5. *Суриков В.В.* Механика разрушения мерзлых грунтов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд., 1978. – 128 с.

6. *Солод В.И., Зайков В.И., Первов К.М.* Горные машины и автоматизированные комплексы. – М.: Недра, 1981. – 503 с.

7. *Gilman John J.* Direct Measurments of the Surface Energy of Crystals // J. of Appl. Phys. – 1960. – V. 31. – № 12. – P. 2208–2219.

8. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.

9. *Obreimoff J.W.* The Splitting Strength of Mica // Proc. Roy. Soc. – London. – 1930. – V. 127. – № 804. – P. 290–297.

УДК 622.245.54:532.595.2

ОБРОБКА СЕРЕДОВИЩ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В.М. Вигівський, асп. (НТУУ "КПІ", ІЕЕ)

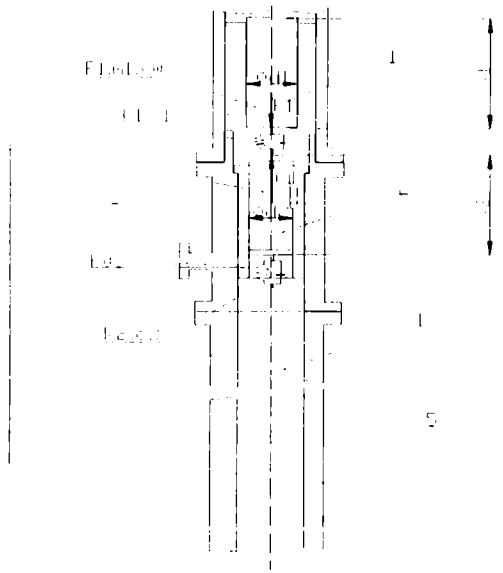
Исследован процесс взаимодействия исполнительного органа с обрабатываемым материалом при управлении энергетическими потоками с помощью импульсно-волнового трансформатора. Установлено оптимальное соотношение между энергией излучения исполнительного органа и энергией поглощения обрабатываемым материалом.

Створення нових гірничих систем та підвищення продуктивності існуючих потребує врахування властивостей оброблюваного середовища, його власної частоти коливань, відповідності енергії випромінювання зовнішнього джерела енергії поглинання матеріалу.

У даній статті розв'язується наукова задача дослідження процесу взаємодії виконавчого органу з оброблюваним середовищем за допомогою імпульсно-хвильового трансформатора (ІХТ).

Керування енергетичними потоками системи оброблюване середовище–імпульсно-хвильовий трансформатор (СІХТ) реалізоване з метою підвищення

продуктивності нафтогазових свердловин. Розрахункову схему системи СІХТ наведено на рисунку. До системи входять дві підсистеми: оброблюване середовище ОС та ІХТ. Останній складається з первинного низькочастотного джерела коливань, яким є гідропневмомолот ГПМ-120 з ударником *1*, та вторинного високочастотного плунжера-випромінювача (ПВ) *2*. ІХТ трансформує низькочастотну енергію одиничного удару від первинного джерела коливань у потік енергії високочастотних коливань ПВ. Сумісна робота ІХТ і гідравлічного насоса, що прокачує рідину по нагнітальному трубопроводу *3*, реалізує навантаження ОС *5* енергетичними потоками – гідравлічного удару ПВ з рідиною, що подається, та гідравлічного удару при відкриванні нагнітального трубопроводу насоса. Нижній торець ПВ підтримується тиском рідини від гідравлічного насоса.



Розрахункова схема системи оброблюване середовище–імпульсно-хвильовий трансформатор

Сила F_1, що виникає в результаті удару, переміщає ПВ вниз. ПВ перекриває переріз нагнітального трубопроводу *3*. Потік енергії від гідравлічного удару поширюється по стовпу рідини в свердловині *4*. Коливання гідравлічного удару, досягаючи колектора нафтового пласта *5*, розривають міжмолекулярні зв'язки вміщуючих порід, що приводить до утворення мікротріщин і підвищує проникність колектора продуктивного пласта. Зворотний хід ПВ відкриває шлях потоку рідини від гідронасоса і викликає повторний гідравлічний удар.

Для розрахунків представимо ІХТ у вигляді двомасової системи, яка складається з маси ударника m_1 і маси ПВ m_2. Розрахунок параметрів проведено комбінованим методом, який враховує стискання приконтактної зони удару, з використанням положень теорії пружності. Жорсткість приконтактної зони відрізняється від жорсткості основної частини ударника на порядок. Тому стискання здійснюється за рахунок деформації приконтактної зони. Доведено експериментом [1], що загальні деформації тіл малі порівняно з деформаціями в зоні контакту.

В момент часу $t = 0$ ударник з швидкістю v_{01} зштовхується з ПВ. Тривалість удару $0 \le t < t_1$. Під час співудару ударник та ПВ переміщаються на відстань $0 \le x < x_1$. Співудар описується диференціальним рівнянням другого порядку, права частина якого дорівнює нулю. Змінною рівняння є шлях зближення a ударника та ПВ. Контактна жорсткість c ударника та ПВ визначається за формулою

$$c = 0{,}865\left(\frac{\rho a S_1 S_2}{S_1\omega_2 + S_2\omega_1)}\right)^{0,2}\left[\frac{2\cdot\sqrt{R_1}E}{3(1-\mu^2)}\right]^{0,8} v_0^{0,4},$$

де ρ – густина матеріалу ударника та ПВ, кг/м^3; a – швидкість звуку в матеріалі ударника та ПВ, м/с; S_1, S_2 – площа перерізу ударника та ПВ відповідно, м^2; ω_1, ω_2 – власна частота коливань ударника та ПВ відповідно, Гц; E – модуль

пружності матеріалу ударника та ПВ, Па; μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу ударника та ПВ; R_1 – радіус торцевої частини ударника, м.

До удару швидкість ПВ v_{02} та швидкість ударника v_0 дорівнювали нулю.

Розв'язуючи диференціальне рівняння, визначимо шлях зближення a ударника та ПВ, його швидкість v_2, переміщення x_2, ударну силу F_1 і час співударяння t_1:

$$a = v_0\sqrt{\frac{\rho a S_1 S_2}{c\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}}\sin\sqrt{c\frac{(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)\omega_1\omega_2}{\rho a S_1 S_2}}t\ , \qquad (1)$$

$$v_2 = \frac{S_1 v_0}{\omega_1(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}\left(1 - \cos\sqrt{c\frac{(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)\omega_1\omega_2}{\rho a S_1 S_2}}t\right)\ , \qquad (2)$$

$$x_2 = \frac{S_1 v_0}{\omega_1(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}\left(t - \sqrt{\frac{\rho a S_1 S_2}{c(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}}\times\right.$$
$$\left.\times\sin\sqrt{c\frac{(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)\omega_1\omega_2}{\rho a S_1 S_2}}t\right), \qquad (3)$$

$$F = v_0\sqrt{\frac{c\rho a S_1 S_2}{\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}}\sin\sqrt{c\frac{(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)\omega_1\omega_2}{\rho a S_1 S_2}}\ , \qquad (4)$$

$$t = \pi\sqrt{\frac{\rho a S_1 S_2}{c\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}}\ . \qquad (5)$$

Отримані параметри залежать від власної частоти коливань ударника і ПВ, а також від їх площі. Зі зменшенням частоти власних коливань ударника та ПВ ударна сила і час співударяння збільшуються в степені 1/2.

При співударянні ударника з ПВ одночасно з інерційними коливаннями виникають хвильові. Для розрахунків хвильових коливань ПВ представлений у вигляді пружного тіла. При хвильових коливаннях внаслідок їх малого періоду інерційність дозволяє знехтувати ньютонівськими та сенвенанівськими складовими. При поздовжніх коливаннях поперечні перерізи залишаються плоскими, і кожна точка поперечного перерізу виконує тільки осьові

переміщення. Прийнято, що довжина поздовжніх хвиль коливань велика порівняно з розмірами поперечних перерізів стержня.

Вільні коливання ПВ описуються диференціальним рівнянням другого порядку в частинних похідних. При розв'язанні його методом Даламбера при кінцевих умовах $(du/dx)_{x=0} = 0, (du/dx)_{x=l} = 0$ власна частота ПВ визначається за формулою $\omega_2 = \pi a / l_2$, а амплітуда A коливань – за формулою

$$A = \frac{4v_0\sqrt{\dfrac{\rho a S_1 S_2}{\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}}}{\pi a \rho S_2\left(\sqrt{\dfrac{c\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}{\rho a S_1 S_2}} - \dfrac{\pi a}{2l_2}\right)}\sin\frac{\pi a}{2l_2}t, \qquad (6)$$

де l_2 – довжина ПВ.

Амплітуда власних коливань ПВ змінюється за синусоїдальним законом.

Для ІХТ з вторинним випромінювачем стержневого типу довжиною l_2 інтенсивність поглинання зовнішньої енергії оброблюваним середовищем $I(\omega)$ визначається за формулою

$$I(\omega) = 0{,}5a_0\rho_0 A_0^2\omega_0^2\frac{cl_2^2(S_1\omega_2 + S_2\omega_1)}{(\pi^2a^2 - 2\pi a\omega_0 l_2 + \omega_0^2 l_2^2)4\pi^2\rho a S_1 S_2 + cl_2^2(S_1\omega_2 + S_2\omega_1)}, \qquad (7)$$

де a_0, ρ_0, A_0, ω_0 – відповідно швидкість звуку, густина матеріалу, амплітуда та частота коливань частин ОС.

Збільшення інтенсивності поглинання енергії оброблюваним середовищем досягається зменшенням довжини ПВ.

За час $0 \le t < t_2$ в рідині формується ударна хвиля з тиском P_4. Вона переміщається по системі співвісних труб свердловини з швидкістю v_4:

$$v_4(x,t) = \frac{S_1 v_0}{\omega_1(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_1)}\left(1 - \cos\sqrt{c\frac{\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}{\rho a S_1 S_2}}t'\right)(t - x/a_1), \qquad (8)$$

де x – координата, м; t – час, с; $v(t)$ – зміна швидкості в момент часу $t_1 \le t < t_2$; a_1 – швидкість поширення звуку в рідині, м/с.

Тиск гідроударної хвилі $P_4(x, t)$ визначається за формулою

$$P_4(x,t) = w\left[\frac{S_1 v_0}{\omega_1(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_1)}\left(1 - \cos\sqrt{c\frac{\omega_1\omega_2(S_1/\omega_1 + S_2/\omega_2)}{\rho a S_1 S_2}}t'\right)\times\right. \\ \left.\times(t - x/a) - v_{03}\right] + P_{30}, \qquad (9)$$

де $w = \sqrt{\rho_1 E_1}$; ρ_1 – густина рідини в свердловині, кг/м^3; E_1 – приведений модуль пружності рідини та трубопроводу, Па; v_{03} – початкова швидкість закачуваної рідини, м/с; P_{30} – початковий тиск рідини в трубопроводі, Па.

Енергетичний потік хвильових коливань переміщається по стовпу рідини і досягає привибійної зони продуктивного пласта, руйнуючи адгезійний зв'язок між налиплими відкладеннями та металевою оболонкою труби.

При відкриванні нагнітального трубопроводу в рідині виникає гідроударна хвиля з тиском P_5 та швидкістю v_5. Вона поширюється по стовпу рідини до привибійної зони. Тиск гідроударної хвилі [2] визначається за формулою

$$P_5(x,t) = P_3(t)(t - x/c), \qquad (10)$$

а швидкість – за формулою

$$v_5(x,t) = v_0 + [P_3(t)(t - x/c) - P_0]/w. \qquad (11)$$

Робота ІХТ побудована на узгодженні інтенсивності відгуку ОС на зовнішні енергетичні потоки. Дослідженнями встановлено залежності та взаємозв'язки енергії випромінювання ІХТ з енергією поглинання оброблюваним середовищем. Математична модель відповідності енергії випромінювання енергії поглинання встановлює функціональні залежності в системі СІХТ. Практична цінність роботи – двократне підвищення ККД функціонування системи СІХТ.

Основні положення та рекомендації даної статті було використано при очищенні внутрішніх поверхонь трубопроводів від налиплих відкладень на промислах ДП "Ахтирканафтогаз", при відновленні та підвищенні

продуктивності нафтових свердловин на нафтодобувних підприємствах ВАТ "Укрнафта".

Імпульсно-хвильовий трансформатор був випробуваний на дев'яти свердловинах в Ахтирському НГДУ при спільному веденні робіт інститутом енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ "КПІ" та АТ "Нафтам".

Висновки

1. Підвищення ККД обробки матеріальних середовищ на 20–30% досягається узгодженням енергії випромінювання виконавчого органа з енергією поглинання оброблюваним середовищем з використанням імпульсно-хвильового трансформатора при керуванні енергетичними потоками.

2. Запропонований ІХТ коливань забезпечує підвищення продуктивності нафтових свердловин за рахунок узгодження енергії випромінювання виконавчого органа з енергією поглинання оброблюваним середовищем.

3. Керування енергетичними потоками ІХТ досягається перерозподілом енергії інерційних та хвильових коливань плунжера-випромінювача і підсиленням гідравлічних імпульсів, що виникають у рідині при гідравлічних ударах.

4. Коэфіцієнт передачі енергії удару в системі ударник–плунжер-випромінювач становить 0,79. При початковій швидкості ударника 9,02 м/с та масі 30 кг швидкість плунжера-випромінювача досягає 12,96 м/с при масі 11, 43 кг.

5. Максимальна ударна сила між ударником та плунжером-випромінювачем становила 73,7 кН. Шлях переміщення плунжера-випромінювача дорівнював 2,03 мм за час співударяння з ударником 0,000315 с.

1. *Александров Е.В., Соколинский В.Б.* Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 201 с.

2. *Тарко Л.М.* Волновые процессы в трубопроводах гидромеханизмов. – М.: Машгиз, 1963. – 183 с.