),  $v_i, w_i$  – швидкості розповсюдження плоскої хвилі,  $D_j = \rho_j a_j F_j, (j = \overline{2, 3})$ .

**Ударна сила в місці прихоплення БК.** У результаті досліджень основних динамічних

характеристик ударного механізму були розраховані проміжок часу  $t_y$ , за який спрацьовує ударний механізм, швидкості й пружні сили граничних поверхонь на початку удару, накопичену енергію  $T$  (табл. 3).

Далі покроково будувались діаграми ударних імпульсів на поверхні ковадла та сил, що руйнують механічні в'язі в зоні прихоплення. На рис. 1, а наведено діаграму в зоні прихоплення для 1 компонувки, а на рис. 1, б – для другої. Зазначимо, що збільшення сили, що намагається звільнити БК від прихоплення, відбувається із запізненням порівняно з моментом спрацювання ударного механізму, а найбільше значення сили залежить від компонентів БК (рис. 1). Але варто пам'ятати, що збільшення максимальної величини сили дозволяє якомога швидше звільнити бурильну колону, разом з тим сила не повинна перевищувати поріг міцності матеріалу, з якого виготовлені труби.

Таблиця 3

Геометричні та фізичні параметри компонентів БК

компонувка	$t_y$	$v_0$	$w_0$	$s_0$	$R_0$	$Q_0$	$S_0$	$T$
	сек.	м/с			кН			МДж
1	0,236	0,985	0,043	8,445	375	468	228	1,188
2	0,364	1,808	0,048	10,84	368	459	54	1,248

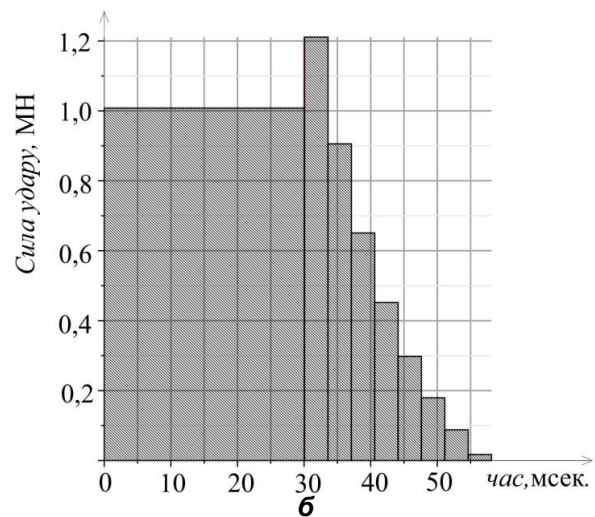
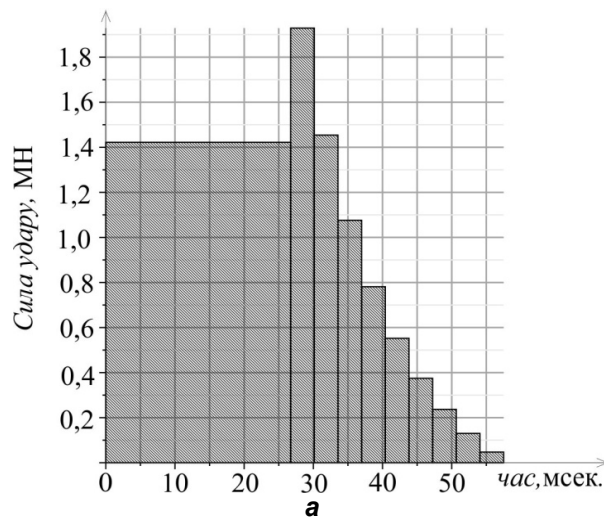


Рис. 1. Діаграма ударного імпульсу для двох компонентів БК в зоні прихоплення

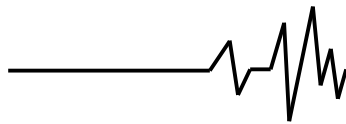
**Висновки**

1. Побудова математично-комп'ютерна модель механічної системи БК+ударний механізм, побудовану на теорії пружних коливань і хвильовій моделі плоского удару.
2. Тривалість звільнення БК від прихоплення при кожному ударі лежить в межах 0,1 секунди.

3. На практиці величина сили, що руйнує в'язі, спадає за час проходження ударної хвилі до першої секції, внаслідок чого бойок і ковадло відокремлюються. Тобто накладання хвиль не відбувається.

**Список використаних джерел**

1. Мислюк М. А. Буріння свердловин: довідник у 5-ти т. Т. 5: Ускладнення. Аварії.



Екологія /М. А. Мислюк, І. Й. Рибчич, Р. С. Яремійчук – К.: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 373 с.

2. Дудля Н. А. Аварии при бурении скважин: Учебник /Н. А. Дудля, Тайнин Янь, А. Я. Третьак. – Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2005. – 287 с.

3. Огородніков П. І. Теоретичні передумови вивчення коливальних процесів під час ліквідації прихоплень у бурильній колоні /П. І. Огородніков, В. М. Світлицький, Б. М. Мальярчук, М. П. Мельник // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – №4. – С. 9-11.

4. Калинин С. Г. Динамика несущих конструкций буровых установок: монография /С. Г. Калинин, Е. В. Харченко. – Львов: Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1988. – 144 с.

5. Харченко Є. В. Дослідження динаміки вивільнення прихопленої колони труб /Є. В. Харченко, А. В. Гутий // Технічні вісті. – 2007. - №1(25), 2(26). – С. 28-32.

6. Векерик В. І. Взаємодія аварійної й прихопленої компоновок бурильної колони при ліквідації аварій ударним способом /В. І. Векерик, К. Г. Левчук // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Вісник НУ «Львівська політехніка». – № 48 (2014). – С. 144-152.

#### **Список джерел в транслітерації**

1. Myslyuk M. A. Burinnya sverdlovin: dovidnyk u 5-ty t. T. 5: Uskladnennya. Avapiyi. Ekologiya /M. A. Myslyuk, I. Y. Rybchych, R. S. Yaremichuk – K.: Interpres LTD, 2004. – 373 s.

2. Dudlya N. A. Avarii pri bureni skvazhin: Uchebnik /N. A. Dudlya, Tainin Yan, A. Ya. Tretiyak. – Dnepropetrovsk: Nats. gornii un-t, 2005. – 287 s.

3. Ogorodnikov P. I. Teoretychni peredumovy vyvchennya kolyvalnykh protsesiv pid chas likvidatsiyi prykhopen u burylniy koloni /P. I. Ogorodnikov, V. M. Svitlytskyi, B. M. Malyarchuk, M. P. Melnyk // Naftova i gazova promyslovis. – 2005. – №4. – S. 9-11.

4. Kalinin S. G. Dinamika nesushchikh konstruktsiyi burovykh ustanovok: monografiya /S. G. Kalinin, Ye. V. Khaarchenko. – Lvov: Vyshcha shchkola, lzd-vo pri Lvov. un-te, 1988. – 144 s.

5. Kharchenko Ye. V. Doslidzhennya dynamiky vyvilnennya prykhopenoyi kolony trub /Ye. V. Kharchenko, A. V. Gutyi // Tekhnichni visti. – 2007. - №1(25), 2(26). – S. 28-32.

6. Vekeryk V. I. Vzaemodiya avarijnoi i prykhopenoyi komponovok burylnoyi kolony pry likvidatsiyi avarij udarnym sposobon /V. I. Vekeryk, K. G. Levchuk // Avtomatyzatsiya vyrobnychyh protseciv u mashynobuduvanni ta prylobuduvanni. – Visnyk NU «Lvivska politehnika». – № 48 (2014). – S. 144-152.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСВОБОЖДЕНИЯ ПРИХВАТА БУРОВОЙ КОЛОННЫ УДАРНЫМ УСТРОЙСТВОМ**

**Аннотация.** На основании статического решения теории упругости и метода плоской волны проведен анализ динамики прихваченной секции буровой колонны (БК) при использовании ударного устройства. Авторы математически смоделировали колебательные движения сечений буровой трубы, определены скорости и момент встречи компоновок БК, построена волновая диаграмма ударных сил на границах встречи секций и места прихвата.

Получены аналитические зависимости оценки динамических характеристик удара, скорости освобождения прихваченной части БК и её перемещения за время удара позволили создать алгоритм численного решения нелинейных динамических уравнений при помощи компьютерных пакетов символьной математики. Также проведены численные исследования на примере заданной компоновки БК. Для этой буровой колонны рассчитаны длительность удара, коэффициент восстановления, накопленная энергия вследствие упругих деформаций БК, энергия, потерянная при ударе, построен ударный импульс плоской волны в месте прихвата.

**Ключевые слова:** буровая колонна, прихваты, продольный удар, математическая модель, волновая теория, колебания, потерянная энергия, волновая диаграмма.

### **INVESTIGATION OF STUCK PIPE RELEASE THE DRILL STRING SHOCK DEVICE**

**Annotation.** Analyzes the dynamics of stuck drill string section (DS) using shock device, which based on static solution of elasticity and plane wave method. The authors mathematically modeled oscillatory motion of the drill pipe sections, set the speed and time of the meeting configurations DS, built diagram shock wave forces on a meeting within sections and place stuck. The creators obtained analytical formulas for assessing the dynamic characteristics of impact, the speed of release of stuck DS and its movement during the strike helped to create numerical algorithm for solving nonlinear equations dynamically using computer packages symbolic mathematics.

The researchers numerical study conducted by the example given layout DS also. For this drill string length calculated blow-coefficient update attitude, accumulated energy due to elastic deformation DS, energy, lost to strike itself to loosening-kick, striking the momentum built at the site of a plane wave stuck pipe.

**Key words:** drill string, stuck pipe, longitudinal impact, mathematical model, wave theory, fluctuations in lost energy, wave diagram.