

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-12-76-2>
УДК 624.1+662.2

Бойко В.В., Ган О.В.

Інститут гідромеханіки Національної академії наук України

Ган А.Л.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХОВОГО ІМПУЛЬСУ МАЛОЩІЛЬНИХ ВИБУХОВИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ ПРОСАДНИХ ҐРУНТІВ

Анотація. В роботі на основі наведеної методики аналітично досліджено параметри імпульсу вибуху зарядів ігданіту, амоніту № 6 ЖВ та спінених ВР звичайної та після обробки ультразвуком. Встановлено залежність тиску на межі розподілу «продукт детонації – середовище» від часу, яка свідчить, що мінімальне значення пікового тиску спостерігається для спіненої ВР після обробки її ультразвуковим випромінюванням. Розроблено та обґрунтовано принципи управління вибуховим імпульсом шляхом регулювання вмістом і щільністю вибухових речовин (ВР) за рахунок ультразвукового випромінювання і спінення малощільних вибухових сумішей. Отримано залежність тривалості зростання вибухового імпульсу від радіусу заряду для різних типів малощільних вибухових речовин, яка свідчить, що найбільший час зростання вибухового імпульсу спостерігається для зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Встановлено, що найбільш значного практичного значення для ущільнення просадних ґрунтів можна досягти за рахунок застосування спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням, які при мінімальному значенні тиску на межі «продукт детонації – середовище» мають значну тривалість вибухового імпульсу, яка сприяє більш рівномірному ущільненню просадних ґрунтів на необхідну товщину.

Ключові слова: просадні ґрунти, вибуховий імпульс, вибухові речовини, ущільнення ґрунтів, тривалість вибухового імпульсу, щільність ВР, ультразвукове випромінювання.

Boiko Viktor, Han Olena

Institute of Hydromechanics of the
National Academy of Sciences of Ukraine

Han Anatoliy

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"

RESEARCH OF THE PARAMETERS OF THE EXPLOSIVE PULSE OF A LOW-DENSITY EXPLOSIVE MIXTURE FOR THE PRESSING OF COMPACTED SOIL

Summary. The rapid development of cities and their surroundings, the dense development and development of new territories is a phenomenon of a progressing civilization. In order to keep up with the pace of construction it is necessary to prepare the area in advance, taking into account their geological conditions. Considering the complexity and large scale of construction on compaction soils, their compaction remains the main issue. Control of impact on compaction of subsidence including compaction soils by directional change in explosive systems is of great importance in geotechnology during land reclamation and construction. Based on the above methodology, the explosive impulse of low-density explosives such as igdanite, ammonite 6 ZhV and foamed explosive mixture without and after treatment with ultrasonic radiation, is analytically investigated in the article. The time dependence of the pressure at the “detonation product – environment” interface has been established, which states that the minimum peak pressure is observed for a foamed explosive mixture after being treated with ultrasonic radiation. The principles of controlling an explosive pulse by adjusting the composition and density of explosives due to ultrasonic radiation and foaming low-density explosive mixtures have been developed and justified. The dependence of the duration of the growth of the explosive pulse on the radius of the charge for various types of low-density explosives was received, what that the longest growth time of the explosive pulse is observed for charges based on foamed explosive mixtures without and after processing by ultrasonic radiation. It has been established that the most significant practical value for compaction of subsidence soils can be achieved through the use of foamed explosive mixtures before and after handling with ultrasonic radiation, which with a minimum pressure on the surface “detonation product – environment” have a significant explosive pulse duration, which in turn will be to promote uniform compaction of subsidence soils to the required depth.

Keywords: subsidence soils, explosion impulse, explosive, soil compaction, explosive impulse duration, explosive composition density, ultrasonic radiation.

Постановка проблеми. Бурхливий розвиток міст, їх щільна забудова та освоєння нових територій – це явище прогресуючої цивілізації. Для того, щоб встигати за темпами будівництва, потрібно заздалегідь підготувати місцевість з урахуванням геологічних умов. Вважаючи складність та великі масштаби будівництва на просадних ґрунтах, важливим питанням

залишається їх ущільнення. Управління ущільненням просадних в т.ч. обводнених ґрунтів спрямованою дією вибухових систем має велике значення в геотехнології при меліоративних роботах і в будівництві.

Однією з основних задач таких систем є забезпечення мінімальної розбіжності напрямку поширення фронту детонації з напрямком, в якому по-

трібно забезпечити необхідний ефект ущільнення середовища. Фронт детонації і наступна за ним ударна хвиля розповсюджуються вздовж заряду таким чином, що максимальне навантаження в місці зустрічі фронту ударної хвилі з середовищем припадає на незначну площу донної частини заряду. Тиск в напрямку поширення фронту детонаційної хвилі значно більше, ніж в перпендикулярному до неї напрямку [1]. Тому бажано щоб зустріч детонаційної хвилі на контакті з середовищем відбувалась за умови максимально можливого співпадання нормалі до стінки вибухового заряду з нормаллю фронту детонаційної хвилі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Значні експериментальні дослідження параметрів масових вибухів, а також добір і удосконалення рецептури безтритилових вибухових композицій (на основі аміачної селітри (АС) в залежності від поставлених задач, характеристик ґрунтів і гірничо-геологічних умов ведення буровибухових робіт, були проведені ще в минулому сторіччі, в Інституті гідромеханіки НАН України. Сьогодні продовжує модернізуватись розробка та вдосконалення вибухових спінених систем на основі удосконалених ВР шляхом обробки їх ультразвуковим випромінюванням [2; 3], розробки конструкцій горизонтальних циліндричних зарядів для ущільнення просадних, в т.ч. обводнених ґрунтів.

Підвищення об'ємної концентрації енергії заряду шляхом збільшення щільності ВР призводить до зростання пікового тиску детонації, що в ряді випадків знижує коефіцієнт корисного використання енергії вибухового перетворення через великі втрати в ближній зоні дії вибуху [4]. Тому забезпечення необхідних параметрів вибухового імпульсу ВР для ущільнення просадних ґрунтів є **актуальною** задачею.

Мета статті. Метою та завданням даної статті є подальше розширення сфери застосування безтритилових ВР на основі аміачної селітри шляхом добору складу, зміни щільності вибухових систем, а також удосконалення методів управління вибуховим імпульсом та наукове обґрунтування його параметрів для ущільнення просадних в т.ч. обводнених ґрунтів. Необхідно провести аналітичну оцінку можливостей розроблених методів управління параметрами вибухового імпульсу малошільних вибухових сумішей для подальшого регулювання впливом на просадку ґрунтового середовища та розробки технологічних схем ущільнення просадних ґрунтів.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- аналітично дослідити вибуховий імпульс таких вибухових речовин, як ігданіт, амоніт №6 ЖВ та спінених ВР звичайної та після обробки ультразвуком.

- встановити залежність тиску на межі розподілу «продукти детонації – середовище» від часу, а для спінених ВР дослідити вибуховий імпульс звичайної та після обробки ультразвуком.

- розробити та обґрунтувати принципи управління вибуховим імпульсом шляхом регулювання вмістом і щільністю вибухових речовин (ВР).

- встановити залежність тривалості зростання вибухового імпульсу від радіусу заряду для різних типів малошільних вибухових речовин.

Викладення матеріалу дослідження. На даний час для ущільнення територій просад-

них нестійких ґрунтів за рахунок застосування енергії вибуху спеціальних машин немає. Проте є розроблений спеціальний пристрій [5] для приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту, що включає бункер аміачної селітри, ємностей ПАР, води, водного розчину ПАР, механічний змішувач, в якому проходить змішування ПАР з водою, введення аміачної селітри, перемішування суміші механічним шляхом, крім того він містить низькошвидкісний механічний змішувач, накопичувальну ємність, насос, сопло, ежектор, вентиль-дозатор повітря і пінний ствол; механічне змішування ПАР і селітри проводять в низько швидкісному режимі без спінювання суміші, подачі цієї суміші під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованої аерацією її за рахунок ежекування повітря потоком суміші з прямою видачею спіненого вибухового композиту на місце застосування.

Пристрій дозволяє проводити ущільнення територій просадних ґрунтів шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт з покриттям шаром піносуспензії ґрунту або виїмки в ньому із можливим застосуванням м'якої оболонки і подальшим підривом вибухового композиту ниткою детонаційного шнура (ДШ).

При дослідженні параметрів вибухового імпульсу для ущільнення територій просадних ґрунтів за рахунок поверхневих або горизонтальних циліндричних зарядів вибухових речовин вимагається обмеження бризантної дії зарядів вибухових речовин. Цього можна досягти за рахунок застосування малошільних вибухових сумішей, спінених вибухових композицій, обробкою їх ультразвуковим випромінюванням, тощо. Аналіз попередніх досліджень при вирішенні задачі знаходження радіусу зони ущільнення ґрунтів навколо свердловини [1–6] малошільними спіненими композиціями показав, що необхідним є визначення тиску на їх контакті «продукти детонації – середовище». Ґрунтуючись на численних експериментальних даних дослідники вважають, що ефективність ущільнення просадних ґрунтів при застосуванні вибуху визначається не тільки максимальним тиском на фронті детонаційної хвилі, але і тривалістю вибухового імпульсу. Це проявляється у збільшенні загальних форм роботи вибуху на великих відстанях від заряду, а відповідно в покращенні ущільнення ґрунтового масиву на значній відстані.

У зв'язку з цим необхідно дослідити взаємозв'язок ефективності вибухових речовин (ігданіт, амоніт №6 ЖВ) і спіненої вибухової композиції як звичайної, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням (ПАР з УЗ) для ущільнення просадних водонасичених ґрунтів з максимальним тиском, тривалістю і формою вибухового імпульсу, який виникає на межі «продукти детонації – середовище».

При розрахунках вибухового імпульсу штатних вибухових речовин (ігданіт, амоніт №6 ЖВ) і спінених вибухових композицій з обробкою ультразвуковим випромінюванням та без, використовувалася методика, розроблена Н. Н. Козаковим [7].

При виході детонаційної хвилі на межу розділу «продукти детонації – середовище» виникає ударна хвиля, початковий тиск якої визначається рішенням системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_n = \sqrt{(P_{max} - P_0) \cdot (v_0 - v)} \\ P_{max} = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right] \\ U_n = \frac{D}{K+1} \left(1 - \sqrt{2K} \frac{\frac{P_{max}}{2P_{cp}} - 1}{\sqrt{(K+1) \frac{P_{max}}{2P_{cp}} + (K-1)}}} \right) \quad \text{при } P_{max} > P_{cp} \\ U_n = \frac{D}{K+1} \left\{ 1 + \frac{2K}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_{max}}{2P_{cp}} \right)^{\frac{K-1}{2K}} \right] \right\} \quad \text{при } P_{max} < 2P_{cp} \end{array} \right. \quad (1)$$

де: P_{max} – початковий тиск на фронті ударної хвилі; $v_0 = \frac{1}{\rho_0}$ – питомий об'єм незбуреного середовища; $v = \frac{1}{\rho}$ – питомий об'єм середовища на фронті ударної хвилі; D – швидкість детонації; P_{cp} – тиск в свердловині за умови миттєвої детонації.

$$P_{cp} = (k-1) \rho_0 Q_v \quad (2)$$

$Q_v = 427 \cdot Q \cdot g$ – теплота вибуху одиниці маси ВР; Q – теплота вибуху ВР; $g = 9.81 \text{ Н/м}^2$ – прискорення сил тяжіння; $k = 3$ – показник ізоентропи при переущільненому стані продуктів детонації.

$$B = \frac{\rho c^2}{n} \quad (3)$$

ρ – щільність середовища; c – швидкість вибухової ударної хвилі, в твердому середовищі приймається рівною швидкості звуку в незбуреному середовищі.

В умовах реальної детонації тиск на межі розподілу «продукти детонації – середовище» описується наступними залежностями.

$$P_r = \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \left[\left(P_{max} \frac{r'' - r}{r'' - r_0} \right) + P_{min} \left(1 - \frac{r'' - r}{r'' - r_0} \right) \right] \quad \text{при } r_0 < r < r'' \quad (4)$$

$$P_r = \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \left[\left(P_{min} \frac{r'' - r}{r'' - r''} \right) + P_{cp} \left(1 - \frac{r'' - r}{r'' - r''} \right) \right] \quad \text{при } r'' < r < r'' \quad (4)$$

$$P_r = P_{cp} \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \quad \text{при } r'' < r < r'$$

$$P_r = P_r' \left(\frac{r'}{r} \right)^{2\gamma} \quad \text{при } r > r'$$

r'' – положення межі розподілу, на якій тиск за рахунок вирівнювання досягає мінімуму; r_0 – радіус заряду; r – радіус межі розподілу «продукти детонації – середовище»; γ – показник ізоентропи ідеального газу, який становить $\gamma = 1,3$

Невідомі величини P , r'' і r''' визначаються з співвідношень:

$$\begin{aligned} P_{min} &= 1.4P_{cp} - 0.4P_{max} \\ r''' &= r_0 \left(1 - K_1 \frac{U_H}{D} \right) \\ r'' &= r_0 \left(1 + K_2 \frac{U_H}{D} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

де $K_1 = 0.6$; $K_2 = 1.7 \div 2.5$ – безрозмірні коефіцієнти. Ділянку шляху від r_0 до r''' межа розподілу пройде за час

$$t_1 = 0.64 \frac{r_0}{D} \quad (6)$$

а ділянку шляху $r''' - r''$ – відповідно за час

$$t_2 = \frac{1.2r_0 + 2r''}{D} \quad (7)$$

При цьому тиск P_r становитиме: в момент часу t_1 :

$$P_r = P_{min} \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6 \quad (8)$$

в момент часу t_2 :

$$P_r = P_{cp} \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6 \quad (9)$$

а при $t = 0$:

$$P_r = P_{max}$$

Графік залежності P_r від t апроксимується залежністю:

$$P = P_0 e^{-\alpha t} \quad (10)$$

де α – логарифмічний декремент загасання, що залежить від властивостей середовища. Коефіцієнти P_0 і α знаходяться з рівнянь:

$$\text{при } t = 0 \quad P = P_0 = P_{max} \quad (11)$$

$$\text{при } t = t_1 \quad P_r' = P_{min} \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6$$

Звідси отримуємо:

$$\alpha = \frac{\ln P_{max} - \ln P_r'}{t_1} \quad (12)$$

Час зростання вибухового імпульсу визначається за формулою:

$$\tau = \frac{0.4r_0}{\frac{3}{4}D} \quad (13)$$

Користуючись основними співвідношеннями, наведеними вище, проведений розрахунок параметрів вибухового імпульсу для різних ВР від вибуху зарядів радіусом 30 мм в супісках. Основні вихідні дані наведено в табл. 1.

Як приклад, наведемо розрахунок параметрів вибухового імпульсу для амоніту № 6ЖВ

$$P_{cp} = Q_v \rho_0 (K-1) = 427 \cdot 1030 \cdot 800 \cdot 2 \cdot 9.8 = 6.89 \cdot 10^9, \text{ Н / м}^2$$

$$B = \frac{\rho c^2}{4} = \frac{2.8 \cdot 10^3 (4.95 \cdot 10^3)^2}{4} = 17.15 \cdot 10^9, \text{ Н / м}^2$$

Вирішуючи рівняння (1-9), знаходимо:

$$P_{max} = 8.19 \cdot 10^9 \text{ Н / м}^2$$

$$U_n = 1370 \text{ М/с}$$

$$P_{min} = 1.4P_{cp} - 0.4P_{max} = 6.37 \cdot 10^9 \text{ Н / м}^2$$

$$t_1 = 0.64 \frac{r_0}{D} = \frac{0.64 \cdot 0.03}{3700} = 5.1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$r''' = r_0 \left(1 + K_1 \frac{U}{D} \right) = 0.03 \left(1 + 0.6 \frac{1370}{3700} \right) = 0.0367 \text{ мм}$$

Фізичні і динамічні характеристики ВР

Найменування	Показники			
	амоніт № 6ЖВ	Ігданіт	спінена ВР	спінена ВР, оброблена ультразвуком
Щільність ВР, ρ_0 г/см ³	0,8	0,8	0,6	0,5
Швидкість детонації D , м/с	3700	3450	1500	1500
Теплота вибуху Q , ккал/кг	1030	870	850	840
Щільність середовища ρ , кг/м ³	2800	2800	2800	2800
Швидкість розповсюдження ударної хвилі, с м/с	4950	4950	4950	4950
Радіус заряду, r_0 , м	0,03-0,09	0,03-0,09	0,03-0,09	0,03-0,09

Джерело: розробка (вдосконалення) авторів за [8]

$$r'' = r_0 \left(1 + K_2 \frac{U}{D} \right) = 0.03 \left(1 + 2.1 \frac{1370}{3700} \right) = 0.0533 \text{ м}$$

$$t_2 = \frac{1.2r_0 + 2r''}{D} = \frac{1.2 \cdot 0.03 + 2 \cdot 0.0533}{3700} = 38.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$\text{при } t = 0 \quad P_r = P_{max} = 8.19 \cdot 10^9, \text{ Н / м}^2$$

$$\text{при } t = t_1$$

$$P_r' = \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6 P_{min} = \left(\frac{0.03}{0.0367} \right)^6 \cdot 6.37 \cdot 10^9 = 1.9 \cdot 10^9 \text{ Н / м}^2$$

$$\text{при } t = t_2$$

$$P_r = \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6 P_{cp} = \left(\frac{0.03}{0.0533} \right)^6 \cdot 6.89 \cdot 10^9 = 0.22 \cdot 10^9 \text{ Н / м}^2$$

$$\alpha = \frac{l_n P_{max} - l_n P_r'}{t_1} = \frac{l_n (8.19 \cdot 10^9) - l_n (1.9 \cdot 10^9)}{(5.1 \cdot 10^{-6})} = 2.86 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$$

$$\tau = \frac{0.4r_0}{3/4 D} = 4.3 \text{ мкс}$$

Розрахунки за даною методикою для амоніту не враховують ширину зони хімічної реакції, тому не можуть з достатньою точністю описувати процес наростання тиску на межі розподілу, що відбувається під час вибуху ВР з широкою зоною реакції, якими є ігданіт і спінена ВР. У цих ВР зростання тиску на межі розподілу відбувається не стрибком, а поступово, від нуля до максимального значення за час походження детонаційною хвилею ділянки, рівної ширині зони хімічної реакції.

Зміна тиску на межі розподілу визначається за формулою:

$$P_r = \frac{P'Dt}{b} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2k} \quad \text{при } 0 < t < t' \quad (14)$$

де P' – початковий тиск на межі розподілу, що визначається за методикою, викладеною вище; D – швидкість детонації; t – час; b – ширина зони хімічної реакції; r_0 – радіус заряду; r – радіус свердловини; t' – час наростання пікового тиску.

З огляду на це розраховані параметри вибухового імпульсу на межі розподілу при підірванні зарядів ігданіту і спіненої ВР.

Рішення цієї задачі в інтервалі часу від 0 до t' зводилося до вирішення диференціального рівняння:

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{2r(P_r - P_0) - 2\rho_0 c R \bar{U}}{\rho_0' \cdot r_0^2 + \rho_0 (R^2 - r_0^2)} \quad (15)$$

– де: \bar{U} – середня швидкість середньої маси; P_0 – атмосферний тиск; R – радіус фронту хвилі збудження.

За даними розрахунків на рис.1 графічно наведено вибухові імпульси для амоніту № 6 ЖВ, ігданіту та спіненої ВР при підірванні зарядів ВР радіусом 30 мм у просядних лесових ґрунтах. На рис. 2 наведено час зростання вибухового імпульсу наведених ВР.

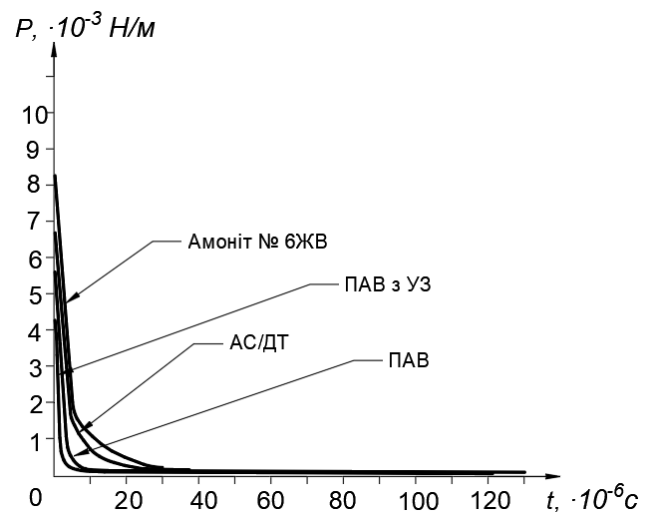


Рис. 1. Залежність тиску на межі розподілу «продукт детонації – середовище» від часу

Джерело: розробка авторів

Як видно з рис. 1, у зарядах на основі спінених ВР головна частина вибухового імпульсу має мінімальне пікове значення тиску і максимальну тривалість, як для ВР з найменшою швидкістю детонації і найбільшою шириною зони хімічної реакції. При цьому тиск спіненої ВР після обробки ультразвуковим випромінюванням дещо менший, ніж у звичайної спіненої ВР, але при цьому менша тривалість вибухового імпульсу.

Аналіз теоретичних досліджень свідчить, що максимальний тиск спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, становить $4,18 \cdot 10^9$ Н/м², що на 49% менше порівняно з амонітом № 6 ЖВ і на 40% менше порівняно з ігданітом. Для звичайної спіненої ВР максимальний тиск становить $5,52 \cdot 10^9$ Н/м², що на 33% менше порівняно з амонітом № 6 ЖВ і на 20% порівняно з ігданітом. При цьому максимальна тривалість

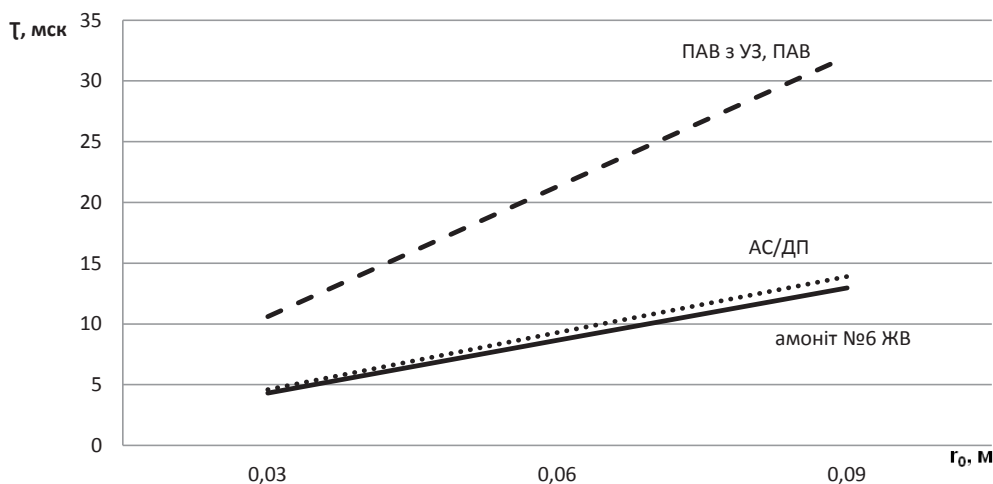


Рис. 2. Залежність тривалості зростання вибухового імпульсу від радіусу заряду ВР

Джерело: розробка авторів

вибухового імпульсу на межі «продукти детонації – середовище» для спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, становить $122,3,4 \cdot 10^{-6}$ с, тобто в 3,2 рази більша порівняно з амонітом № 6 ЖВ і в 3 рази більша порівняно з ігданітом. Для звичайної спіненої ВР максимальна тривалість вибухового імпульсу становить $135,4 \cdot 10^{-6}$ с, що в 3,5 рази більша порівняно з амонітом № 6 ЖВ і в 3,37 рази більша порівняно з ігданітом.

Аналогічна закономірність спостерігається і при дослідженні тривалості зростання вибухового імпульсу, яка для спієних ВР, як звичайних, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням знаходиться в межах від 10,6 мкс до 32 мкс. Для амоніту № 6 ЖВ цей параметр становить – від 4,3 мкс до 12,97 мкс, для ігданіту – від 4,6 мкс до 13,91 мкс.

Лесові ґрунти при природній вологості є достатньо міцними основами. Їм властива мала стискаємість з модулем деформації 20-50 МПа і більше. При замочуванні різко погіршуються їх первісні властивості, і вони стають просадними. Зі збільшенням вологості модуль деформації зменшується до 3-5 МПа, а іноді і до 1 МПа. Тому розроблені вище способи керування параметрами малоцільних ВР дозволяють визначити характер ущільнення лесових просадних ґрунтів в залежності від їх стану та обрати раціональні технологічні схеми вибуху для ущільнення території цих ґрунтів покритих поверхневими або горизонтальними циліндричними зарядами вибухових речовин із застосуванням спієних ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Останні мають перспективу широкого застосування при будівництві промислових і житлових об'єктів в областях України таких як Дніпропетровська, Запорізька, Ніколаївська й інших, території яких покриті шаром лесових ґрунтів.

Отже, дані теоретичних розрахунків свідчать про те, що найбільшого ефекту при ущільненні просадних ґрунтів можна досягти за рахунок застосування спієних ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням, які при мінімальному значенні тиску на межі

«продукт детонації – середовище» мають значну тривалість вибухового імпульсу, що в свою чергу має сприяти рівномірному ущільненню просадних ґрунтів на необхідну товщу.

Висновки та рекомендації. 1. Встановлено параметри вибухового імпульсу на межі розподілу «продукти детонації – середовище» для різних типів промислових ВР.

2. Отримано залежність максимального тиску на фронті детонаційної хвилі для різних типів ВР від тривалості вибухового імпульсу, яка свідчить що найменший піковий тиск при найдовшій тривалості вибухового імпульсу спостерігається для зарядів на основі спієних ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Максимум тиску цих ВР менше на 20-49%, а тривалість вибухового імпульсу довша в 3-3,5 порівняно зі стандартними малоцільними ВР.

3. Час зростання вибухового імпульсу зарядів на основі спієних ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням в 2,3 рази більший, ніж для амоніту № 6 ЖВ і в 2,47 рази більший за ігданіт.

4. Низьке значення пікового тиску детонації, яке досягається шляхом зниження щільності ВР, зменшує об'ємну концентрацію енергії зарядів, що, в свою чергу, підвищить коефіцієнт корисного використання енергії вибухового перетворення в дальній зоні.

5. Найбільшої ефективності при ущільненні просадних ґрунтів можна досягти при застосуванні спієної ВР за рахунок дії вибуху на значній відстані від заряду, а відповідно, рівномірному і кращому ущільненню на необхідну глибину.

6. Розроблені способи керування параметрами шару малоцільної ВР для визначення характеру ущільнення просадкових ґрунтів дадуть можливість обрати раціональні технологічні схеми вибуху для ущільнення території просадних ґрунтів покритих поверхневими або горизонтальними циліндричними зарядами вибухових речовин із застосуванням спієних ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням

Список літератури:

1. Литвин Л.Н. Новые методы разрушения и механика горных пород. Киев : Наукова думка, 1981. С. 136–140.
2. Васильчук О.С., Вапнічна В.В., Ган А.Л. Вплив ультразвукового опромінення на утримуючу здатність аміачної селітри. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*. 2018. № 1(81). С. 217–222. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-217-222](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-217-222)
3. Ган О.В., Бойко В.В., Ган А.Л., Кравець В.Г., Вапнічна В.В. Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення. *II міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики»*. (Київ, травень 2019 р.). Київ, 2019. URL: <https://geobud.kpi.ua/conference/problemugeoingzhenerii2/772>
4. Садовский М.А. Механический эффект подземного взрыва. Москва : «Недра», 1971. 221 с.
5. Пристрій для приготування водонаповненої вспіненої вибухової композиції: патент UA № 122425, МПК: E21C 37/00, заявл. 30.06.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1. 3 с.
6. Бойко В.В., Ган А.Л., Ган О.В. Ущільнення просадкових ґрунтів вдосконаленими зарядами малої щільності. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. № 55. С. 152–161. URL: <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/17.pdf>
7. Казаков Н.Н. Разрушение горной породы ударным действием взрыва. Москва : ИГД им. А.А. Скочинского, 1966.
8. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. Москва : «Надра», 1980. 545 с.

References:

1. Litvin, L.N. (1981). New methods of fracture and rock mechanics. Kiev: Scientific Thought, pp. 136–140.
2. Han, A.L., Vapnichna, V.V., and Vasilchuk, O.S. (2018). Vplyv ultrazvukovogo oprominenya na utrymuyuchu zdattnist amiachnoy selitry. *Visnyk Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu, Serija Tehnichni nauky*, no. 2(80), pp. 181–188. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-217-222](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-217-222)
3. Han, O.V., Boyko, V.V., Han, A.L., Kravets, V.G., & Vapnichna, V.V. (2019). Changes in the porosity and retention capacity of ammonium nitrate under the influence of ultrasonic irradiation. *II International Scientific and Technical Conference "Problems of Geoengineering and Underground Urbanism"*. Kyiv, may 2019. URL: <https://geobud.kpi.ua/conference/problemugeoingzhenerii2/772>
4. Sadovsky, M.A. (1971). Mechanical effect of underground explosion. Moscow: Nedra, 221 p.
5. Boiko, V.V., Prykhodko, Yu.P., Honchar, V.K., Zolotukhin, K.S., Orlov, Yu.Iu., Pluzhnyk, V.I., & Han, O.V. (2018). Prystriy dlya prihotuvannya vodonapovnenoi vspinenoi vybukhovoї kompozycji. Patent na korysnu model UA № 122425
6. Bojko, V.V., Han, A.L., and Han, O.V. (2018). Compaction drawdown soil improved low density charge. *Zbirnyk naukovykh prats Nationalnogo gornichogo universytetu*, no. 55, pp. 152–161. URL: <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/17.pdf>
7. Kazakov, N.N. (1966). The destruction of rock by the impact of the explosion. Moscow: IGD of AA Skochinsky.
8. Kuk, M.A. (1980). The science of industrial explosives. Moscow: Nadra, 545 p.