УДК 622.248

# ДИНАМІКА БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХОПЛЕНЬ УДАРНИМ СПОСОБОМ (частина 2)

***В.М.Мойсишин, З.В.Кулинин***

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

*Предложена математическая модель процесса ликвидации прихвата бурильной колонны ударным механизмом единичного действия. Диссипативные члены в дифференциальных уравнениях движения представлены слагаемыми, соответствующими силам вязкого и сухого (кулоновского) трения. Рассматриваемый процесс разбит на четыре этапа: натяжение аварийной компоновки, разгон составных частей колонны, ударное взаимодействие бойка и наковальни, послеударное движение составных частей механической системы.*

*Mathematical model of the elimination process of string sticking by the single action shock mechanism is suggested. Dissipating members of differential equations of motion are presented by items which correspond to viscous and dry friction forces. The process under consideration is divided into four stages: accident assembly tension, string parts momentum, shock interaction of hammer and anvil, after-shork motion of component parts of the mechanical system.*

## 4 УДАР ТА ПІСЛЯУДАРНИЙ РУХ

Збурні сили, які виникають у результаті взаємодії ударної пари, можуть бути знайдені тільки у ході вивчення динамічних деформацій “молота” і “ковадла”. Розділимо останні на місцеві, локалізовані поблизу місця співударяння, і загальні, які охоплюють усю довжину аварійної і прихопленої компоновок.

Теорія пружного поздовжнього удару, що враховує як місцеві, так і загальні деформації, запропонована Дж.Е.Сірсом [4], а теорія згинаючого удару — С.П.Тимошенком [5]. Зауважимо, що ідея визначення контактної сили з інтегрального рівняння, яка лежить в основі теорії С.П.Тимошенка, є універсальною і може бути використана для розв’язання всіх задач ударної взаємодії.

Після зіткнення бойка з “ковадлом” аварійна і прихоплена компоновки будуть здійснювати сумісний рух. Диференціальні рівняння руху і граничні умови для третього етапу залишимо без змін за винятком місця зустрічі ударної пари. Якщо в цьому перерізі записати граничні умови для жорсткого удару, тобто без урахування місцевих деформацій, то розрахункова контактна сила буде в декілька разів перевищувати контактну силу, одержану експериментально [2, 3].

Враховуючи сказане, приймемо, що місцеві деформації (так само як і в теорії Г.Р.Герца) поблизу місця взаємодії ударної пари пов’язані з контактною силою статичними залежностями. У той же час разом з місцевими будемо враховувати і загальні деформації, знайдені методами теорії коливань. Таким чином, розв’язок задачі проведемо на основі *синтезу хвильової теорії і теорії локальних деформацій*.

Відлік часу на етапі удару почнемо з нуля (від моменту $t_y$ зустрічі бойка з “ковадлом”) і за наявності контакту ударної пари запишемо умову

$$y_2 + y_3 + \alpha = \upsilon_0 t, \quad P(t) > 0, \qquad (42)$$

а за відсутності контакту

$$y_2 + y_3 > \upsilon_0 t, \quad \alpha = 0, \quad P(t) = 0, \qquad (43)$$

де: $y_2$, $y_3$ – переміщення точок контакту обидвох тіл, викликані контактною силою $P(t)$, але одержані без урахування локальних деформацій;

$\alpha$ – зближення тіл за рахунок локальних деформацій;

$\upsilon_0$ – початкова швидкість співударяння контактуючих тіл.

Останню знаходимо з рівності

$$\upsilon_0 = \frac{\partial u_3(0, t_y)}{\partial t} - \frac{\partial u_2(L_2, t_y)}{\partial t}.$$

Переміщення $y_2 = u_2(L_2, t)$ і $y_3 = u_3(0, t)$ ($t \geq t_y$, але, як уже підкреслювалось, від моменту $t_y$ відлік часу почато з нуля) можна трактувати як розв’язок задач розгону аварійної та прихопленої компоновок за дещо змінених граничних умов. Якщо $x_2 = L_2$, то замість (5) слід записати

$$\frac{\partial u_2(L_2, t)}{\partial x_2} = -\beta_2 + \frac{P(t)}{A_2 E_2},$$

а якщо $x_3 = 0$, то замість (6) візьмемо

$$\frac{\partial u_3(0, t)}{\partial x_3} = -\beta_3^{(0)} + \frac{P(t)}{A_3 E_3}.$$

Виразивши в рівнянні (42) переміщення $y_2$, $y_3$ та $\alpha$ через силу взаємодії тіл $P(t)$, одержимо рівняння для визначення цієї сили.

Згідно з прийнятою гіпотезою зближення тіл $\alpha$ пов’яжемо з контактною силою $P$ статичною залежністю

$$P = f(\alpha) \Rightarrow \alpha = \alpha(P), \qquad (44)$$

яку найкраще одержати експериментально. Г.Р.Герц цю залежність подає як $P = K\alpha^{3/2}$, а М.О.Кільчевський [4] бере її у вигляді $P = K\alpha^{n}$ (у даному випадку контакт між тілами більш щільний, а тому $1 \le n \le 3/2$).

Подаючи переміщення $y_2$, $y_3$ за допомогою інтегралів Ж.М.К.Дюамеля через реакцію кожного з тіл ударної пари на одиничний імпульс

$$\left.\begin{aligned} y_2 &= \int_0^t P(\tau) Y^{(2)}(t-\tau)d\tau, \\ y_3 &= \int_0^t P(\tau) Y^{(3)}(t-\tau)d\tau \end{aligned}\right\} \qquad (45)$$

і підкладаючи одержані вирази разом з (44) в умову контакту (42), одержимо інтегральне рівняння С.П.Тимошенка, яке і дає закон зміни контактної сили

$$\int_0^t P(\tau) Y(t-\tau)d\tau + \alpha(P(t)) = \upsilon_0 t, \; P(t) > 0, \qquad (46)$$

де $Y(t) = Y^{(2)}(t) + Y^{(3)}(t)$.

Оскільки інтегральний член у (46) залежить від значень контактної сили в усі попередні відносно розглядуваного моменти часу, то за достатньо малого кроку дискретизації, згідно з пропозицією С.П.Тимошенка, зміною сили в інтегральній сумі на проміжку $[t-\Delta t, t]$ можна знехтувати і обчислювати силу $P(t)$ в кожний наступний проміжок часу за формулою

$$\begin{aligned} P(t) = f\Bigg\{ \upsilon_0 t - \int_0^{t-\Delta t} P(\tau) Y(t-\tau)d\tau - \\ - P(t-\Delta t)\int_0^{\Delta t} Y(\tau)d(\tau) \Bigg\}. \end{aligned} \qquad (47)$$

Для практичних розрахунків одержана формула незручна, оскільки з кожним новим кроком потрібно заново обчислювати інтеграли, що до неї входять.

Для розв'язку поставленої задачі скористаємось більш зручним розрахунковим алгоритмом, запропонованим В.Л.Бідерманом [2]. Закон зміни контактної сили апроксимуємо ламаною лінією зі зламами через однакові проміжки часу $\Delta t$. У довільний момент часу $t = i\Delta t$ графік зміни контактної сили будемо характеризувати величинами

$$P_i, \; P_i' = \frac{P_i - P_{i-1}}{\Delta t},$$

$$\theta_i = P_{i+1}' - P_i' = \frac{P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1}}{\Delta t}.$$

Використовуючи реакції

$$Y_*^{(2)}(t) = \int_0^t \int_0^{t_1} Y^{(2)}(t_2)dt_2 dt_1;$$

$$Y_*^{(3)}(t) = \int_0^t \int_0^{t_1} Y^{(3)}(t_2)dt_2 dt_1$$

кожного з тіл ударної пари на лінійно зростаючу силу, знайдемо переміщення $y_2$ та $y_3$

$$y_2\big|_{t=i\Delta t} = \sum_{l=0}^{i-1} \theta_l Y_*^{(2)}[(i-l)\Delta t],$$

$$y_3\big|_{t=i\Delta t} = \sum_{l=0}^{i-1} \theta_l Y_*^{(3)}[(i-l)\Delta t]$$

і, підкладаючи їх в умову контакту (42), знайдемо

$$\theta_{i-1} = \frac{\upsilon_0 i\Delta t - \sum_{l=0}^{i-2} \theta_l Y_*[(i-l)\Delta t] - \alpha(P_*)}{Y_*(\Delta t) + \alpha'\Delta t}, \qquad (48)$$

де:

$$Y_* = Y_*^{(2)} + Y_*^{(3)}, \; \alpha' = \left(\frac{d\alpha}{dP}\right)\bigg|_{P=P_*},$$

$$P_* = P_{i-1} + P_{i-1}'\Delta t = \sum_{l=0}^{i-2} \theta_l (i-l)\Delta t.$$

Для першого моменту співударяння величину $\theta_0$ визначаємо з лінійного рівняння [2]

$$\theta_0 Y_*(\Delta t) + (\theta_0 \, \Delta t/K)^{2/3} = \upsilon_0 \Delta t,$$

де $K$ – коефіцієнт пропорційності у формулі Г.Р.Герца.

Поточне значення $P(t)$ контактної сили знайдемо за формулою

$$P\big|_{t=i\Delta t} = P_i = \sum_{l=0}^{i-1} \theta_l (i-l)\Delta t. \qquad (49)$$

Після того, як зміну контактної сили в часі знайдено, неважко визначити динамічні характеристики кожної з частин механічної системи, вважаючи збурну силу $P(t)$ заданою.

Граничні умови в місці контакту ударної пари подамо у вигляді

$$\left.\begin{aligned} & u_2(L_2, t) = u_3(0, t), \\ & \frac{\partial u_2(L_2, t)}{\partial x_2} = k_{2y}\frac{\partial u_3(0, t)}{\partial x_3} + \beta_{2y} + p(t), \end{aligned}\right\}, \qquad (50)$$

де: $k_{2y} = \dfrac{A_3 E_3}{A_2 E_2}$;

$\beta_{2y} = \dfrac{q(A_3 - A_2)g(L_1 + L_2)}{A_2 E_2}$ (якщо $A_2 = A_3$, то зрозуміло $\beta_{2y} = 0$);

$$p(t)=\frac{\mathrm{P}(t)}{A_2E_2}.$$

Отже, задача математичної фізики на третьому етапі ліквідації прихоплення (задача визначення загальних деформацій) описується диференціальними рівняннями (1) для $k=\overline{1,3}$ і (2) для $k=4$, граничними (3а), (4), (50), (7), (8) та початковими (28),(40) умовами.

Оскільки, як і на етапі розгону, маємо неоднорідні рівняння з неоднорідними граничними умовами, то розв'язок задачі будемо шукати у вигляді

$$u_k(x_k,t)=u_k^*(x_k,t)+w_k(x_k,t)+w_k^*(x_k,t),\quad k=\overline{1,4}, \tag{51}$$

де: $u_k^*(x_k,t)$ – частинні розв'язки диференціальних рівнянь руху, що задовольняють неоднорідні граничні умови при $P(t)=0$;

$w_k(x,t)$ – загальні розв'язки однорідних рівнянь з однорідними граничними умовами;

$w_k^*(x_k,t)$ – частинні розв'язки, породжені збурною силою $P(t)$.

Два перших доданки шукаємо за аналогією з випадком розгону розглядуваної механічної системи. Власні частоти $\nu_i$ визначаємо з умови

$$\det\begin{Vmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{18}\\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{28}\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ d_{81} & d_{82} & \dots & d_{88}\end{Vmatrix}=0\Rightarrow\nu_i, \tag{52}$$

де: $d_{11}=\nu^2\alpha_0-k_0,\ d_{12}=\frac{\nu}{c_1}, d_{13}=0,\ d_{14}=0,$

$d_{15}=0, d_{16}=0, d_{17}=0, d_{18}=0;$

$$d_{12}=-\frac{\nu}{c_1}S_1,\ d_{22}=\frac{\nu}{c_1}C_1, d_{23}=0,$$

$d_{24}=-k_1\frac{\nu}{c_2}, d_{25}=0, d_{26}=0,\ d_{27}=0, d_{28}=0,$

$$d_{31}=C_1, d_{32}=S_1, d_{33}=-1, d_{34}=0,$$

$d_{35}=0, d_{36}=0, d_{37}=0, d_{38}=0;$

$$d_{41}=0, d_{42}=0, d_{43}=-\frac{\nu}{c_2}S_2, d_{44}=\frac{\nu}{c_2}C_2,$$

$d_{45}=0, d_{46}=-k_{2y}\frac{\nu}{c_3}, d_{47}=0, d_{48}=0;$

$$d_{51}=0, d_{52}=0, d_{53}=C_2, d_{54}=S_2,$$

$d_{55}=-1, d_{56}=0, d_{57}=0, d_{58}=0;$

$$d_{61}=0, d_{62}=0, d_{63}=0, d_{64}=0,$$

$d_{65}=-\frac{\nu}{c_3}S_3, d_{66}=\frac{\nu}{c_3}C_3, d_{67}=0, d_{68}=-k_3\frac{\nu}{c_4};$

$$d_{71}=0, d_{72}=0, d_{73}=0, d_{74}=0, d_{75}=C_3,$$

$d_{76}=S_3, d_{77}=-1, d_{78}=0;$

$$d_{81}=0, d_{82}=-, d_{83}=0, d_{84}=0, d_{85}=0,$$

$d_{86}=0, d_{87}=-S_4, d_{88}=C_4;$

$$S_k=\sin\frac{\nu L_k}{c_k}, C_k=\cos\frac{\nu L_k}{c_k}, k=\overline{1,4}.$$

Для визначення третього з доданків у (51) залежність $p(t)$ продовжимо на проміжок $\left[-t^*,0\right]$ непарним способом ($t^*$ – тривалість удару, $T=2t^*$ – період сили) і розвинемо одержану функцію в ряд Фур'є за синусами

$$p(t)=\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin n\omega t,$$

де $\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{\pi}{t^*},\ b_n=\frac{2}{t^*}\int_0^{t^*}p(t)\sin n\omega t\,dt.$

Після цього знаходимо розв'язки $w_k^*(x_k,t)$ на кожній із частот $\omega_n=n\omega$ і додаємо їх згідно з принципом незалежності дії сили.

Під час відскоку (якщо такий має місце) реалізується умова (43). Відлік часу знову слід почати з нуля (від моменту $t^*$ роз'єднання ударної пари), замість (50) записати граничні умови другого етапу (5), (6), а початкові умови взяти у вигляді

$$u_k(x_k,0)=u_k\left(x_k,t^*\right),\ \frac{\partial u_k(x_k,0)}{\partial t}=\frac{\partial u_k\left(x_k,t^*\right)}{\partial t},\quad k=\overline{1,4}. \tag{52}$$

Праві частини в умовах (52) це розв'язки (51) на етапі удару в момент часу $t^*$.

У разі повторних ударів (якщо такі мають місце) розв'язок задачі на третьому і четвертому етапах слід повторити потрібне число разів.

Ймовірність розглянутих варіантів післяударного руху досить невисока. У більшості випадків сумісний рух ударної пари продовжується і після закінчення удару (на графіку залежності $p(t)$ після різкого зростання на проміжку $\left(0,t^*\right)$ маємо криву, характерну для гармонічних коливань), тобто розв'язок (51) одночасно описує як третій, так і четвертий (післяударний) етапи ліквідації прихоплення.

## 5 ПРИКІНЦЕВІ ЗАУВАЖЕННЯ

На основі розробленої математичної моделі можна визначати характеристики процесу ліквідації прихоплення ударним способом.

Розділимо їх на дві групи. До першої віднесемо ті характеристики, що формуються на етапі розгону аварійної компоновки. Це час $t_y$ розгону компоновки, швидкість та кінетична енергія "молота" (секція ОБТ над ударним пристроєм) на момент зустрічі бойка з "ковадлом". Другу групу складають величини, що формуються на етапі удару. До неї належать тривалість $t^*$ і максимальна сила удару, коефіцієнт поновлення $k_n = \sqrt{\frac{T}{T_0}}$, енергія втрачених швидкостей $T_* = \frac{1+k_n}{1-k_n}\left(T_0 - T\right)$, коефіцієнт передачі енергії $\eta = T'/T_0$, де $T_0$ і $T$ – сумарна кінетична енергія секцій 2, 3, 4 до і після удару відповідно, $T'$ – кінетична енергія прихопленої компоновки (секцій 3, 4) після удару.

Розроблена модель дозволяє оцінити вплив основних параметрів аварійної компоновки (сили розрядки замкової пари, довжини вільного ходу ударної пари, маси молота і т.п.) на характеристики досліджуваного процесу, визначити статичні і динамічні сили, що виникають у довільному перерізі труб аварійної чи прихопленої компоновки, розробити рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів розглядуваної механічної системи.

### *Література*


1. Мойсишин В.М., Кулинин З.В. Динаміка бурильної колони при ліквідації прихоплень ударним способом (частина 1) // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 4(9). – С. 10-18.
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
3. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
4. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.
5. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. – М.: Наука, 1967. – 444 с.


УДК 621.375.(03)

# СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ЖИВЛЕННЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ВАЖКИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

***Л.М.Заміховський, М.Я.Николайчук***

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48000*
*e-mail: public@ifdtung.if.ua*

*Предложены методы организации и схемотехнические решения систем импульсного питания исполнительных устройств для объектов нефтегазовой промышленности с тяжелыми условиями эксплуатации на базе интегральных контроллеров питания РЭА с широтно-импульсной модуляцией. Исследованы различные конфигурации и параметры данных систем и даны рекомендации по их применению.*

*The building methods and schematic solutions for pulse power supplies of actuating mechanisms for oil and gas industry with hard service conditions using integrated power supply controllers with pulse-width modulation are offered. Various configurations and parameters of these systems are investigated and recommendations about application of these are given.*

До останнього часу на об’єктах нафтогазової галузі використовувалися системи живлення, побудовані на морально застарілій елементній базі, що призводило до частих відмов і відповідно до зниження надійності як засобів автоматизації, так і об’єктів контролю і управління загалом. Враховуючи важкі умови експлуатації об’єктів нафтогазової галузі, в статті розглядається можливість використання новітніх систем живлення для вказаних об’єктів, виходячи з характеристик умов їх експлуатації і вимог до надійності і ефективності систем живлення засобів автоматизації.

Основою сучасних імпульсних систем живлення є спеціалізовані інтегральні схеми (ІС) – контролери, які використовують принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для стабілізації вихідної напруги, струму чи потужності, а також забезпечують захист у разі виходу параметрів за межі номінальних. ІС для імпульсних джерел живлення (ІДЖ) розвинулися на базі лінійних стабілізаторів і в даний час – це самостійний напрямок мікроелектроніки, що швидко розвивається.

**Характеристика умов експлуатації.** Дослідження умов експлуатації засобів автоматизації на об’єктах нафтогазовидобувного та переробного комплексів [1], засвідчує, що до важких умов експлуатації можна віднести:

– широкий діапазон температур середовища (від -40°С до +85°С);

– нестабільність напруг живлення, що підводяться до об’єктів, внаслідок частих перевантажень промислових мереж;

– великі пікові викиди напруги під час комутації високострумових реактивних навантажень (до 600 В);

– обмеження величини діючого значення напруги живлення під час експлуатації засобів автоматизації у вибухонебезпечних зонах на рівні до 24 В;

– втрати у підвідних низьковольтних мережах ставлять вимоги до ККД перетворювачів потужності на рівні 85% і більше;

– широкий діапазон споживаних потужностей (застосування виконавчих пристроїв з різними режимами роботи і відповідно з багатьма режимами щодо потужності).