

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В.В. Бойко, А.Л. Ган, О.В. Ган

СПЕЦІАЛЬНІ ВИБУХОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ГЕОІНЖЕНЕРІЇ

Монографія

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

УДК 624.138 + 622.235

Б 77

Рецензенти: *Калюх Ю.І.*, доктор технічних наук, професор, заступник завідувача відділу Державного підприємства «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП НДІБК)

Коробійчук В.В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри розробки родовищ корисних копалин ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка»

Відповідальний редактор *Ган А.Л.*, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінженерії навчально наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського

Гриф надано Вченою Радою ІГМ НАН України (протокол № 3 від 20 січня 2022 р.)
Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 4 від 27.06.2022 р.)

Монографія

Віктор Вікторович Бойко, д-р техн. наук, проф.

Анатолій Леонідович Ган, канд. техн. наук, доц.

Олена Валеріївна Ган, канд. техн. наук.

СПЕЦІАЛЬНІ ВИБУХОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ГЕОІНЖЕНЕРІЇ

Бойко В.В., Ган А.Л., Ган О.В.

Б 77 Спеціальні вибухові технології в геоінженерії [Текст]: Монографія / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 316 с.
ISBN 978-617-581-542-7

В монографії розглянуто комплекс теоретичних та практичних питань із застосування вибухових технологій в геоінженерії ґрунтового масиву для розмінування територій, об'ємних вибухів і ущільнення ґрунтового масиву під забудову та ущільнення злітних смуг на польових летовищах, що оснований на розробці рецептур вибухових речовин (ВР) та їх використанні з імпульсними характеристиками, наближеними до швидкості розповсюдження хвиль в цьому масиві, при керуванні якими можна досягти направлено ударних або резонансних явищ у ґрунтовому масиві, або затухання хвильових процесів, що призведе до зміни фізико-механічних і сейсмопровідних характеристик даної ділянки.

Для наукових працівників, викладачів, аспірантів, студентів а також широкого кола інженерно-технічних фахівців і проектувальників при використанні спеціальних вибухових технологій у будівельній і гірничій справах а також при дослідженні дії енергії вибуху у ґрунтах і гірських породах.

ISBN 978-617-581-542-7

© В. В. Бойко, А. Л. Ган, О. В. Ган, 2022

© ІГМ НАН України

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

© ПП “Рута”, 2022

ЗМІСТ

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	11
1.1. Основні фізико-механічні властивості гірських порід	11
1.2. Динамічні властивості гірських порід	18
1.3. Загальна характеристика структурно-нестійких ґрунтів	23
1.4. Методологія досліджень	26
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСАДНИХ СТРУКТУРНО- НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ	29
2.1. Фізико-хімічні способи ліквідації просадних властивостей структурно- нестійких ґрунтів	29
2.2. Фізико-механічні способи ліквідації просадних властивостей структурно- нестійких ґрунтів	34
2.3. Керування вибуховим імпульсом як спосіб дії на середовище	39
2.4. Застосування малоцільних вибухових речовин при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів	44
РОЗДІЛ 3. НИЗЬКОШВИДКІСНІ РЕЦЕПТУРИ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ПРОСАДНИХ ҐРУНТІВ	52
3.1. Добір компонентного складу малоцільних вибухових речовин підвищеної стабільності	52
3.1.1. Сумішеві вибухові склади.....	52
3.1.2. Сумішеві склади на основі утилізованих вибухових речовин	59
3.1.3. Спінені вибухові композиції.....	61
3.2. Формування вибухових характеристик вдосконалених малоцільних вибухових речовин	66
3.2.1. Параметри детонації сумішевих вибухових речовин.....	66
3.2.2. Параметри детонації спінених вибухових композицій	67
3.2.3. Термодинамічні та екологічні характеристики сумішевих складів на основі утилізованих вибухових матеріалів	68

3.2.4. Вибухові характеристики низькошвидкісних сумішевих вибухових речовин на основі утилізованих вибухових речовин	73
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	78
4.1. Формування зовнішньої та внутрішньої структури гранул аміачної селітри при дії ультразвукового випромінювання	78
4.2. Зміна пористості аміачної селітри в наслідок дії ультразвукового випромінювання	83
4.3. Вплив ультразвукового випромінювання на утримуючу здатність аміачної селітри	93
4.4. Формування вибухових параметрів спінених водонаповнених композицій оброблених ультразвуковим випромінюванням	101
РОЗДІЛ 5. АНАЛІТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ВИБУХОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ	105
5.1. Аналітичне оцінення можливостей керування параметрами вибухового імпульсу для регулювання впливу на ґрунтовий масив	105
5.2. Теоретичний розрахунок параметрів вибухового імпульсу на межі розподілу вибухова речовина – ґрунтовий масив	115
5.3. Оцінка параметрів вибухового імпульсу за допомогою спектральних характеристик	123
5.4. Дослідження амплітудно-частотного спектру у хвиль напружень в структурно-нестійких ґрунтах	131
РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ВИБУХОВИМ ІМПУЛЬСОМ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСАДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ.....	138
6.1. Керування вибуховим імпульсом за допомогою короткоуповільненого підривання	138
6.2. Керування хвилею вибуху за допомогою екранування	143
6.3. Дія вибуху групових свердловинних зарядів	151
РОЗДІЛ 7. ЛАБОРАТОРНІ І ПОЛІГОННІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ ВДОСКОНАЛЕНИМИ МАЛОЩІЛЬНИМИ ВИБУХОВИМИ РЕЧОВИНАМИ.....	167

7.1. Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вдосконаленими малощільними вибуховими речовинами	167
7.2. Вплив зміни фізико-механічних характеристик на просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів	181
7.3. Розробка пристроїв і способу приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції	193
7.4. Техніко-економічні рекомендації ущільнення структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху	203
РОЗДІЛ 8. СЕЙСМОБЕЗПЕКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИБУХІВ	212
8.1. Теоретичні засади формування сейсмічних коливань від дії вибуху зарядів	212
8.2. Особливості проведення техногенних вибухів та їх сейсmobезпека	220
8.3. Оцінка сейсmobезпеки будівель різного технічного стану при техногенних вибухах	230
8.4. Прогнозування сейсmobезпеки короткосповільнених вибухів при неелектричній системі ініціювання з урахуванням суперпозиції хвиль	245
8.5. Алгоритм визначення сейсmobезпечних параметрів вибухів і відстаней	254
8.6. Керування інтенсивністю сейсмічного сигналу екрануванням	260
8.7. Технологічні параметри методу екранування для керованого подрібнення масиву зарядами в рукавах	268
8.8. Апаратурні комплекси для дослідження оцінки впливу сейсмічних та ударної повітряної хвиль на довкілля і визначення допустимих норм під час проведення вибухових робіт	280
ВИСНОВКИ.....	298
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	302

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- АС – аміачна селітра
АП – алюмінієва пудра
АТВ – адіабатичний тепловий вибух
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВМ – вибухові матеріали
ВП – вугільний пил
ВР – вибухова речовина
ДП – дизельне пальне
ДХ – детонаційна хвиля
ДШ – детонаційний шнур
КБ – кисневий баланс
КСВ – короткосповільнений вибух
МВ – масовий вибух
МС – морська суміш
ОВД – оцінка впливу на довкілля
ПАР – поверхнево-активна речовина
ПД – продукти детонації
ППС – пінополістирол
СВХ – сейсмовибухова хвиля
СНІЗ – система неелектричного ініціювання зарядів
СФ – сульфонал
УВР – ударна (стиснута) вибухова речовина
УЗ – ультразвук
УЗВ – ультразвукове випромінювання
УЗХ – ультразвукові хвилі
УХ – ударна хвиля

ВСТУП

Територію нашої країни понад 2/3 її частини займають структурно-нестійкі ґрунти, значна площа якої відведена під забудову. Головною особливістю структурно-нестійких ґрунтів є високий ступінь їх просідання (до 40 %) при зволоженні. Існуючі методи і способи усунення просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів здійснюються:

– у межах верхньої зони просідання або її частини – важкими трамбівками, влаштуванням ґрунтових подушок, втрамбовуванням котлованів, хімічним або термічним закріпленням;

– у межах всієї просадної товщі – глибинним ущільненням ґрунтовими палями; глибинними вибухами з попереднім замочуванням ґрунтів основи, хімічним або термічним закріпленням.

Серед недоліків більшості наведених способів є працемісткість, тривалість виконання операцій, необхідність застосування матеріалів і спеціального обладнання, значна вартість. Останнє стосується найбільш продуктивних вибухових методів ущільнення через їх залежність від вартості традиційних промислових вибухових речовин з відповідними детонаційними характеристиками та з необхідністю дотримання умов безпеки цих робіт.

Застосування інтенсивних вибухових методів ущільнення ґрунтових масивів зобов'язує по-новому осмислити і оцінити сформоване уявлення про аспекти динаміки ґрунтів, які полягають у першочерговому вивченні механізму формування полів напружень і деформацій в масиві в залежності від режиму його динамічного навантаження. Згідно з основними засадами динаміки ґрунтових масивів ефективний імпульсний режим ущільнення структурно-нестійкого ґрунту полягає в зниженні максимуму пікового навантаження з одночасним збільшенням тривалості дії імпульсу. Штатні вибухові речовини (ВР) з достатньо високими детонаційними параметрами за окремими виключеннями не задовольняють цій умові, що послугувало приводом досліджень, спрямованих на застосування спінених малоціільних, низькодетонаційних ВР для вирішення задач геодинаміки ґрунтових масивів.

Викладення бачення проблем авторського колективу, виявлених у результаті проведеного аналізу фактичного стану існуючих складів рецептур малощільних ВР на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри у вибухових технологіях потребують їхнього удосконалення як самих параметрів таких вибухових речовин (ВР), так і розробки способу приготування та пристрою для рівномірного покриття необхідної площі просадних ґрунтів, оскільки питання вдосконалення рецептур безтритилових вибухових речовин - малощільних спінених вибухових сумішей необхідно вирішувати в комплексі з механізацією їх виготовлення. Цій проблемі і присвячена дана монографія. В ній розглянуто та узагальнено результати наступних напрямків досліджень при застосуванні вибухових технологій в геоінженерії ґрунтового масиву:

– проведення теоретичних і експериментальних досліджень, обробка одержаних результатів щодо винаходу як нових рецептур ВР з ощадливими детонаційними характеристиками так і удосконалення існуючих спінених малощільних, низькошвидкісних ВР для вирішення конкретних задач геодинаміки ґрунтових масивів як для цивільної так і оборонної сфер діяльності, оскільки штатні вибухові речовини (ВР) з достатньо високими детонаційними параметрами, за окремими виключеннями, не відповідають таким умовами.

– формування необхідних вибухових параметрів малощільних ВР за рахунок попередньої обробки компонентів фізичними полями, розробка пристроїв і способів їхнього приготування та нових технологічних схем при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів під забудову, створення злітних смуг на польових летовищах, розмінуванні місцевості тощо, шляхом покриття їх поверхні шаром пінистої вибухової суспензії з підриванням вибухового композиту існуючими засобами ініціювання.

В монографії розглянуто способи формування необхідних параметрів вибухового імпульсу зарядів малощільних спінених вибухових композицій в технологіях ущільнення структурно-нестійких ґрунтів. Запропоновано спосіб розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту виконання робіт з покриттям поверхні ґрунтового масиву

шаром пінної суспензії з подальшим підриванням заряду. Встановлено, що така технологія перспективна і для ущільнення ґрунтів під злітні смуги на польових летовищах шляхом переміщення пінного ствола вздовж злітної смуги.

Особливу увагу приділено впливу ультразвукового випромінювання на структуру і фізико-механічні характеристики аміачної селітри та на детонаційні характеристики спінених вибухових композицій з метою забезпечення стабільності запропонованих сумішевих спінених композицій і встановлено, що після обробки ультразвуковим випромінюванням гранул різних типів аміачної селітри (АС) суттєво збільшується її утримуюча здатність за рахунок збільшення активної площі поверхні, яка виникає в наслідок перерозподілу відкритої і закритої пористості як для щільної так і пористої АС.

Теоретично розглянуто вибуховий імпульс на межі розподілу ВР – ґрунтовий масив для вдосконалених спінених ВР у порівнянні зі штатними, а саме амонітом №6 ЖВ та ігданітом і встановлено, що максимальний тиск спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням на 49 % менше за амоніт №6 ЖВ і на 40 % за ігданіт.

Розроблено та запропоновано пристрої для приготування вибухових композицій, в яких механічне змішування розчину ПАР і аміачної селітри проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованою аерацією його за рахунок ежектування повітря потоком суміші з прямоочною видачою спіненої вибухової композиції до місця застосування.

У рукописі поставлено і розглянуто на теоретично-методичному та експериментальному рівнях наявні проблеми наукового, технічного і нормативного характеру щодо обґрунтування принципово нових напрямків підвищення сейсмобезпеки вибухових робіт для захисту довкілля. Отримано формулу для визначення коефіцієнта зменшення сейсмічного ефекту при короткоуповільненому підриванні. Запропоновано застосування екранованих прошарків при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів, за допомогою якого можна суттєво знизити сейсмічний ефект. Теоретично та експериментально розглянуто вплив від дії групи циліндричних зарядів. Отримано формулу для визначення поля напружень від вибухової дії групи зарядів на ґрунтовий масив.

Запропоновано метод розрахунку сейсмосахисних перешкод та отримано формулу для визначення коефіцієнта екранування. Сформульовано критерій формування плоского фронту вибухової хвилі при дії вибуху групи циліндричних зарядів. Приведені опис і характеристики різних сучасних апаратурних комплексів та дослідження щодо їх вибору для запису параметрів сейсмічних і ударної повітряної хвиль і одержання амплітудно-частотних характеристик з використанням обладнання виробника Instantel (Canada), для реєстрації сейсмічних коливань і ударно-повітряних хвиль, а також комплекс ноутбук + аналого-цифровий перетворювач + сейсмоприймачі.

У монографії використано і узагальнено результати науково-дослідних робіт науково-дослідної лабораторії з проблем сейсмічної безпеки ІГМ НАНУ, КПІ ім. Ігоря Сікорського та НВП "СКТБ ГЕОФІЗИК", в яких автори брали участь, як співавтори патентів та науковий праць.

Розділ 1. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

1.1. Основні фізико-механічні властивості гірських порід

Головними технологічними завданнями при веденні гірничо-будівельних робіт (у першу чергу, при забезпеченні стійкості структурно-нестійких ґрунтів) є ущільнення ґрунтового масиву за допомогою енергії вибуху з одержанням необхідного рівномірного ступеня ущільнення в максимально можливому об'ємі. При цьому надзвичайно важливим є узгодження параметрів зарядів ВР (їх кількості, вибухових властивостей, розміщення по масиву) з фізико-механічними та динамічними властивостями порід. При проектуванні вибухових робіт останні є вихідною інформацією першочергового значення: чим більш достовірними даними володіє проектувальник і організатор вибухових робіт, тим ефективнішими будуть їх результати.

Властивості гірських порід поділяються на базові та обчислювальні, а за способом прикладання до породи руйнівних зусиль – статичні і динамічні.

Під фізичними властивостями розуміють їх поведінку (реакцію) при дії на них певних фізичних полів чи середовищ. Чисельно ця властивість породи оцінюється одним або кількома параметрами (показниками, характеристиками), що є кількісною мірою властивості.

Властивості порід і відповідні параметри, які характеризують реакцію порід на дію певних інструментів, механізмів (наприклад, бурових, різальних) чи технологічних процесів (наприклад, висаджування), називають гірничо-технологічними. Цю сукупність фізичних і гірничо-технологічних властивостей (параметрів) гірських порід, які описують їх поведінку в окремих процесах розробки родовища, зазвичай називають фізико-технічними властивостями порід. Відомо понад 100 фізико-технічних параметрів порід. Проте для вирішення завдань з забезпечення ефективних технологічних процесів досить мати достовірну інформацію з 10–12 з них. Для їх оцінки розроблено класифікації порід за буримістю; за висаджуваністю; за коефіцієнтом прострілюваності, за абразивністю та ін. Таким чином, виділяють обмежену мінімально необхідну і достатню для характеристики породи групу фізико-

технічних параметрів. Такі параметри гірських порід називають базовими (табл. 1.1). До них належать декілька елементарних і незалежних фізичних параметрів (щільність, пористість, міцність та ін.), які дають змогу обчислити максимальну кількість інших параметрів порід. Базові фізичні параметри є загальним фундаментом для вивчення всіх гірських порід, тому їх кількісне визначення обов'язкове.

Таблиця 1.1. Базові фізико-технічні параметри гірських порід

Властивості	Основні параметри	Позначення	Одиниця виміру	Визначення	Межа зміни
За густиною	Об'ємна маса (щільність)	ρ	кг/м ³	Маса одиниці об'єму породи з природною незруйнованою структурою (з порами, тріщинами тощо)	1500–3500
	Питома вага	ρ_0	кг/м ³	Маса одиниці об'єму твердої фази породи за винятком об'єму пор	2500–4000
	Пористість	p	%	Відносний об'єм усіх пор в одиницях об'єму породи	0,02–9
Механічні	Межа міцності на стискання	$\sigma_{ст}$	Па	Критичне значення одночасного стисного напруження, за якого порода руйнується	10^7 – $3 \cdot 10^8$
	Межа міцності на розтягування	σ_p	Па	Те ж розтягуючого напруження	4,2–107
	Межа міцності на зсув	$\sigma_{зс}$	Па	Те ж зсувного напруження	4–105 ... 8–107
	Модуль поздовжньої пружності	E	Па	Коефіцієнт пропорційності між діючим нормальним напруженням і нормальною відносною деформацією, що відповідає йому	$9,8 \cdot 10^8$ – $4,9 \cdot 10^{11}$
	Модуль одностороннього стискання	E_0	Па	Коефіцієнт пропорційності при діючих значеннях напруження стискання	1,023E– 3,79E
	Коефіцієнт Пуансона (модуль поперечного стискання)	μ	–	Коефіцієнт пропорційності між пружними поздовжніми і поперечними деформаціями за одночасного навантаження	0,1–0,45
	Зчеплення	C	Па	Межа міцності за відсутності нормальних напружень	0–0,16· $\sigma_{ст}$

У процесі виконання підривних робіт поряд із базовими фізичними параметрами важливо знати й інші гірничо-технологічні характеристики:

твердість, пружність, пластичність, крихкість, в'язкість, розпушуваність, зернистість, шаруватість, прострілюваність, абразивність, анізотропію, тріщинуватість (блочність), буримість, висаджуваність, дробимість, вологість тощо. Ці характеристики є комплексними показниками гірських порід і використовуються для розрахунків продуктивності різних агрегатів і процесів, нормування праці робітників тощо.

Фізико-технічні параметри визначаються лабораторними і натурними методами. Отримані дані повинні бути досить точними, порівнювальними і в достатній кількості. З цією метою результати вимірювань піддаються статистичній обробці для виявлення, в першу чергу, середнього значення параметра, а надалі – його надійного інтервалу. У разі кількох вимірювань одного й того ж параметра найближче до дійсного його значення буде середньоарифметичним всіх вимірювань. Далі обчислюють середнє квадратичне відхилення (помилку); коефіцієнт варіації, тобто середнє відносне відхилення отриманих результатів вимірювань від середньоарифметичного; надійний інтервал. При цьому також визначається необхідна кількість вимірювань для забезпечення допустимої величини помилки.

Фізико-механічні властивості порід обумовлені структурою, текстурою, характером мінеральних зерен та кристалічними зв'язками. Найбільш важливими базисними властивостями є щільні (гравітаційні та структурні), механічні (міцнісні, пружні, акустичні), а також електромагнітні, теплові та радіаційні.

Гравітаційні властивості характеризуються питомою та об'ємною вагою.

Структурні – питомою масою (щільністю або об'ємною масою), загальною і відкритою пористістю.

Механічні властивості характеризуються поведінкою гірських порід в різноманітних силових полях і поділяються на три групи:

– міцнісні властивості, що характеризують зв'язок між напруженнями і незворотними руйнуючими деформаціями – гранична міцність на стиснення, розрив, сколення, зсув, вигинання;

– пружні властивості, що характеризують зв'язок між напруженнями і зворотними деформаціями – модуль пружності (модуль Пружності), модуль однобічного стискання, модуль всебічного стискання, коефіцієнт Пуассона;

– акустичні властивості, що характеризують умови передачі породами пружних коливань – швидкість розповсюдження поздовжніх і поперечних пружних хвиль, акустична жорсткість.

До механічних властивостей належать також гірничо-технічні, що характеризують їх опір різноманітним видам механічних впливів.

До основних властивостей порід належать щільність, пористість, вологість, анізотропія, пластичність і тріщинуватість. Ці властивості є геологічними характеристиками і залежать від мінерального складу і будови порід. Виділено 20 мінералів, які, в основному, впливають на властивості гірських порід. За будовою гірські породи поділяють на групи. Основний обсяг підричних робіт виконується у твердих породах 1 та 2 груп (скельні непористі, скельні пористі – ізотропні та анізотропні) [1].

Питома вага (γ_0) – маса одиниці об'єму твердої фази (мінерального скелету) мінералу чи породи. Мінерали поділяються на важкі ($\rho_0 > 4 \cdot 10^3$ кг/м³) – 33,8 %, середні ($\rho_0 = (4 \dots 2,5) \cdot 10^3$ кг/м³) – 53,2 % та легкі ($\rho_0 < 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³) – 13 %.

Щільність гірських порід визначається відношенням маси до загального об'єму, включаючи об'єм пор, які є у породі:

$$\rho_c = \frac{g_n}{V}, \quad (1.1)$$

де g_n – маса зразка породи, г; V – об'єм породи, см³.

Значення щільності гірських порід змінюється в межах 0,6–3,5 кг/см³. Маса одиниці об'єму породи в її природному стані відрізняється від ρ_c . Така відмінність зумовлена, в першу чергу, пористістю. Тому разом із щільністю використовують поняття об'ємної маси ρ .

Об'ємною масою називається маса одиниці об'єму сухої породи за даної щільності в її природному стані. Щільність порід завжди більша за їх об'ємну масу. Об'ємна маса більшості порід коливається від $1,5 \cdot 10^3$ до $3,5 \cdot 10^3$ кг/м³ (табл. 1.1).

Вага одиниці об'єму твердої фази породи називається питомою вагою породи, а вага одиниці об'єму сухої породи у природному пористому стані – об'ємною вагою.

Питома вага породи та її щільність пов'язані співвідношенням:

$$\gamma_0 = \rho_c g, \quad (1.2)$$

де g – прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Міцність породи характеризується спроможністю протистояти механічному навантаженню і визначається напруженням, за яким здійснюється руйнування при одновісному стисканні:

$$[\sigma] = F_{\max}/S_0, \quad (1.3)$$

де $[\sigma]$ – напруження, за якого зразок зруйнувався;

F_{\max} – сила, за якої настало руйнування зразка;

S_0 – площа поперечного перерізу зразка.

Повна характеристика породи містить також дані про межу міцності на розрив, вигинання, сколювання, а також міцність при всебічному стисканні.

У табл. 1.2 наведена характеристика деяких гірських порід за механічними і динамічними показниками.

Статичний модуль пружності E (Па) – це коефіцієнт пропорційності між діючим поздовжнім напруженням σ_p (Па) і поздовжньою деформацією, що відповідає йому (ε) в м.

$$E_{\text{ст}} = \sigma_p / \varepsilon; \quad \varepsilon = \Delta l / l, \quad (1.4)$$

де $\Delta l, l$ – абсолютна деформація і довжина зразка породи відповідно.

Модуль однобічного (одностороннього) стискання E_0 через модуль пружності ($E_{\text{ст}}$) і коефіцієнт Пуассона визначаються так:

$$E_0 = \frac{E_{\text{ст}}(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}. \quad (1.5)$$

Статичний модуль зсуву $G_{\text{ст}}$ (Па) – це коефіцієнт пропорційності між дотичним напруженням τ (Па) і деформацією зсуву $\varepsilon_{\text{зс}}$:

$$G_{\text{ст}} = \frac{\tau}{\varepsilon_{\text{зс}}}. \quad (1.6)$$

Модуль всебічного об'ємного стискання G_0 визначається через модуль $G_{\text{ст}}$ і $E_{\text{ст}}$ таким чином:

$$G_0 = \frac{E_{ст}G_{ст}}{3(G_{ст}E_{ст})}. \quad (1.7)$$

Граничне дотичне напруження τ_n , за якого відбувається руйнування породи, залежно від діючих нормальних напружень виражається формулою:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\phi + c, \quad (1.8)$$

де ϕ – кут нахилу прямої, дотичної до півкола, який дорівнює межі міцності породи на стискання і розтягування; c – зчеплення породи.

Кут ϕ називається кутом внутрішнього тертя, $\operatorname{tg}\phi$ – коефіцієнтом внутрішнього тертя, тобто коефіцієнтом пропорційності між дотичними і нормальними напруженнями.

Зчеплення породи чисельно дорівнює межі міцності її на зріз у разі відсутності нормальних напружень (тобто, коли $\sigma_n = 0$). Для сипких порід $c = 0$, тоді $\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\phi$. При цьому кут ϕ характеризує кут природного відкосу сипких порід.

Кут внутрішнього тертя визначається з виразу:

$$\phi = 2 \operatorname{arctg} \frac{\sigma_{ст}}{\delta_p}. \quad (1.9)$$

Зчеплення C дорівнює:

$$c = \frac{\sigma_p}{\sigma_{ст} - \sigma_p}. \quad (1.10)$$

Коефіцієнт Пуассона μ – безрозмірна величина, яка пов'язує відносну повздовжню ε і поперечну d деформації гірської породи.

$$\mu = d/\varepsilon \text{ або } \mu = \frac{E_{ст} - 2G_{ст}}{2G_{ст}}. \quad (1.11)$$

Статичні і динамічні пружні властивості деяких гірських порід наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Статичні і динамічні механічні властивості деяких гірських порід

Гірська порода	Об'ємна вага $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Модуль пружності $E \cdot 10^{-10}$	Коефіцієнт Пуассона, μ	Межа міцності, МПа			Коефіцієнт міцності Протод'яконова, f
				на стискання	на розтягування	на зсув	
Алевроліт	2,54	3...7	0,20...0,28	70...77	8...12	24...26	6...8
Аргіліт	2,54	4,5...5	0,3	52...88	4...7,1	17...23	2...8
Піщаник	2,66	3...7	0,09...0,13	98...120	9,4...12	28...42	–
Діорит-порфірит	3,23	5,3	0,24	270	21,2	41,2	23,1
Вапняк мармуризований	2,71	10,7	–	670	9,4	14,5	5
Вапняк глинистий	2,7	6,5	0,22	144	10,2	26	6,1
Магнезит дрібнозернистий	4,19	8,2	0,34	247	2,5...6,5	38,5	12,9
Порфірит діабазовий	2,88	8,9	0,23	471	23,5	46,5	19,5
Базальт пікритовий	2,73	3,3	0,23	895	19,3	17	7,3
Базальт лабрадорівий	2,72	8,8	0,25	202	16,5	36	13
Габро-діабаз	2,86	7	0,26	48	13,9	28	8,6
Габро-долерит	2,82	7,5	0,37	148	15,6	26	9
Доломіт зріднений	2,75	–	–	–	15,6	23,8	8,1
Вапняк	2,73	9	0,3	143	–	27	–

1.2. Динамічні властивості гірських порід

До динамічних властивостей гірських порід належать пружні динамічні (динамічний модуль пружності, динамічний коефіцієнт Пуассона, динамічний модуль зсуву та ін.) та акустичні характеристики.

Пружність характеризує властивість порід відновлювати свою початкову форму і об'єм після припинення дії зовнішніх навантажень; характеризується модулем пружності (модулем Пружності) E , модулем зсуву і коефіцієнтом поперечних деформацій μ (коефіцієнтом Пуассона).

При імпульсному прикладанні до середовища зовнішньої збудливої сили через середовище проходить два типи пружних хвиль, які розповсюджуються з певною кінцевою швидкістю залежною від пружних сталих і від щільності середовища.

Таблиця 1.3. Статичні і динамічні пружні властивості деяких гірських порід [2]

Гірська порода	$E_{cm} \cdot 10^{-10}$ Па	$E_{дин} \cdot 10^{-10}$ Па	$E_{дин}/E_{cm}$	μ_{cm}	$\mu_{дин}$	$\sigma_{cm} \cdot 10^{-10}$ Па	$\sigma_{дин} \cdot 10^{-10}$ Па	$\sigma_{cm} \cdot 10^{-10}$ Па	$\sigma_{дин} \cdot 10^{-10}$ Па
Базальт	4,39	7,8	1,78	0,12	0,22	4,45	3,2	1,9	4,57
Габро	7,1	7,5	1,06	–	–	–	3,6	–	5,6
Граніт	6,6	7,1	1,08	–	–	–	2,6	–	4,37
Діабаз	7,32	10,6	1,45	0,18	0,23	4,65	4,37	2,2	6,54
Діорит-порфірит	5,3	14,5	2,74	0,24	0,26	2,1	4,65	3,4	10,0
Доломіт рівномірнозернистий	5,05	5,31	1,05	–	–	–	1,88	–	5,21
Дуніт	14,9	16,4	1,03	–	–	–	5,9	–	10,73
Вапняк	2,25	5,6	2,5	0,29	0,27	1,8	2,2	1,8	4,09
Вапняк глинистий	6,5	6,6	1,01	0,22	0,02	0,68	3,3	3,8	2,3
Кварцит	6,7	8,8	1,32	0,17	0,07	2,9	4,1	–	–
Конгломерат	7,0	7,9	1,13	0,13	0,02	3,1	3,9	–	–
Магнетит дрібнозернистий	8,2	17,2	2,1	0,34	0,33	3,1	4,4	8,6	17,3
Пісковик: звичайний	2,6	2,7	1,04	0,28	0,13	0,98	1,1	–	–
Кварцовий	4,5	8,6	1,9	0,21	0,42	1,85	1,28	2,6	13,6
Роговик сканований піроксеном	7,8	8,9	1,15	0,17	0,33	3,3	2,3	3,9	9,0
Сієніт	7,4	8,1	1,1	–	–	–	2,9	–	5,4
Скарн: гранатовий з магнетитом піроксен- епідотовий	6,8 0,9	9,1 3,2	1,35 3,52	0,27 0,42	0,2 0,35	2,7 0,32	3,35 1,8	4,2 1,7	5,0 3,5
Туф альбітофіровий	4,7	7,9	1,68	0,16	0,36	2,0	1,65	2,25	9,4

Швидкість повздовжньої хвилі V_p в ізотропному середовищі щільністю ρ буде дорівнювати:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{\text{дин}}(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (1.12)$$

або, використовуючи постійну Ляме λ :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2E_{\text{дин}}}{\rho}}. \quad (1.13)$$

Швидкість розповсюдження поперечної хвилі V_s визначається так:

$$V_s = \sqrt{\frac{E_{\text{дин}}}{\rho \cdot 2(1 + \nu)}}. \quad (1.14)$$

Якщо заміряти у виробничих умовах швидкості подовжніх і поперечних хвиль, то можна отримати наступні динамічні параметри гірських порід:

а) динамічний модуль пружності $E_{\text{дин}}$:

$$E_{\text{дин}} = \rho V_p^2; \quad (1.15)$$

б) динамічний коефіцієнт Пуассона:

$$\mu_{\text{дин}} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - 2V_s^2)}; \quad (1.16)$$

в) динамічний модуль зсуву ($G_{\text{дин}}$):

$$G_{\text{дин}} = \frac{E_{\text{дин}}}{2(1 - \nu)}; \quad (1.17)$$

г) динамічний модуль багатостороннього (об'ємного) стискання:

$$G_{\text{дин.с}} = \frac{E_{\text{дин}}}{3(1 - 2\nu)}; \quad (1.18)$$

д) модуль пружності ($E_{\text{ст}}$) зв'язаний з пружними хвилями співвідношенням:

$$E_{\text{ст}} = \frac{DV_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}; \quad (1.19)$$

е) стала Ляме:

$$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2); \quad (1.20)$$

ж) статистичний модуль (G_0) багатостороннього стискання:

$$G_0 = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right). \quad (1.21)$$

Знаючи динамічні модулі середовища, швидкість повздовжньої хвилі можна обчислити наступним чином:

$$v_p = \sqrt{\frac{G_{\text{дин}} + \frac{4}{3} G_{\text{дин.с}}}{\rho}} \quad (1.22)$$

або після перетворень з урахуванням наведених вище формул:

$$v_p = \sqrt{\frac{\frac{E_{\text{дин}}}{3} \left(\frac{1}{1-2\nu} + \frac{1}{1+\nu} \right)}{\rho}}. \quad (1.23)$$

Ця швидкість може визначатися як:

$$v_p = \frac{E_{\text{дин}}}{\rho}. \quad (1.24)$$

Швидкість поперечної хвилі складає:

$$V_s^2 = \frac{G_{\text{дин}}}{\rho}. \quad (1.25)$$

В ідеально пружному середовищі динамічний і статичний модулі пружності мають однакову величину.

У табл. 1.4 наводяться співвідношення між пружними властивостями гірських порід.

При вивченні параметрів висаджування гірських порід зазвичай використовують такий механічний показник, як коефіцієнт міцності Протод'яконова М.М. (f). Він визначається, виходячи з міцності породи на стискання, приймаючи за $f=1$ породу з межею міцності на стискання $9,81 \cdot 10^6$ Па, отже коефіцієнт f породи з межею міцності на стискання кубика породи з ребром 50 мм G_{cm} (Па) буде дорівнювати $f = \frac{G_{cm}}{9,81 \cdot 10^6}$, де $9,81 \cdot 10^6$ Па – еталонна величина.

Професор Л.І. Барон для порід $G_{cm} \leq 50$ МПа запропонував коефіцієнт f визначати за даними випробувань кернів діаметром 23–32 мм за формулою [3]:

$$f = \frac{G_{ст}}{30} + \sqrt{\frac{G_{ст}}{3}}. \quad (1.26)$$

Таблиця 1.4. Взаємозв'язок пружних властивостей гірських порід [2]

Відомі параметри	Шуканий параметр				
	E	G_0	G	μ	E_0
G_0, E	—	—	$\frac{3G_0E}{9G_0 - E}$	$\frac{1}{2} - \frac{E}{6G_0}$	$\frac{3G_0(3G_0 + E)}{9G_0 - E}$
—	—	$\frac{EG}{3(G-E)}$	—	$\frac{E}{2G} - 1$	$\frac{G(4G - E)}{3G - E}$
E, ν	—	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	—	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
G_0, G	$\frac{9G_0G}{3G_0 + G}$	—	—	$\frac{3G_0 - 2G}{2(3G_0 + G)}$	$\frac{4}{3}G + G_0$
G_0, ρ	$\frac{3G_0}{1-2\rho}$	—	$\frac{3G_0(1-2\rho)}{2(1+\rho)}$	—	$\frac{3G_0(1-\rho)}{1+\rho}$
E, E_0	—	$\frac{3E_0 - E + W_g}{6}$	$\frac{3E_0 + E + W_g}{6}$	$\frac{3E_0 - E + W_g}{4E_0}$	—
G_0, E_0	$\frac{9G_0(E_0 - G_0)}{E_0 + 3G_0}$	—	$\frac{3(E_0 - G_0)}{4}$	$\frac{3G_0 - E_0}{3G_0 + E_0}$	—
ρ, E_0	$\frac{(1-2\rho)(1+\rho)}{1-\rho} E_0$	$\frac{E_0(1+\rho)}{3(1-\rho)}$	$\frac{1-2\rho}{2(1-\rho)} E_0$	—	—
ρ, G	$2G(1+\rho)$	$\frac{3G(1+\rho)}{3(1-2\rho)}$	—	—	$\frac{2G(1-\rho)}{1-2\rho}$

Наведемо приклад визначення деяких пружних властивостей порід в реальних виробничих умовах.

В роботі [4] наведено наступні значення з окремих властивостей деяких гірських порід. Наприклад, для піщаників коефіцієнт Пуассона складає 0,1–0,25, міцність на стискання 190 МПа, на розтягання 2–6 МПа, на зсув 3–15 МПа, для вапняку ці дані складають відповідно $\mu = 0,26–0,33$, $\sigma_{ст} = 70–160$ МПа, на розтяг $\sigma_p = 3–5$ МПа, модуль пружності $E = (3,5–7) \cdot 10^{10}$ Па тощо. З порівняння цих даних з даними інших літературних джерел та табл. 1.2 видно наявність значних розходжень кількісних параметрів за однаковими категоріями порід, що свідчить як про літологічну відмінність умов їх залягання в різних регіонах, так і про невизначеність місця взяття проб на

дослідження (глибина, ступінь вивітреності, мінералогічний склад та ін.). Отже, для конкретних умов дані повинні уточнюватися.

Автори [1] наводять у табл. 1.5 деякі дані з пружних властивостей гірських порід стосовно залізородних покладів.

Таблиця 1.5. Пружні властивості гірських порід

Пружні властивості	Велико-уламкові тріщинуваті вапняки (в масиві)	Слабо-окварцьовані сієніти	Сильно-окварцьовані сієніти	Сієніт-діорити	Вторинні кварцити	Гранодіорит-порфіри
Швидкість хвилі, м/с:						
поздовжньої	2730	$\frac{2500}{3562}$	$\frac{3570}{4406}$	$\frac{3300}{4524}$	$\frac{1140}{1796}$	$\frac{2230}{3021}$
поперечної	1515	$\frac{1360}{2268}$	$\frac{1945}{2521}$	$\frac{1800}{2585}$	$\frac{620}{1197}$	$\frac{1230}{1993}$
Акустична жорсткість, 10^6 м/с·кг/м ³	7,1	$\frac{6,4}{9,8}$	$\frac{10,6}{11,8}$	$\frac{7,7}{11,9}$	$\frac{2,83}{4,56}$	$\frac{5,37}{7,8}$
Модуль 10^4 МПа:						
зсуву σ	0,62	$\frac{0,48}{1,5}$	$\frac{1,63}{5,3}$	$\frac{0,77}{2,2}$	$\frac{0,99}{0,36}$	$\frac{0,37}{1}$
пружності E	0,83	$\frac{0,68}{3,6}$	$\frac{1,63}{5,3}$	$\frac{1,09}{5,6}$	$\frac{0,14}{0,8}$	$\frac{0,54}{2,3}$
об'ємного стискання	1,16	$\frac{0,99}{1,6}$	$\frac{2,33}{2,5}$	$\frac{1,58}{2,6}$	$\frac{0,2}{0,32}$	$\frac{0,75}{1}$
Константа Ляме, 10^4 МПа	0,76	$\frac{0,67}{0,7}$	$\frac{1,58}{1,81}$	$\frac{1,05}{1,93}$	$\frac{0,13}{0,12}$	$\frac{0,48}{0,38}$
Коефіцієнт Пуассона, μ	0,276	$\frac{0,291}{0,17}$	$\frac{0,289}{0,26}$	$\frac{0,287}{0,26}$	$\frac{0,291}{0,1}$	$\frac{0,282}{0,12}$

Примітка: У чисельнику вказані дані – для масиву, у знаменнику – для зразків

Здатність порід деформуватися під дією зовнішніх зусиль без розриву суцільності чи нагромадження неприпустимо великих деформацій називається *міцністю*. У разі визначення міцності на зразках різного поперечного перерізу проявляється масштабний ефект, який має враховуватися. Від цього залежить достовірність проектних розрахунків параметрів буровибухового компонента технології видобутку корисних копалин.

1.3. Загальна характеристика структурно-нестійких ґрунтів

Найрозповсюдженими структурно-нестійкими в Україні є лесові ґрунти, які займають 65% всієї території. Одна із основних ознак лесових ґрунтів – видимі неозброєним оком на зломі зразка ґрунту дрібні і крупні пори, а також вертикальні каналці (макропори). Тому такі ґрунти часто називають макропористими [5].

Властивості лесових ґрунтів головним чином визначаються: пористістю, щільністю ґрунту, щільністю мінеральних часток, вологістю, пластичністю, гранулометричним і мінералогічним складом, структурою і просадністю [5–8].

Пористість лесових ґрунтів знаходиться в межах від 38% до 58%, але частіше всього складає 44 – 53%.

Щільність мінеральних часток лесових порід залежить від ваги складових їх матеріалів та органічних домішок і складає від 2,54 до 2,8 г/см³.

Щільність ґрунту залежить від мінералогічного складу, пористості, структури і вмісту води в ґрунті. Межа коливань щільності ґрунту: від 1,33 до 2,03 г/см³ (частіше 1,43 – 1,58) – для лесових ґрунтів природної вологості і від 1,12 до 1,83 г/см³ (частіше 1,32 – 1,50) – для скелету ґрунтів.

Вологість (вагова і об'ємна) показує сумарний вміст вологи в лесових ґрунтах. Її величина коливається в дуже широких межах: від 7 до 25 %. Лесові супіски частіше всього мають вологість від 7 до 11 %, а лесовидні суглинки від 15 до 25 %. Це обумовлено кліматичними, геоморфологічними і гідрогеологічними умовами залягання лесових ґрунтів.

Пластичність лесових ґрунтів при поступовому підвищенні вологості змінюється, від чого ґрунти можуть бути твердими, пластичними і текучими. При переході ґрунтів від одного стану в інший змінюються будівельні властивості, головною з яких є несуча спроможність.

Вологість на межі розкочування (W_p) для лесових супісків знаходиться в межах 12 – 18%, для лесовидних суглинків 12 – 21 % (частіше 18 – 20 %).

Значення ступеня вологості на межі текучості (W_L) для лесових супісків коливається від 22 до 24%, для лесовидних суглинків – від 26 до 35 %.

Іноді зустрічаються лесовидні суглинки і з більш високими значеннями W_p ; W_L і I_p .

Число пластичності (I_p) коливається для лесових супісків від 1 до 10%, для лесовидних суглинків – 7 – 18%, іноді вище.

Гранулометричний склад лесових ґрунтів характеризується перевагою крупної (0,05 – 0,01 мм) або пилюватої фракції (0,01 – 0,005 мм). Найбільш розповсюджений склад: піщаних фракцій (більше 0,05 мм) – 10 – 40%, пилюватих (0,05 – 0,005 мм.) – 40 – 80% та глинистих (менше 0,005 мм) – 10 – 30%.

Чим глибше залягає ґрунт, тим більше його глинистість. При наявності під лесовою товщею водоупору глинистість наростає більш інтенсивно.

Мінералогічний склад лесових ґрунтів в основному представляють мілкі зерна кварцу, польових шпатів, карбонатів, рідше – слюди, гідрослюди, монтморилоніту та інших мінералів. Найбільш характерні мінерали крупної фракції такі: кварц 70 – 75%, польовий шпат 5 – 15% та карбонати 5 – 12%.

Хімічний склад лесових ґрунтів залежить від виду мінеральних часток і характеризується високим вмістом кремнезему (SiO_2) – 60 – 75%, полуторних окисів (R_2O_3) – 7 – 14%, окисів кальцію (CaO) – 10 – 12%, окисів алюмінію (Al_2O_3) – 6– 10%, окисів заліза (Fe_2O_3) – 2 – 3,5%, окисів магнію (MgO) – 1– 3% та інших.

Структура лесових ґрунтів визначається мінералогічним і гранулометричним складом, зв'язками між частинками і пористістю.

Лесові ґрунти мають зернисту, зернисто – агрегатну і агрегатну структуру [7].

Зернисті структури (пористість більше 43 – 44%) складаються в основному з неводостійких агрегатів і значної кількості монозерен, пов'язаних одне з одним глинистими частками, водорозчинними солями і карбонатами. Основна маса пор має переривчасте цементування стінок глинисто – карбонатною речовиною. Це типово для лесових ґрунтів II типу просадності.

В агрегатних структурах основна маса часток зібрана в агрегати різної водостійкості (пористість до 39%). Ґрунти з такою структурою вміщують більше 25% глинистих часток і, як правило, не просідають.

Зернисто – агрегатні структури займають проміжне положення. Вони більш різноманітні за мінералогічним складом глинистих фракцій, характером агрегатності, водостійкістю і відносяться до лесових ґрунтів I типу просадності.

Лесові ґрунти при природній вологості є достатньо міцними основами. Їм властива мала стисливість з модулем деформації 20 – 50 МПа і більше. При замочуванні різко погіршуються їх вихідні властивості, і вони стають просадними. Із збільшенням вологості модуль деформації зменшується до 3–5 МПа, а іноді і до 1 МПа.

Просадка ґрунту супроводжується ущільненням та зменшенням його пористості за рахунок макро- – і мікропор. Процес просадки обумовлюється порушенням структурної міцності ґрунту при його замочуванні внаслідок складного комплексу фізико – хімічних явищ взаємодії води і ґрунту. Просадочні деформації протікають інтенсивно і пов'язані з вертикальними і частково горизонтальними переміщеннями ґрунту [6].

Просадочність – складне і багатогранне явище, яке пов'язане з особливостями структури, складу і умовами формування лесових порід. Одним з найважливіших показників механічних властивостей цих ґрунтів є їх сили зчеплення.

При замочуванні лесового ґрунту зв'язки між частинками послаблюються, знижується опір зрушенню. Під дією навантаження це призводить до деформації ґрунту, або його просадки.

Досвід показав, що залежно від можливості розвитку просідання від власної ваги зволоженого ґрунту та додаткового тиску можна виділити чотири (БНіП 2.02.01 – 83) різних випадки.

При невеликій товщі лесового ґрунту зволоження майже не викликає деформацій від власної ваги ґрунту ($P_{SL} \geq \sigma_{z,g}$), а додатковий тиск спільно з природним спричиняє просідання поблизу від подошви фундаменту.

При значному нашаруванні лесового ґрунту, починаючи з деякої глибини, створюється нова зона, де можливе просідання. Тут воно в основному пов'язане з великим навантаженням від власної ваги зволоженого ґрунту та з малими величинами P_{SL} ($\sigma_{z,g} > P_{SL}$).

Таким чином, будова лесової товщі та особливості властивостей лесового ґрунту стали основою поділу всіх умов нашарування на два типи [6].

До першого типу ґрунтових умов віднесено такі товщі лесового ґрунту, де просідання від власної ваги замоченого ґрунту практично не відбувається або не перевищує 5 см. Для цього типу можливі такі співвідношення показників: $P_{SL} > \sigma_{z.g}$ – в усій товщі; $P_{SL} < \sigma_{z.g}$ – у межах товщі близько 2 м; $S_{SL} < 5$ см.

До другого типу ґрунтових умов віднесено такі товщі, де просідання від власної ваги замоченого ґрунту відбувається в нижній частині товщі, і воно більше за 5 см. Для цього типу характерні такі співвідношення: $P_{SL} < \sigma_{z.g}$ у межах товщі більше за 2 м; $S_{SL} \geq 5$ см.

Визначення типу ґрунтових умов за просадністю проводять з використанням матеріалів лабораторних досліджень.

Існуючі методи і способи усунення просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів здійснюються:

– у межах верхньої зони просадної товщі або її частини – важкими трамбівками, влаштуванням ґрунтових подушок, втрамбовуванням котлованів, хімічним або термічним закріпленням;

– у межах всієї просадної товщі – глибинним ущільненням ґрунтовими палями; глибинними вибухами з попереднім замочуванням ґрунтів основи, хімічним або термічним закріпленням.

1.4. Методологія досліджень

Мікроскопічні дослідження зовнішньої та внутрішньої структури сколу гранул (частинок) аміачної селітри, як обробленої ультразвуковим випромінюванням, так і без, виконано в Інституті надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля за допомогою мікроскопу типу Ломо Метам Р-1, оснащеного ССД відеокамерою «DigitalKOCOM», які дозволяють виводити дані дослідних зразків на дисплей комп'ютеру зі збільшенням у 176, 360 та 900 разів.

Обробка аміачної селітри ультразвуком проводилась в Інституті надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля за допомогою ультразвукового генератора УЗГ5-1,6/22 з частотою $22 \pm 1,65$ кГц при інтенсивності звуку в межах від часток Вт/см² до декількох Вт/см².

Повна (абсолютна) пористість селітри визначалась методом Мельчера (вимірювання повної пористості). Даний метод заснований на тому, що маса проекстрагованого і висушеного зразка є величина постійна як для гранульованої аміачної селітри, так і після її подрібнення. Таким чином, повна пористість селітри може бути визначена, якщо відомі щільність зразка і щільність (скелету) частинок аміачної селітри. Повна пористість аміачної селітри складається з відкритої пористості – це наявність пустот, укладених між зернами селітри, каверн і тріщин та закритої пористості – це замкнуті пори селітри. Коефіцієнт відкритої пористості визначався експериментально з використанням стандартного лабораторного обладнання.

Дослідження ступеня ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вибуховим способом за допомогою накладних зарядів та зустрічних похилих свердловин проводилися та динамічні характеристики малощільних сипучих ВР досліджувалися експериментально в польових умовах на вибуховому полігоні НАН України.

У ґрунтовому масиві з обох взаємно перпендикулярних сторін встановлювались п'єзодатчики на однаковій відстані від зарядної порожнини, під'єднані через приставку АЦП Е-440 до ПК з програмним забезпеченням. Приставка АЦП Е-440 перетворює аналоговий сигнал в цифровий, має 14 каналів та реєструє частоти в діапазоні 0,3 – 100 кГц. Вимірювання компонентів нормальних складових напружень виконувались методом перетворення механічної величини в електричний заряд п'єзоелектричних перетворювачів при імпульсному механічному впливі на них з наступним перетворенням в електричну напругу з реєстрацією. Вихідні та проміжні результати приймалися з точністю до 1 %.

Бризантність зарядів визначалась згідно ДСТУ EN 13631-1:2008 «Вибухові речовини для цивільного застосування. Бризантні вибухові речовини. Частина 1. Вимоги». Час наростання тиску в імпульсі та тиску на фронті ударної хвилі визначався експериментальним шляхом за стандартними методиками, швидкість наростання тиску до максимуму – за розрахунком.

В лабораторних умовах визначалась щільність ґрунту до і після вибуху за допомогою методу «ріжучого кільця» як відношення маси зразка ґрунту до його об'єму за ДСТУ Б В.2.1-17:2009. «Методи лабораторного визначення фізичних властивостей».

Деформаційні характеристики до ущільнення та після ущільнення просадних лесових ґрунтів визначались за допомогою методу «двох кривих». За даними лабораторних досліджень визначали початковий тиск просідання та компресійний модуль деформації ґрунтів природної вологості та у водонасиченому стані.

Виходячи з вище наведеного можна зробити висновок, що при аналітичних та теоретичних оцінках властивостей гірських порід встановлено, що щільність ґрунту значно впливає на їх деформаційні і фізико-механічні властивості, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів. Цю характерність доцільно застосувати при визначенні необхідного ступеня ущільнення, регулювання якого, дозволить встановити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості просадних структурно-нестійких ґрунтів.

Розділ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСАДНИХ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ГРУНТІВ

2.1. Фізико-хімічні способи ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів

Термічне закріплення ґрунтів. М. О. Осташев у 1934 році для закріплення ґрунту запропонував використовувати нагріте повітря, яке під тиском нагнітається у свердловини. Пізніше роботи над цим способом продовжив проф. М. Литвинов. Термічне закріплення лесових просадних ґрунтів ґрунтується на тому, що нагріте попередньо повітря (температура 350...500°C) чи розпечені продукти згорання нагнітаються під тиском у пори ґрунту через заздалегідь пробурені свердловини. Вони передають своє тепло навколишньому ґрунтовому масиву через пори і тріщини. Для збільшення в ґрунті фільтрації розпечених газів у свердловинах постійно підтримується надлишковий тиск від 0,15 до 0,5 атм. У результаті надлишкового тиску розпечені гази більш інтенсивно проникають у ґрунтову товщу і збільшують зону закріплення. Надлишковий тиск забезпечується повною герметизацією затвора, що щільно закриває верхню частину свердловини [5 – 9].

Завдяки дії високої температури (від 350° до 1000°C) окремі мінерали, з яких складається кістяк ґрунту, оплавляється, утворюючи міцні зв'язки між частками ґрунту, і ґрунт здобуває нові фізико-механічні властивості: стає нерозмочувальним, втрачає свої просадні властивості, зменшується його пористість, збільшуються коефіцієнти фільтрації і вологонепроникненості, підвищується міцність до 0,6 – 1,2 МПа при модулі деформації не менше 30 МПа. У результаті випалу навколо вертикальної свердловини утворюється циліндрична зона закріпленого ґрунту діаметром 2 – 2,3 м на глибину всієї просадної товщі.

Термічне глибинне закріплення економічно доцільно застосовувати для ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів з газопроникністю не менше 8 см/хв, що залягають вище ґрунтових вод, із глибиною просадної товщі від 5 до 15 м. Термічні способи глибинного закріплення просадних ґрунтів широко

застосовуються при будівництві нових споруд, а також при необхідності ліквідації просідання аварійних будинків і споруд.

Глинизація (кольматація). Застосовується для закріплення структурно-нестійких ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації 0,1–2 м/добу і пористістю 43–50%. Цей спосіб заснований на нагнітанні в ґрунт, через ін'єктори, глинистої суспензії в кількості 8–10% від ваги ґрунту. Усунення просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів відбувається за рахунок заповнення всіх пор ґрунту глинистим розчином. Мікропори ґрунту при глинизації частково або повністю заповнюються глинистим матеріалом. У результаті ґрунт здобуває властивості звичайного глинистого непросадного ґрунту, зменшуються його фільтраційні властивості, виникають нові зв'язки між частками й ізолюються від розчинення у воді існуючі в ґрунті цементуючі речовини.

Силікатизація структурно-нестійких ґрунтів. Цей спосіб заснований на фізико-хімічній реакції між поглинаючим компонентом ґрунту і розчином силікату натрію. Метод силікатизації перший запропонував в 1944-1946 рр. В.В. Асколонов і застосовується не тільки при закріпленні деформованих основ, а й в перед будівельний період для створення фундаментів із закріплених ґрунтів. Пізніше цю технологію вдосконалили А. А. Акімов та В. Є. Соколович [5, 10, 11].

Застосування силікатизації лесових ґрунтів, незважаючи на ефективність цього способу, миттєвий процес закріплення і швидке наростання міцності в часі, обмежується через високу вартість силікату натрію, великих його витрат, недосконалість технології і значних втрат силікатного розчину.

У 1929 р. професором Б. О. Ржаніциним була запропонована дворозчинна силікатизація. Починаючи з 1966 року в НДІ основ і підземних споруд Держбуду були проведені дослідження по інтенсифікації існуючого способу силікатизації і розроблені нові способи хімічного закріплення лесових ґрунтів: амонізація, газова силікатизація, аміачна стабілізація і інші.

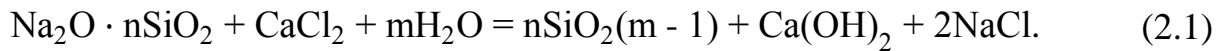
Міцність на стиск закріплених ґрунтів досягає 2 МПа.

Існує два способи силікатизації: двофазний і однофазний.

Суть двофазного способу силікатизації ґрунтів у тому, що в ґрунт забиваються системи металевих труб-ін'єкторів, через які по черзі нагнітається

розчин силікату натрію із щільністю 1,35 – 1,44 г/см³ і розчин хлористого кальцію із щільністю 1,26 – 1,28 г/см³.

Основна реакція взаємодії розчину силікату натрію з хлористим кальцієм протікає за наступною схемою:



Закріплення ґрунтів однорозчинним способом здійснюється нагнітанням у ґрунт силікатного розчину зі щільністю 1,13 г/см³ (15% концентрація) через ін'єктори. Лесові ґрунти внаслідок активної фізико-хімічної взаємодії з розчином силікату натрію, що нагнітається, здатні практично до миттєвого закріплення. При цьому вони здобувають підвищену міцність, водостійкість, непросадочність і значну кислотостійкість. Силікатизація ґрунтів може застосовуватися при коефіцієнті фільтрації в межах від 0,1 до 2,0 м/добу, ступені вологості $SR < 0,7$ і ємності поглинання в однонормальному розчині луґу не менше 10 мг·екв на 100 г сухого ґрунту.

При існуючих способах силікатизації структурно-нестійких ґрунтів у процесі обмінної реакції виділяється гідрат окису кальцію, який здатний зв'язати лише не більше 50% силікатного розчину, що нагнітається. Інша частина не приймає участі в реакції силікатизації і йде у втрати. Так, наприклад, по величині ємності поглинання лесових ґрунтів у лужному середовищі й адсорбції кремінної кислоти суспензією гідрату окису кальцію для забезпечення обмінної реакції в 1 м³ ґрунту щільністю 1,5 г/см³ (у даному випадку для Нікопольського лесу) повинно витратитися не більш половини розчину силікату натрію, що нагнітається по існуючій технології, зі щільністю 1,13 т/м³. При цьому виділяється близько 7,5 кг високодисперсного гідрату окису кальцію, на поверхні якого адсорбується 0,7 – 0,9 кг кремінної кислоти, що міститься в 8 – 10 л розчину силікату натрію, який нагнітається. Таким чином, реакція силікатизації лесових ґрунтів проходить при значно меншій витраті розчину силікату натрію, чим це передбачається за існуючою технологією [11].

Цей істотний недолік збільшується недосконалістю технології способу силікатизації, що призводить до значних втрат силікатного розчину.

Газова силікатизація структурно-нестійких ґрунтів. В результаті газової силікатизації ґрунтів міцність закріпленого ґрунту збільшується в 1,5-2 рази. Об'єм закріпленого масиву при звичайній витраті силікатного розчину збільшується в 2 рази, а закріплений ґрунт стає більш водостійким. Радіус закріплення від одного ін'єктора становить від 0,7 до 1,0 м [12].

Однак у ряді випадків немає необхідності домагатися міцного закріплення структурно-нестійких ґрунтів в основах фундаментів. Стійкість споруд може бути досягнута, якщо лесовому ґрунту в результаті його хімічної стабілізації додати властивість непросадності. Дослідженнями підтвердилася можливість досягнення такої стабілізації ґрунтів шляхом обробки їх аміаком (амонізація або газова стабілізація).

До переваг газової стабілізації відноситься: мала трудомісткість, високий ступінь механізації робіт, можливість поліпшення міцнісних властивостей ґрунту без його переробки та виконання робіт у період експлуатації будинків і споруд.

Смолізація структурно-нестійких ґрунтів. У зв'язку з бурхливим розвитком хімії полімерів з'явилася можливість поліпшити будівельні властивості ґрунтів, додати їм такі позитивні якості, як підвищена міцність, водо- і морозостійкість, водонепроникність, непросадність, гідрофобність, підвищена стійкість до агресивних середовищ, довговічність і ін. З цією метою застосовують різні синтетичні смоли. Це дозволяє більш широко й ефективно використовувати зміцнені ґрунти як надійні основи будинків і споруд, протифільтраційних завіс, покриттів доріг, водонепроникних укосів каналів і водойм [13, 14].

Більшість зміцнювальних розчинів синтетичних смол може тверднути в ґрунті при знижених температурах і тисках, при наявності води, тому спосіб смолізації можна вважати дуже перспективним у складних гідрогеологічних умовах.

Закріплення структурно-нестійких ґрунтів цементно – силікатними та іншими розчинами. Порівняно новим методом закріплення ґрунтів є ін'єктування в нього цементно – силікатного розчину. При додаванні силікату натрію у цементний розчин покращується його структурна міцність тим більше,

чим більша кількість цементу у розчині. Якщо такий розчин залишити у спокої, то міцність його структури буде збільшуватися протягом часу. Це явище пов'язано з прискоренням схоплювання цементу за рахунок силікату. Така характеристика цементно – силікатного розчину дуже корисна при закріпленні пливунів, водонасичених ґрунтів, водоізоляції підземних частин споруд [13, 15].

В протилежність силікатизації КПД цементу – 100%. Але це не силікатизація оскільки вміст силікату натрію становить лише до 10% в залежності від фільтрації ґрунтів і поставленої задачі.

Технологія ін'єктування цементно – силікатного розчину відрізняється від інших тим, що вона є: дешева; надійна; неруйнівна; проста у виконанні; виконується вітчизняними матеріалами і обладнанням; а саме головне – ін'єктування розчину не заважає використовувати споруди за призначенням.

Додавання бентоніту у цементний розчин збільшує його в'язкість при постійному співвідношенні Ц/В. Таке збільшення тим краще видно, чим щільніший початковий розчин.

Якщо порівняти розчини, які мають однакові водовиділення, то можна замітити, що збільшення кількості бентоніту зменшує в'язкість розчину. Результати досліджень показують, що достатньо відносно невеликої кількості бентоніту для стабілізації цементних розчинів.

Додавання до цементного розчину пластифікатора “FEB MIX”, визиває його аерацію і зменшення кількості води для отримання потрібної консистенції. Аерація збільшує пластичність свіжого розчину, а після твердіння покращує його водонепроникливість, опір проти дії низьких температур, а також зменшує просадку.

Закріплення ґрунтів за допомогою висконапірної цементації основи була проведена на 60 різних майданчиках України, безпосередньо на об'єктах: об'єкт «Укриття» Чорнобильської АЕС у межах глибин 0,5-7,5 м; Нікопольський завод нержавіючих труб на глибину 2,25-12,5 м; корпус ІТМ НАН України м. Дніпро [15].

2.2. Фізико-механічні способи ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів

Суть розглянутих в цьому параграфі методів усунення просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів складається в зниженні пористості попереднього ущільнення лесового ґрунту різними способами.

Поверхнєве ущільнення ґрунту трамбуванням. Лесові ґрунти в природному стані мають макропористу структуру - ознака пухкого стану ґрунтів. При трамбуванні, після руйнування структури, лесові ґрунти можуть добре ущільнюватися, так що осідання фундаментів під впливом замочування практично виключається. Спосіб поверхнєвого ущільнення лесових ґрунтів трамбуванням запропонований Абелевим Ю.М. і Швецом В.Б. знайшов широке застосування при будівництві промислових і житлових об'єктів у Дніпропетровську, Запоріжжі, Нікополевій й інших містах [16]. Ущільнення основ важкими трамбівками проводиться в котловані, призначеному для влаштування фундаментів шляхом вільного скидання трамбівки масою 3 – 5 т з висоти 5 – 9 м. Здійснюється воно по всій площі будівель і споруд в окремих траншеях уздовж осі, за якими повинні бути розташовані фундаменти, або під окремими фундаментами.

Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів важкими трамбівками забезпечує створення ущільненого шару завтовшки 1 – 3 м в залежності від маси трамбування, площі її робочої поверхні, висоти скидання і числа ударів, а також виду їх міцності структурних зв'язків, щільності і вологості ґрунту.

Вологість є одним з найголовніших чинників, що впливає на процес ущільнення ґрунтів. Залежність ступеня ущільнення ґрунтів від вологості було розглянуто ще Р. Проктором (США) в 1933 році [17].

Збільшення щільності ґрунту з підвищенням вологості до певної межі зазвичай пояснюється впливом води.

Вода, що обволікає поверхню ґрунтових частинок, служить як би мастилом, що зменшує тертя між частинками, забезпечує найбільш сприятливі умови для ущільнення ґрунту. При збільшенні вологості тиск від ущільнюючого навантаження передається не тільки на скелет ґрунту, а

частково і на воду. Тому подальше ущільнення ґрунту можливо тільки за рахунок віджимання води, що заповнює пори, що вимагає тривалої дії ущільнюючої навантаження.

Вологість, при якій забезпечуються найбільш сприятливі умови для ущільнення ґрунту, називається оптимальною.

Практикою встановлено, що для отримання достатньо ефекту ущільнення питомий статичний тиск трамбування на ґрунт повинна становити не менше 20 кПа [18], а ступінь вологості ґрунту повинна бути в межах від 0,35 до 0,60 [19 – 21].

Поверхнєве ущільнення важкими трамбівками найчастіше застосовується на майданчиках з першим типом ґрунтових умов.

Досвід ущільнення показав, що одним із шляхів підвищення ефективності ущільнення просадних ґрунтів важкими трамбівками як для збільшення товщини ущільненого шару, так і для зниження вартості та трудомісткості є застосування трамбівок підвищеної маси 5 – 7 т [19].

Недоліком цього методу є відсутність машин, пристосованих для трамбування, що змушує використовувати переобладнані екскаватори та крани, через що ці машини зношуються в 2 – 3 рази швидше, ніж при звичайній їх роботі. Крім того, можливість застосування цього методу багато в чому залежить від метеорологічних умов, що в певній мірі заважає широкому застосуванню його в будівельній практиці.

У тих випадках, коли відсутня кранове обладнання для поверхневого ущільнення важкими трамбівками, а також при ступені вологості лесового ґрунту більше 0,65 – 0,7 (коли не може бути здійснено поверхнєве ущільнення перезволожених ґрунтів), застосовуються ґрунтові подушки [16, 21].

Влаштування ґрунтових подушок. Для ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів у межах верхнього, найбільш напруженого шару основи споруд, застосовують ґрунтові подушки. Ґрунтові подушки зазвичай влаштовуються товщиною 1 – 4 м. Суть цього способу в заміні просадного ґрунту ґрунтом, що пошарово ущільнюється. Ґрунтові подушки дозволяють зменшити товщину просадного шару, створюють водонепроникний і

непросадний екран і до деякої міри підвищують несучу здатність ґрунтової основи [22–24].

При влаштуванні ґрунтових подушок у межах зони, що деформується, на площадках з I типом ґрунтових умов досягається усунення осідання ґрунту на всю глибину, а на площадці із II типом ґрунтових умов при замочуванні товщі можливе осідання ґрунту тільки від його власної ваги. Для ущільнення ґрунту застосовуються кулачкові катки, важкі катки на пневмоколісному ході, скрепери-катки, бульдозери й інші механізми з урахуванням їхніх техніко-економічних показників при виконанні робіт.

Досвід ущільнення ґрунтів свідчить про значні переваги пневмобалонних катків перед кулачковими, тому що вони більш маневрені і можуть укочувати ґрунти різної вологості. Недолік даного способу в тім, що на виконання робіт впливають метеорологічні умови, швидко зношується обладнання [21].

Спосіб влаштування ґрунтових подушок знайшов широке застосування в Дніпропетровській, Запорізькій, Херсонській і інших областях України.

Недолік даного способу полягає в тому, що на виконання робіт впливають метеорологічні умови та швидко зношується обладнання.

Розглянемо метод *зведення стовпчастих фундаментів шляхом втрамбовування котлованів в ґрунтах*, який в порівнянні з вище розглянутими методами має наступні переваги:

- зменшується витрата бетону і сталі;
- майже повністю виключається опалубні роботи;
- значно зменшується об'єм земляних робіт через відсутність необхідності зворотної засипки котлованів, вивозу у відвал зайвого ґрунту, зменшення площі ущільнення (звичайне поверхнєве ущільнення трамбівками здійснюється по всій площі будівлі).

Суть методу полягає в тому, що котловани під фундаменти не розробляються, а втрамбовуються на необхідну глибину падаючою трамбівкою. При цьому одночасно поєднуються два процеси: розробка котловану і ущільнення ґрунту в його основі, що забезпечує усунення просідання ґрунту на майданчиках з першим типом ґрунтових умов і досить високу несучу здатність фундаментів [23, 24].

В результаті застосування методу трамбування котлованів значно знижуються трудовитрати і загальна вартість будівництва підземної частини будівлі і підвищується індустріалізація будівельних робіт.

Глибинне ущільнення ґрунтовими палями. Цей спосіб був запропонований Ю.М. Абелєвим і доцільно застосовувати при товщині шару просадного ґрунту від 5 до 18 м, зі ступенем вологості ґрунту $SR \leq 0,8$. Суть глибинного ущільнення просадних ґрунтів ґрунтовими палями ґрунтується на витисненні ґрунту у боки при пробиванні в ньому свердловин станками ударно-канатного чи при розширенні свердловин енергією вибуху. Потім отримані свердловини набиваються ґрунтовим матеріалом [25 – 29].

У результаті глибинного ущільнення просадних лесових ґрунтів зменшується їхня стисливість, зростає міцність, зменшується коефіцієнт фільтрації, ліквідуються просадні властивості ґрунтів, але така технологія має низьку продуктивність і не завжди забезпечується якість ущільнення.

Наступним етапом розвитку цього методу є *використання енергії вибуху* для влаштування свердловин [27], і віброущільнення [28].

Технологія виконання робіт з глибинного ущільнення ґрунту енергією вибуху складається з наступних основних операцій: підготовка основи для ущільнення, проходка свердловин-шпурів діаметром 0,06-0,08 м, заряджання ВР, підривання і заповнення свердловин ґрунтовим матеріалом. Діаметр свердловини після підривання становить близько 0,4 м. Досвід застосування технології глибинного ущільнення ґрунту із застосуванням енергії вибуху забезпечує виготовлення ґрунтових паль глибиною 16 м. до 75 – 80 шт. за зміну [18].

Процес глибинного віброущільнення складається в наступному: ґрунт зволожується до вологості 14 – 16%, потім підвішений на стрілі крану вібратор встановлюється на ґрунт і сам занурюється в нього. В результаті отримуємо свердловину діаметром 0,4 м, при цьому одночасно ущільнюється ґрунт в радіусі до 0,7 м [28].

Експлуатація промислових об'єктів показала, що застосування ґрунтових паль не може в достатній мірі запобігти від значних і нерівномірних осадок за

рахунок нерівномірного стиснення ґрунту, який знаходиться між ґрунтовими палями [29].

Ущільнення просадних ґрунтів попереднім замочуванням. При цьому способі попередньо зволожений ґрунт ущільнюється під власною вагою. Попереднє замочування застосовується на будівельних майданчиках із ґрунтовими умовами II типу, при просадних товщах більше 8 м (частіше понад 10 – 16 м), як правило, на знову забудовуваних ділянках. Будівлі і споруди, розташовані поблизу, треба охороняти від замочування їх основ. Ділянку для попереднього замочування розташовують від існуючих споруд на відстані не менше триразової товщини шару просадних ґрунтів при наявності водоупору чи півтора разової товщини шару – при його відсутності [30–31].

Ґрунт замочують з поверхні дна неглибоких котлованів, а в окремих випадках – через спеціально пробурені дренажні свердловини.

Час, який необхідний для замочування просадної товщі глибиною до 20 м, складає від 1 до 3 місяців і залежить від структури ґрунтової товщі. При замочуванні ґрунтового масиву через свердловини тривалість замочування скорочується в 1,3 – 1,5 рази.

Основними параметрами при цьому методі є "початковий тиск" і "початкова вологість".

Згідно з експериментальними дослідженнями Абелєва Ю.М., Крутова В.І., Маєвича А.Є., Мустафаєва А.А., Аскарєва Х.А. та ін. просадна деформація в зволожуваних лесових ґрунтах виникає лише при певному значенні діючого стискаючого тиску [25, 32, 33].

Величину цього тиску прийнято називати "початковим тиском".

А.А. Мустафаєв "початковий тиск" представляє як межу пропорційності для лесового ґрунту і для його визначення виходить з наступного нелінійного зв'язку між відносною деформацією і напруженням [26]:

$$\varepsilon = \alpha \sigma^\beta$$

де α і β - параметри, які визначаються з компресійного випробування, що характеризують деформованість зволоженого лесового ґрунту.

Виходячи з умови, що при осіданні $\varepsilon > 0,01$ і параметри α і β залежать від вологості ґрунту, для "початкового тиску" отримана формула:

$$\sigma_n = \left[\frac{0,01}{\alpha(W_{cp})} \right]^{1/\beta(W_{cp})}$$

Відомо, що властивості лесових ґрунтів в більшій мірі залежить від їх вологості [19].

Вивчення режиму вологості є однією з найважливіших задач при оцінці цих ґрунтів, як несучих основ. При розрахунку параметрів процесу просідання лесових ґрунтів методом замочування вводиться "початкова вологість" [26]. Величину "початкової вологості" приймають рівною нижній межі пластичності, тобто межі розкочування по Аттербергу. При цій вологості ґрунт, як відомо, набуває пластичний стан і тому під дією певної величини стискаючого тиску (рівній "початковому тиску") створюються умови для вертикального зсуву вище лежачих шарів ґрунту вниз [33].

Спосіб ущільнення просадних ґрунтів замочуванням, незважаючи на свою простоту, має істотні недоліки: велика витрата води на 1 м² площадки до 400 м³, тривалий час замочування для повної ліквідації просідання (місяці, роки), необхідність додаткового навантаження, неможливість застосування замочування поблизу існуючих споруд.

2.3. Керування вибуховим імпульсом як спосіб дії на середовище

Ефективність використання енергії вибуху при таких важливих практичних задачах, як: ущільнення структурно-нестійкого масиву, будівництво підземних об'єктів, руйнування гірських порід тощо, можна суттєво підвищити за рахунок курування механізмом розподілення енергії вибуху та збільшення при цьому коефіцієнту його корисної дії. Вибір методів і способів керування вибухом визначається характером його дії на середовище (ущільнення, подрібнення, переміщення, тощо).

Дія вибуху заряду ВР у середовищі характеризується імпульсом тиску в зарядній камері, який збуджує у середовищі імпульс напруження. Імпульси тиску і напружень визначаються двома параметрами: зміною величини тиску і напруження у часі і інтервалом часу прикладання навантаження. Інтегральною характеристикою величини напруження і тривалості її дії є форма імпульсу

напруження. Під формою імпульсу напруження розуміють не зміну у часі величини $I = \int_0^t \sigma(t) dt$, а вигляд кривої $\sigma(t)$. Таким чином, форма імпульсу напруження характеризує особливості поведінки напруження у часі для конкретної точки середовища.

Форма вибухового імпульсу залежить від багатьох факторів. Але, при даному рівні вибухової справи можна керувати дією вибуху шляхом забезпечення необхідної форми вибухового імпульсу в зарядній камері (заряду) і імпульсу напруження в ґрунтовому масиві. Одним із шляхів такого керування є зниження амплітуди та збільшення тривалості вибухового імпульсу напруження.

Розробці методів керування вибуховим імпульсом напруження щодо подрібнення гірських порід енергією вибуху присвячені роботи М.В. Мельникова, Є.Ф. Кучерявого, О.А. Вовка, В.Г. Кравця та інших.

Оскільки однією з наших задач є дослідження та розробка методів керування вибуховим імпульсом при ущільненні структурно нестійких масивів (лесових ґрунтів) з метою усунення їх просадних властивостей, зупинимося на аналізі деяких з цих методів керування.

На наш погляд розробка методів керування вибухом у ґрунтовому масиві може вестися за двома основними напрямками: перший – це оптимізація амплітудно-часових параметрів вибухового імпульсу з метою забезпечення максимального просторового розвитку зон ущільнення і другий – оптимізація швидкості деформації ґрунтового масиву, що впливає на ступінь та товщу її ущільнення.

Як правило, на практиці для керування вибуховим імпульсом застосовують наступні методи: короткоуповільнене підривання [34], використання повітряних проміжків та оболонок заряду [35], використання малоцільних низькобризантних вибухових речовин, зокрема спіненних композицій. У всіх цих методах зменшення амплітуди вибухової хвилі супроводжувалося збільшенням тривалості дії напруження на оточуюче середовище. В одних випадках, це досягається за рахунок суперпозиції вибухових хвиль від окремих зарядів ВР, в інших – за рахунок забезпечення

необхідного початкового стану продуктів детонації. При цьому, як показує практика проведення вибухових робіт, для кожного з цього методу існують оптимальні умови та сфера застосування, які забезпечують найбільшу ефективність ущільнення ґрунтового масиву.

Наприклад, в роботі [35] при вибуху у ґрунтовому масиві в зарядах застосовують повітряні оболонки, які найбільшого ефекту дають при вмісті їх 50 % по об'єму від ВР для центральносиметричних і 150 % при асиметричних вибухах. При цьому автори встановили, що при вибуху поблизу заряду збільшення повітряної оболонки призводить до значного зменшення абсолютної величини тиску на відстанях від 25–30 r_z для зосереджених до 90–100 r_z для циліндричних зарядів.

Фізична суть вище розглянутих методів перерозподілу енергії вибуху полягає у тому, що внаслідок збільшення часових параметрів імпульсного впливу на середовище, частотний спектр хвиль напружень зсувається в область низьких частот, а оскільки хвильові збурення на цих частотах загасають більш повільно, ніж на високих частотах, то розглянуті методи сприяють збільшенню зони напружено-деформованого стану ґрунтового масиву.

Крім того, підвищити ефективність застосування вибухової технології ущільнення масиву можна за рахунок зміни фізичного стану ґрунтів, зокрема вологості. При дослідженні ущільнення важкого пилуватого суглинку порушеної структури Ростовиков В.І. прикладав навантаження зі швидкістю від 0 до 5 Мн/м²с. Отримані результати проведених експериментів показали, що при збільшенні швидкості прикладання навантаження, деформування ґрунту при постійному тиску зменшується; збільшення вологості ґрунту приводить до зменшення його деформації; зі збільшенням швидкості прикладання навантаження збільшується стиснення самого ґрунту.

У своїх дослідженнях Р. Конднер встановив характер деформування зв'язаних ґрунтів при прикладанні на них статичного, вібраційного та ударного навантаження. Предметом вивчення був вплив швидкості прикладання навантаження на формування діаграми «напруження–деформація» для зв'язаних ґрунтів типу водонасичених глин відповідно до ядерного вибуху. На основі цих експериментів можна зробити висновок, що в'язкі властивості

грунту з'являються у деякому діапазоні швидкостей прикладання навантажень, які обмежені статичними та граничними динамічними умовами прикладання навантаження [36].

Аналогічні висновки отримали в своїй роботі Мельников В.В. та Риков Г.В., які досліджували вплив швидкості деформування на ущільнення лесових ґрунтів. Експерименти, які були проведені на одноосьовий стиск лесового ґрунту порушеної структури в умовах неможливості бокового розширення, показали наявність двох граничних діаграм стиснення: статичної ($\epsilon \rightarrow 0$) та граничної динамічної ($\epsilon = \epsilon_{\text{гран}} = \text{const}$). Вся сукупність діаграм на стиск, що відповідає різним швидкостям деформування, знаходиться в межах цих двох діаграм.

Пізніше Риков Г.В. більш детально розглядає вплив швидкості деформування на стисливість і стиск піщаних і глинистих ґрунтів при короткотривалому навантаженні. Отримані результати свідчать про значний вплив швидкості деформування на їх ущільнення при прикладанні навантаження і практично відсутність такого впливу на розвантаження і міцність ґрунтового масиву. При цьому автор обмежується лише якісним описанням отриманих в'язких ефектів у ґрунтах при динамічному навантаженні без встановлення кількісних закономірностей.

У працях Вовка О.А, Черного Г.І., Кравця В.Г. приділяється увага на залежність об'ємних деформацій та значення коефіцієнта Пуассона ґрунтів від тривалості дії імпульсу тиску при вибуху зарядів у суглинках. Авторами встановлено, що зі збільшенням часу дії тиску коефіцієнт Пуассона у ґрунтах лінійно збільшується, при цьому продовжується розвиток деформацій ґрунтів поза фронтом ударної хвилі.

Результати експериментальних досліджень Г.І. Покровського, Г.М. Ляхова, В.В. Мельнікова, Г.В. Рикова, та інш. по вивченню впливу в'язких властивостей на закономірність розповсюдження вибухових хвиль були узагальнені Г.М. Ляховим та запропонована ним модель, яка враховує пластичні та в'язкі властивості ґрунтів і гірських порід. В цій моделі хвильові процеси розглядаються виходячи із моделей в'язко-пружного і в'язко-

пластичного середовища для випадків плоскої і сферичної симетрії зарядів ВР [37].

За допомогою моделі Г.М. Ляхова В.А. Плаксії вирішив задачу розповсюдження циліндричної вибухової хвилі у водонасиченому ґрунті з урахуванням в'язких властивостей середовища [38].

На практиці ведення вибухових робіт широке використання мають групові заряди, як один з методів керування полем напружень у ґрунтовому масиві. Однак механізм формування цього поля напружень, визначення кроку розташування свердловин, їхнього нахилу або плоскої симетрії накладних зарядів вивчені недостатньо.

При ущільненні структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху важливе значення набуває питання управління сейсмовибуховим імпульсом, яке може бути вирішено за рахунок підсилення конструктивних елементів будівель і споруд, методів, що дозволяють змінювати параметри вибухових хвиль при їхньому формуванні (повітряна оболонка та ін.). Також можна керувати інтенсивністю вибухових хвиль при їхньому розповсюдженні за допомогою штучної перешкоди у вигляді екрануючого прошарку із шару зруйнованих порід.

Таким чином, управління вибуховим імпульсом з метою підвищення ефективності ущільнення ґрунтів є:

- в основі існуючих методів є перерозподіл енергії в зоні низьких частот, оскільки затухання амплітудно-частотного спектру на цих частотах не таке інтенсивне, як на більш високих, а це в свою чергу призводить до більш значного ступеня ущільнення нестійкого ґрунтового масиву;

- при ущільненні значну роль відіграє швидкість прикладання навантаження та тривалість її дії, що впливають на формування напружено – деформованого стану структурно-нестійких ґрунтів у часі;

- особливого значення набуває питання керування сейсмовибуховим імпульсом у зв'язку з можливим використанням енергії вибуху поблизу до забудованих районів;

– дослідження параметрів вибухового імпульсу дозволить більш глибоко розкрити фізичну суть методів керування енергією вибуху і обґрунтувати їх область застосування.

2.4. Застосування малощільних вибухових речовин при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів

Завдяки утворенню значної енергії при вибуховому перетворенні, область застосування вибухових робіт останнім часом значно розширюється в гірничо-будівельних технологіях при підготовці територій для будівництва інженерних споруд різного призначення в м'яких і скельних ґрунтах. Вимоги виробництва в даному напрямку сприяли розвитку наукових досліджень з вдосконалення існуючих та розробці нових технологій або окремих процесів застосування енергії вибуху з метою отримання необхідних результатів при обробці просадних ґрунтових масивів.

Один із напрямків цих досліджень базувався на концепції, яка розглядала взаємодію елементів і системи на межі розподілу «продукти детонації - середовище» в просторово-часових координатах. З точки зору енергетичного показника механізм деформації ґрунтового масиву при прикладанні імпульсного навантаження є інерційним і для його реалізації необхідно дотримуватись визначених параметрів навантаження. Це можна досягти за рахунок регулювання силовою і часовою складовими вибухового імпульсу.

Досягнути значної ефективності при використанні енергії вибуху вибухових речовин (ВР) для ущільнення просадних властивостей лесових ґрунтів можна за рахунок керування вибуховим перетворенням ВР, формування оптимальних параметрів для заданих умов вибухового імпульсу на стадії детонації ВР, добором відповідних рецептур і способів ініціювання, направленням розповсюдження детонації і регулюванням його параметрів по всьому заряду, місцем розташування ВР в ґрунтовому масиві та розробці технологічних схем ущільнення ґрунтового масиву.

Розвиток досліджень з використання енергії вибуху в ґрунтовому масиві належить групі вчених Н.М. Ситому, С.В. Малашенко, І.І. Іщенко, В.П. Алексієвському під керівництвом академіка М.О. Лаврентьєва. Пізніше,

при Інституті геофізики АН УРСР були створені СКТБ та відділ геодинаміки вибуху, які під керівництвом О.О. Вовка займались проблемами прикладної геодинаміки, а саме:

- розробка вибухових технологій з метою отримання підземних (камуфлет них) порожнин і відкритих виїмок в м'яких породах;
- вибухові методи забезпечення стійкості просадних властивостей лесових ґрунтів за рахунок ущільнення скелету ґрунту і пониження фільтрації;
- промисловою сейсмікою та методами захисту забудованих територій від впливу вибухових робіт;
- вдосконалення існуючих рецептур ВР, засобів і методів їх підривання з метою формування оптимального поля напружень при забезпеченні екологічних вимог, та ін. [39].

Важливим етапом в розвитку динаміки ґрунтів і гірничих порід було застосування пружно-пластичної моделі С.С. Григоряна при описанні процесу розповсюдження хвиль, яка окрім рівнянь збереження маси і закону збереження кількості руху, містить ще два рівняння: перше, що враховує об'ємну стисливість середовища у вигляді залежності нормального напруження від деформації, тобто $\sigma = \sigma(\theta)$, яка визначається експериментальним шляхом; друге – пов'язує між собою головні напруження у вигляді умови пластичності Мізеса – Шлейхера (визначається теж експериментально) і являє собою функцію середнього нормального напруження, що характеризує інтенсивність дотичних напружень при пластичному стані твердого тіла.

Значний вагомий вклад в розвиток методів рішення задач у двомірному просторі із застосуванням кінцево-різницевих розрахункових схем внесли В.Г. Кравець, І.А. Лучко, В.А. Плаксій, Н.С. Ремез, достовірність і можливість практичного застосування яких підтверджується численними експериментами із застосуванням новітніх, унікальних методик. Розробкою спеціальних методів з прогнозування механічної дії енергії вибухового перетворення у різних середовищах при дослідженні характеру поведінки ґрунтового масиву під впливом динамічного навантаження займались В.І. Плужник, В.М. Кобасов, П.А. Паршуков, В.І. Кононенко. Значні експериментальні дослідження динамічних хвильових процесів у ґрунтах проводили В.Г. Кравець,

Л.І. Демещук, І.А. Лучко, В.А. Плаксі́й, І.В. Белінський. Причому, при дослідженні ущільненої зони від дії вибуху, В.Г. Кравцем і Л.І. Демещуком вперше були застосовані нетрадиційні радіоактивні методи (γ - γ і нейтронного каротажу) для визначення поля напружень. Крім того, В.Г. Кравець, В.В. Захаров, Л.А. Фурман, О.О. Кузьменко, С.Н. Маркелов, при дослідженні зміни структури ґрунтового масиву в зоні впливу енергії вибуху, вперше застосували сейсмометричний метод. Отримані технологічні рекомендації на основі результатів досліджень поля деформацій навколо заряду ВР сприяли основою розробки вибухових методів ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів (О.О. Вовк, В.Г. Кравець, І.М. Літвінов, Л.І. Демещук, А.М. Ришов, І.А. Лучко, А.В. Михалюк, В.І. Плужник), влаштування протифільтраційних завіс (В.Г. Кравець, О.О. Кузьменко, В.Д. Воробйов), отримання підземних (камуфлетних) порожнин і відкритих виїмок в м'яких породах (О.О. Вовк, В.Г. Кравець, Г.І. Чорний, В.М. Глоба) та зниження фільтраційних втрат у водних магістралях (В.Г. Кравець, Ю.П. Андреев, Л.І. Демещук) [39 – 54].

Подальший розвиток динаміки ґрунтів на практиці призвів до виникнення сейсмічної небезпеки, причинами якої є:

- проведення вибухових робіт поблизу забудованих територій;
- одночасне підривання значної кількості ВР;
- наявність ґрунтових вод, що призводить до збільшення інтенсивності сейсмічних хвиль.

Суттєвий вклад з рішення задач промислової сейсміки виконано українськими ученими. Основні результати висвітлені в публікаціях В.В. Бойка, Ф.І. Кучерявого, В.Д. Воробйова, О.О. Вовка, О.О. Кузьменка, Ю.С. Меца, І.І., Денисюка, А. Закірова, В.Г. Кравця та інших [48, 52, 55 – 60]. На базі результатів яких сформована уява руху сейсмічних хвиль в різних середовищах, а саме: встановлено вплив конструкції циліндричного заряду на інтенсивність сейсмовибухової хвилі і закономірність її затухання на відстані; розроблена методика з визначення сейсмобезпечної відстані з урахуванням анізотропії ґрунтового масиву; розроблена методика з визначення розмірів зони незворотних деформацій ґрунтового масиву; розроблено метод прогнозування

сейсмічного впливу від ряду зарядів при проходці траншей, захисних екранів і утворення щілин поблизу забудованих територій; встановлено, що сейсмічний ефект значно вище при вибуху розосереджених зарядів, ніж при підриванні зосередженого заряду еквівалентної маси.

З метою більш ефективного застосування енергії вибуху сумішевих ВР на основі аміачної селітри в роботі [61] запропонована технологія заряджання зарядів із застосуванням поліетиленових рукавів, яка дозволила зменшити розхід ВР на 17–30 %, забезпечити рівномірність заряду по всій свердловині і стійкість від вимивання а також підвищити ефективність за рахунок різних активних добавок, які забезпечують водостійкість, стабільність та підвищують енергетику ВР.

Поряд з теоретичними та практичними дослідженнями вибухових технологій в гірничо-будівельній справі значна увага приділялась розробці нових і вдосконаленню існуючих рецептур малоціільних ВР. Так, в пошуках нових засобів дроблення негабаритів на кар'єрах, відомими ученими з вибухової справи О.О. Вовком, В.Г. Кравцем, В.І. Плужником, Т.П. Кудрею, М.В. Кривцовим, Ф.М. Галаджієм на основі досліджень фізико-хімічних процесів режиму детонації вибухових складів з добавками поверхнево-активних речовин (ПАР) був розроблений новий клас пінних малоціільних вибухових сумішей місцевого приготування з можливістю регулювання щільністю від 0,15 до 0,84 г/см³ в залежності від технологічних вимог [61 – 66].

Для забезпечення водостійкості найпростіших ВР на основі ANFO в 1961 році Річард Еглі і Альберт Некари запропонували в якості домішки до нітрату амонію додати емульсію «масло у воді». Подальший розвиток досліджень таких малоціільних ВР проводився фірмою Atlas і призвів до створення у 1969 році емульсійних вибухових речовин (ЕВР) зі значно меншим критичним діаметром і швидкістю детонації порівняно з динамітом. Основним автором першого патенту на склад і спосіб отримання ЕВР став Н.Е. Блюм. У початковому вигляді ЕВР були нечутливі до капсуля-детонатора і їх ініціювали за допомогою потужного проміжного бойовика, але з цього моменту почалося активне вдосконалення емульсійних ВР, створення різних емульгаторів, обладнання та технологій їхнього приготування.

З аналізу видно, що на даний час ЕВР мають значні переваги порівняно з іншими класами промислових вибухових речовин, а саме: висока безпека по відношенню до механічних і теплових впливів (удару, тертя, тепла, вогню); можливість регулювання вибухових характеристик з широким діапазоном робочої щільності від 0,5 до 1,5 кг/см³; водостійкість, в результаті чого зберігаються вибухові характеристики в проточних водах на значній глибині та ін. Застосування ЕВР при проведенні підривних робіт забезпечує повну механізацію і автоматизацію виробничих процесів при приготуванні, транспортуванні і заряджанні вибухових свердловин [62].

Подальше вдосконалення існуючих рецептур малощільних водостійких ВР та керування вибуховими параметрами дозволить вдосконалити вибухову технологію ущільнення просадних лесових ґрунтів.

Необхідність ліквідації просідання всієї товщі в ґрунтових умовах II типу посприяло розробці нових ефективних методів ущільнення з використанням енергії вибуху.

Великий вклад у розвиток теоретичних і практичних знань у даній проблемі внесли відомі вітчизняні та зарубіжні науковці: В. В. Бойко, О. О. Вовк, Ю. І. Войтенко, В. В. Воробйов, Г. І. Гайко, С. В. Зайченко, Н. В. Зуєвська, В. Г. Кравець, Н. С. Ремез, М. С. Собко, О.М.Терентьев, К.Н. Ткачук, О.О. Фролов, Б.Ю. Четверик та інші.

Ущільнення просадних ґрунтів вибухами розпочато було ще у 1936 р Н.А. Філімоновим і М.М. Масловим при будівництві Верхньо-Свирської ГЕС. Однак, внаслідок недостатнього водонасичення пісків які ущільнювали утворилася велика кількість тріщин, це призвело до критичного ставлення щодо цього методу [67].

Пізніше, в 1939–1940 роках, серією глибинних вибухів були успішно ущільнені піщані ґрунти в основі земляної греблі водопадку Франклин Фолл в Нью-Гемпшире. Незабаром ефективність методу була затверджена при ущільненні гідравлічних родовищ каналу Кейп-Код у Техасі та Греблі Миндая в Нью-Йорку [68].

У 1951 році В.А. Флорін запропонував ущільнити піщану основу однієї з плотин глибинними вибухами. Рідкісне застосування методу глибинних вибухів і їх занадто короткі описи не дозволяли призначити масу зарядів,

глибину їх закладання, розташування в плані і технологію проведення робіт [69].

П.Л. Івановим була розроблена методика ущільнення піску груповими зарядами і ущільнена дослідна ділянка на одному з островів Волги [70].

У 1954–1956 роках під керівництвом Г.М. Ляхова на будівництві Волзької ГЕС ім. В.І. Леніна були проведені великі польові дослідження дії вибуху в водонасичених піщаних ґрунтах. Істотним результатом роботи було детальне вивчення властивостей ударних хвиль в водонасичених пісках і вплив на ці параметри ґрунтового середовища [71].

Після опублікування в 1940 році короткої статті [68] метод ущільнення піщаних ґрунтів глибинним вибухами в США та інших зарубіжних країнах, як зазначає в історичному огляді Б. Праг, не застосовувався протягом 20 років.

На початку 1960 року спосіб ущільнення глибинними вибухами був майже одночасно використаний фірмами США в трьох віддалених один від одного районах. У жовтні 1959 року було успішно проведено випробування в штаті Флорида при ущільненні середньозернистого піску наливної дамби. Одночасно були проведені роботи по ущільненню основи греблі в районі східного Пакистану [68].

В кінці 1960 були проведені аналогічної роботи по ущільненню дрібнозернистих пісків в районі Пітсфілда Мессачузет.

Позитивні результати ущільнення незв'язаних ґрунтів вибухами дозволили приступити до вивчення можливості їх застосування для ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів. У 1964 році успішно пройшов виробничий експеримент запропонований І.М. Литвиновим метод ущільнення попередньо замочених лесових ґрунтів глибинними вибухами [72, 17].

Пізніше в 1990 – 2000 роках були проведені роботи, які пов'язані з ущільненням насипів мостів та дамб, зокрема Греблі Джебба [73].

При цьому способі ущільнення просадних ґрунтів можна виробляти на практично будь-яку глибину (10 – 30 м і більше). Здійснюється воно шляхом попереднього регульованого замочування нагнітанням води через спеціальні дренажні поглинаючі свердловини за умови доведення ущільнюючої товщі ґрунту до граничної вологості, яка призводить його до нестійкого стану [67].

Характерним, для способу глибинного ущільнення просадних ґрунтів, є буріння вертикальних вибухових і нагнітальних свердловин із застосуванням металевих обсадних труб, що істотно ускладнює технологію проведення ущільнюючих робіт [67].

В цілях ущільнення верхньої частини просадної товщі, яка в результаті попереднього замочування залишається неущільненою, в лабораторії інженерного ґрунтознавство САНІРІ розроблений метод ущільнення ґрунту підводними вибухами. Цей метод заснований на вибуху заряду вибухової речовини в шарі води, що покриває поверхню просадної товщі після попереднього замочування протягом 20 днів до ступеня водонасичення, що становить 0,6 – 0,8 повної вологості. Встановлено, що дія вибуху розповсюджується на глибину до 7 м, при цьому щільність ґрунту підвищується на 11 – 12%, а коефіцієнт фільтрації зменшується в 13 – 14 разів [74].

Широке використання гідровибуху при ущільненні лесових ґрунтів одержало завдяки таким показникам, як спрощена технологія, високий ступінь ущільнення ґрунту та низька вартість підготовки основи. Ущільнення ґрунту гідровибухом виконані в таких містах, як Запоріжжя, Дніпрорудне, Грозне, Волгодонське та Одеса. У місті Запоріжжя на основах виконаних гідровибухом успішно експлуатується більше ста 9 і 10 – поверхових житлових будинків [75].

Використання подовжених горизонтальних зарядів при ущільненні просадних ґрунтів застосовано також у гідромеліоративному будівництві.

Схема вибухових робіт полягає в тому, що по трасі майбутнього каналу проходиться канава заповнена водою і масив ґрунту замочується протягом 7 – 12 днів (в залежності від його властивостей). Після цього на дно канави укладається горизонтальний циліндричний заряд. Потім канава заливається водою і проводиться вибух.

Вибух зарядів проводиться ділянкою довжиною до 100 м. В залежності від форми перерізу каналу на дно його може поміститися один або два горизонтальних циліндричних заряди. Запропонований метод ліквідації просідання дозволяє значно форсувати ці роботи і одночасно скоротити терміни будівництва меліоративних споруд в ґрунтах. У зарубіжній практиці також відомі роботи щодо форсованого ущільнення ґрунтів за допомогою енергії вибуху, де спостерігається висока ефективність даної технології [68, 73].

В роботах [17, 44, 47, 72, 76] наведено технологію виконання широкого спектру допоміжних робіт: підготовка території, буріння дренажних та вибухових свердловин, замочування заряджання, контроль ущільнення та ін. В той же час приділена незначна увага таким параметрам, як: розташування сітки вибухових свердловин, величини зарядів, послідовність підривання, типу вибухових речовин та їх параметрів.

Фізико-хімічні способи ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів забезпечують високу міцність ґрунтів після їх застосування, однак висока вартість закріплення ґрунту, необхідність застосування спеціального обладнання, обмежена глибина обробки, відсутність надійного методу контролю обмежує широке застосування цих методів в будівельній практиці. Тому вони застосовуються, головним чином, при відновленні аварійних будівель та спорудженні відповідальних цивільних і промислових споруд.

Низька вартість робіт і проста технологія механічних методів ліквідації просадних властивостей ґрунтів (ущільнення важкими трамбівками і ґрунтові подушки) забезпечили широке впровадження їх в будівельну практику. Однак, при цьому, необхідно відмітити ряд негативних факторів: сезонність проведення робіт, нерівномірність ущільнення, відсутність спеціального обладнання. Значні терміни виконання робіт, придатність лише для ґрунтових умов І типу просадки.

Ущільнення попередньо замочених ґрунтів підводним підриванням або за допомогою глибинних вибухів виключає такі фактори як сезонність і зменшує термін підготовки основ та забезпечує ущільнення просадної товщі до 30 м і є перспективним при ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів. Проста технологія може забезпечити широке застосування методу глибинних вибухів в практику будівництва при подальшому вдосконаленні технології виконання вибухових робіт з врахуванням параметрів вибухових речовин.

На основі розглянутих методів ліквідації просадних властивостей структурно – нестійких ґрунтів виявлено, що використання енергії вибуху при ущільненні ґрунтового масиву дозволяє повністю або частково усунути просадні властивості нестійких ґрунтів на всю глибину просідання товщі з можливістю керування сейсмічним ефектом вибуху.

Розділ 3. НИЗЬКОШВИДКІСНІ РЕЦЕПТУРИ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ПРОСАДНИХ ГРУНТІВ

3.1. Добір компонентного складу малощільних вибухових речовин підвищеної стабільності

3.1.1. Сумішеві вибухові склади

Виходячи з досвіду застосування енергії вибуху при ущільненні структурно-нестійких просадних ґрунтів з різними фізико-механічними характеристиками на забудованих територіях, набуває актуальності розробка нових низькошвидкісних вибухових сумішей малої щільності з метою отримання необхідного рівномірного ущільнення по всій площі на необхідну глибину та можливістю керування сейсмічним ефектом вибуху [77].

Керування впливом на структурно-нестійкі просадні ґрунти шляхом направленою зміною вибухових систем має суттєве значення в геотехнології, при видобутку корисних копалин, меліоративних роботах, будівництві та воєнній справі. Одним із рішень даної проблеми є добір і розробка нових вибухових композицій в залежності від поставлених задач, фізико-механічних характеристик ґрунтів і гідрогеологічних умов ведення вибухових робіт. Досягти даної мети можна шляхом модернізації найпростіших ВР із застосуванням різних добавок. Розглянемо основні компоненти даних ВР.

Гранульована аміачна селітра насипної щільності в паперовій оболонці детонує зі швидкістю 1300 – 1600 м/с при використанні потужного проміжного детонатора масою 0,4 – 0,8 кг тротилу. Процес детонації нестабільний, критичний діаметр детонації знаходиться в межах 0,25 – 0,30 м.

Домішки до селітри невибухових горючих компонентів, здатних підвищувати теплоту її вибуху, підвищують чутливість суміші до детонації. Причому, зі зростанням вмісту пального енергетичні характеристики і швидкість детонації суміші зростають до досягнення стехіометричного співвідношення між окислювачем і паливом.

При доборі найбільш ефективних паливних домішок слід керуватися доступністю сировини, теплоутворюючою здатністю і щільністю речовин, а також каталітичними і сенсibiliзуючими властивостями [78, 79].

Висока щільність паливних домішок не дозволить отримати необхідну оптимальну щільність заряджання, що повинна становити 300 – 800 кг/м³ для вибухових робіт по ущільненню ґрунтів, контурного підривання, ресурсозберігаючих технологій видобутку блочного каменю і кристалічної сировини та у військовій справі.

Низька щільність окремих твердих паливних домішок дозволяє створювати малощільні сипучі ВР з підвищеною чутливістю до ініціюючого імпульсу, стабільні при транспортуванні та зберіганні. При цьому найбільш перспективними є суміші на основі домішок з поверхнево-активними властивостями.

Характеристики малощільних паливних компонентів.

1. Сульфонал (ТУ 07510508). Синтетичне ПАР – суміш натрієвих солей алкілбензол-сульфакіслот, що отримують з газових фракцій (190 – 260°C) нафти: зовнішній вигляд – порошок світло-жовтого кольору; насипна щільність – 120 – 160 кг/м³; вміст основної речовини – не менше 75 %; загальний вміст сульфату і сульфіту натрію – не більше 20 %; вміст вологи – не більше 3 %; рН 1 % -го водяного розчину – 7,0 – 8,5; токсичність – не токсичний.

2. Вугільний порошок (ТУ 12-01-81): крупність – 0 – 0,1 10⁻³ м; вміст горючих речовин – не менше 80%; вміст вологи – не більше 7 %; токсичність - не токсичний.

3. Полістирол (пінополістирол) по ТУ 2214-126-05766801-2003. Полістирол - лінійний полімер стиролу з початковою щільністю 1050–1100 кг/м³ (марки ПСБ, АСВ): зовнішній вигляд - склоподібні безбарвні гранули; вміст летючих речовин – не більше 12 %; вміст пароутворювача – не більше 4 %; насипна щільність спіненого продукту – 150 – 200 кг/м³; температура спінювання – 85 – 100°C; пожежонебезпека - пожежонебезпечний; температура самозаймання – 440°C; теплотворна здатність – 460,9 10⁵ Дж/кг; коефіцієнт спінювання 15 – 24; токсичність – не токсичний.

Спінювання полістиролу виконують шляхом термічної обробки гранул полімеру при температурі 100 – 120 °С в киплячій воді або паровій ванні. При цьому спінююча добавка розширюється і спучує гранули.

У порівнянні з спінюванням у воді, обробка полістиролу парою призводить до зменшення діаметра пор на 5 – 10 % і зниженням більш ніж в 2 рази вмісту ізопентану при всіх значеннях коефіцієнта спінювання. Втрати ізопентану, активного в процесах вибухового перетворення, в залежності від вмісту цієї речовини в початковому продукті і коефіцієнта спінювання, становить 10 – 30 %.

4. Аміачна селітра (ДСТУ 7370:2013): сумарна масова частка азотнокислого амонію – не менше 98 %; масова частка вологи – не більше 0,8 %; масова частка добавок антизлежування (нітратів кальцію і магнію) – 0,2 – 0,5 %; крупність подрібненого продукту – $0 - 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

5. Аміачна селітра водостійка (ГОСТ 14702-79) марок ЖВК і ЖВГ: масова частка азотнокислого амонію – не менше 9 %; масова частка вологи – не більше 0,8 %; масова частка суміші жирних кислот з парафіном – 0,3 – 0,4 %; водостійкість за гідродинамічним приладом – не менше 2451 Па.

Ця селітра використовується тільки для ВР, що застосовуються в мокрих вибоях і зарядних порожнинах в льодистих породах [80].

Подрібнення селітри можна виконувати в кульових, дискових та струменевих млинах.

Технологія приготування малощільних ВР з порошкоподібними паливними домішками полягає в змішуванні подрібненої аміачної селітри з горючими компонентами в барабанних змішувачах або, при малих об'ємах, вручну з отриманням однорідного продукту [81].

Компонентний склад і характеристики малощільних ВР, розроблених у відділі прикладної геодинаміки вибуху та вдосконалена ВР (АС/СФ/АП), наведені в таблиці 3.1 та 3.2. Для порівняння показані характеристики стандартного ігданіту АС/ДТ.

Таблиця 3.1. Компонентний склад малощільних ВР

№ п/п	Компоненти ВР	Склад компонентів, вага %			
		Ігданіт	Малощільна ВР АС/СФ/ВП	Малощільна ВР АС/СФ/ППС	Малощільна ВР АС/СФ/АП
1	Аміачна селітра	94,5	87	87	90
2	Дизельне паливо	5,5	–	–	–
3	Сульфонал – порошок	–	3	3	6
4	Вугільний пил	–	10	–	–
5	Пінополістирол	–	–	10	–
6	Алюмінієва пудра	–	–	–	4

Розроблені та вдосконалені (АС/СФ/АП) рецептури безтритилових ВР на основі аміачної селітри (АС) і розчину поверхнево-активної речовини (ПАР), повинні працювати в детонаційному режимі та мати властивості ВР і бути чутливими до ініціюючого імпульсу від ДШ, капсуля-детонатора та ін.

Таблиця 3.2. Характеристики малощільних ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР			
			Ігданіт	Малощільна ВР АС/СФ/ВП	Малощільна ВР АС/СФ/ППС	Малощільна ВР АС/СФ/АП
1	Щільність	кг/м ³	900-1000	600-800	300-400	600-800
2	Критичний діаметр - відкритого заряду - в жорсткій оболонці	10 ⁻³ м	160-180	50-80	50-70	50-70
			120-140	30-40	30-40	30-40
3	Теплота вибуху	10 ³ Дж/кг	3765-3850	3670-3830	3600-3800	3680-3840
4	Мінімальний ініціюючий імпульс - відкритого заряду - в жорсткій оболонці	кг ТНТ	0,4-1	0,01-0,02	0,01-0,02	0,01-0,02
			0,4	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8
5	Фізична стабільність в інтервалі температур	°С	+30 – -40	+40 – -50	+40 – -50	+40 – -50
6	Льодостійкість (втрата ваги при витримці в мекеті льодової свердловини) - через 2 години - через 4 години	%	2-5	0,7-1,0	1,0-1,3	0,8-1,1
			10-15	1,2-1,6	1,4-1,8	1,3-1,7

Для перевірки цієї суміші щодо спроможності забезпечення ущільнення структурно-нестійких ґрунтів, було проведено розрахунок об'єму та тиску безтритилових ВР в режимі детонації основних компонентів суміші. Питомий об'єм газів, який буде утворюватися при детонації 1 кг суміші (нітрат амонію

(NH_4NO_3) та поверхнево-активного розчину), приведений до нормальних умов (температура 0°C , тиск 133,3 Па), можна отримати за формулою:

$$V = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n) \cdot 1000}{NM} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (3.1)$$

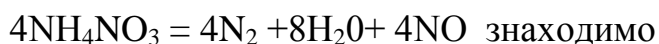
де $n_1 + n_2 + \dots + n_n$ – число газоутворених грам-молекул у продуктах горіння;
 N – число грам-молекул продукту, який бере участь в реакції;
 M – молекулярна маса продукту горіння.

Найбільш широко у промисловості та гірничій справі застосовуються суміші аміачної селітри з різними видами вуглеводневих горючих матеріалів, інших вибухових речовин, а також багатоконпонентні суміші, а саме: склади типу аміачна селітра/дизельне паливо (АС/ДТ); рідка суміш аміачна селітра/гідразин; водонаповненні промислові вибухові речовини (акванал, акваніт та інші); суміші з іншими вибуховими речовинами (амоніт, детоніт та інші); суміш з алюмінієвою пудрою (амонал).

Залежно від призначення аміачну селітру випускають двох марок: А та Б. А – для промисловості, Б – для сільського господарства. Допускається застосування селітри марки Б для промисловості. Для зменшення гігроскопічності та злежуваності у марку Б вводять різні кондиціонуючі домішки (доломітну, сульфатну або магнеєву).

Хімічна формула аміачної селітри: NH_4NO_3 , щільність $1,725 \text{ г/см}^3$, температура плавлення – $169,6^\circ \text{C}$, температура кипіння – 235°C , температура розкладання – 210°C .

За реакцією хімічного розкладу нітрату амонію.



$$V = \frac{22,4(112+154+60) \cdot 1000}{320} = 228,29 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Тиск газів суміші в полімерному циліндричному корпусі, запаяний з обох боків, в режимі детонації визначається за формулою:

$$P = \frac{98P_0VT\kappa\Delta}{273(1 - 0,001V\Delta)} \text{ кПа}, \quad (3.2)$$

де P_0 – атмосферний тиск газів при горінні приймається $1,03 \text{ кгс/см}^2$;

V – питомий об’єм газів, л/кг; T_k – абсолютна температура газів горіння в градусах Кельвіна; Δ - щільність суміші, кг/дм³.

$$P = \frac{98 \times 1.03 \times 228.29 \times 273 \times 1,725}{273(1 - 0,001 \times 228,29 \times 1,725)} = 64113,23 \text{ кПа}.$$

Визначимо відсоток дизельного пального в аміачній селітрі для одержання суміші з нульовим кисневим балансом.

Знаходимо значення кисневого балансу (КБ), який для аміачної селітри позитивний і становить $KB_1 = +20 \%$, для дизельного пального – негативний і становить $KB_2 = -318 \%$.

Кількість вагових частин аміачної селітри, яка потрібна для повного окислювання однієї частини дизельного пального, визначається за формулою:

$$M = (-KB_2) / (+KB_1) = (-318) / (+20) = -15,9 \quad (3.3)$$

Таким чином, одна вагова частина дизельного пального потребує 15,9 частин аміачної селітри.

Вміст компонентів у складі суміші визначається за формулою [70]:

$$P_1 = \frac{KB_2}{KB_1 - KB_2} \quad P_2 = \frac{KB_1}{KB_1 - KB_2}, \text{ або } P_2 = 1 - P_1 \quad (3.4)$$

Значення КБ першого та другого компонентів підставляються у формулу (3.4) з відповідними знаками (плюс або мінус).

Для ігданіту, який складається із аміачної селітри та дизельного пального, використовуючи формулу (3.4), отримаємо:

$$P_2 = \frac{+20\%}{+20\% - (-318\%)} = \frac{20\%}{338\%} = 0,06; \quad P_1 = 1 - P_2 = 0,94$$

Таким чином, КБ такої суміші буде нульовим за умов, що в ній буде 94 % аміачної селітри та 6 % дизельного пального.

Кисневий баланс вибухових сумішей, що складаються з кількох речовин, визначається за формулою:

$$KB_{\Sigma} = KB_1 \cdot P_1 + KB_2 \cdot P_2 + \dots + KB_i \cdot P_i, \quad (3.5)$$

де KB_i - кисневий баланс кожного компонента вибухової суміші, %; P_i - вміст відповідного компонента в суміші в частках одиниці.

Малоцільна ВР на основі АС/СФ/АП складається з аміачної селітри з кисневим балансом $KB_1 = +20\%$, сульфоналу ($C_{16-19}H_{29-35}SO_3Na$) з кисневим балансом $KB_2 = -230\%$ та алюмінієвої пудри (Al) з кисневим балансом $KB_3 = -89\%$. Підставляючи дані у формулу (3.5), отримуємо КБ для даної рецептури:

$$KB_{\Sigma} = (+20\%) \cdot 0,90 + (-230\%) \cdot 0,06 + (-89\%) \cdot 0,04 = 0,6$$

Із розрахунку видно, що запропонована рецептура має практично нульовий кисневий баланс.

З наведених даних видно, що щільність малоцільних композицій регулюється в діапазоні $300 - 800 \text{ кг/м}^3$, критичний діаметр зарядів цих ВР в жорсткій оболонці становить $30 - 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, в той час, як у ігданіта критичний діаметр становить $120 - 140 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Мінімальний ініціюючий імпульс відкритого заряду малоцільних сумішей становить $0,01 - 0,02 \text{ кг ТНТ}$; заряди в жорсткій оболонці чутливі до детонатора ЕД-8.

Помітного підвищення чутливості малоцільних вибухових сумішей до ініціюючого імпульсу вдалося досягти за рахунок застосування домішок на основі натрієвих солей алкілбензолсульфакіслот, які володіють каталітичними властивостями. При цьому це практично не підвищило чутливість ВР до механічних впливів (удару, тертя, іскри, променю вогню). Тому розроблені вибухові суміші безпечні при виготовленні та застосуванні.

Висока фізична стабільність сипучих малоцільних ВР забезпечує збереження вибухових характеристик цих сумішей не менше 1 міс в діапазоні температур від $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ до $-40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рівень льодостійкості малоцільних ВР дозволяє застосовувати їх в свердловинах, пробурених в льодистих породах, при знаходженні заряду у вибої близько 12 год. Застосування в якості окислювача водостійкої селітри марок ЖВК або ЖВГ забезпечує повну льодостійкість такого типу ВР.

Носійна здатність зарядів сипучих малоцільних ВР досить висока, що дозволяє використовувати їх при ущільненні ґрунтів в плоских зарядах з піщаною забивкою.

3.1.2. Сумішеві склади на основі утилізованих вибухових речовин

При доборі рецептур ВР для ущільнення структурно-нестійких просадних ґрунтів з різними фізико-механічними характеристиками доцільно керуватись показниками, що забезпечують більш тривалу дію на ґрунтовий масив і в той же час більш м'яке його стиснення. Це швидкість детонації, критичний діаметр детонації. Крім того світовий досвід показує, що склад ВР для ущільнення ґрунтового масиву повинен мати невисоку калорійність та низьке значення об'єму газів, що виділяються при вибуховому розкладі ВР.

Для виконання термодинамічних розрахунків сумішевих рецептур вибухових речовин для ущільнення ґрунтового масиву проведений вибір гіпотетичних рецептур на основі гексогенмістких утилізованих матеріалів А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС, амотолу та перхлорату калію. В якості каталізаторів розкладу KClO_4 вибрані двоокис титану TiO_2 і азотнокислий барій $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. В якості допоміжного пального та для поліпшення органолептичних якостей, а також зменшення злежування в склад додавали дизельне паливо.

На основі наведених даних та їх аналізу обрано склади сумішевих ВР та відсоткові співвідношення компонентів для проведення термодинамічних розрахунків.

У таблицях 3.3 і 3.4 наведений компонентний та хімічний склади сумішевих ВР на основі А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС, амотолу та KClO_4 . За результатами проведених термодинамічних розрахунків має бути обраний оптимальний склад з характеристиками, що забезпечать вимоги до м'якого відділення блочного каменю.

Таблиця 3.3. Компонентний склад досліджених сумішевих ВР на основі утилізованих ВР

Найменування компонентів	Номери та склад зразків сумішевих ВР										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перхлорат калію	88,0	91,0	89,0	82,0	83,0	89,0	87,0	93,0	86,0	87,0	85,0
А-ІХ-1	-	-	5,0	8,0	10,0	-	-	-	-	-	-
А-ІХ-2	-	-	-	-	-	5	8	-	-	-	-
МС	-	-	-	-	-	-	-	5	8	-	-
Амотол	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	10
Барій азотнокислий	5,0	5,0	-	3,0	4,0	3,0	3,0	-	3,0	3,0	3,0
Двоокис титану	4,0	-	3,0	3,0	3,0	-	2,0	2,0	-	-	2,0
Дизельне пальне	3,0	4,0	3,0	4,0	-	3,0	-	-	3,0	3,0	-

Таблиця 3.4. Хімічний склад сумішевих ВР на основі утилізованих ВР

Найменування компонентів	Номери та склад зразків сумішевих ВР										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перхлорат калію $KClO_4$	88,0	91,0	89,0	82,0	83,0	89,0	87,0	93,0	86,0	87,0	85,0
Гексоген $C_3H_6N_6O_6$	-	-	5,0	8,0	10,0	3,8	6,1	2,9	4,6	-	-
Тротил $C_7H_5N_3O_6$	-	-	-	-	-	-	-	0,9	1,5	1,4	2,0
Алюміній Al	-	-	-	-	-	1,0	1,6	0,9	1,4	-	-
Церезин C_7H_{16}	-	-	-	-	-	0,2	0,3	0,3	0,5	-	-
Аміачна селітра NH_4NO_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,6	8,0
Барій азотнокислий $Ba(NO_3)_2$	5,0	5,0	-	3,0	4,0	3,0	3,0	-	3,0	3,0	3,0
Двоокис титану TiO_2	4,0	-	3,0	3,0	3,0	-	2,0	2,0	-	-	2,0
Дизельне пальне $C_{16}H_{34}$	3,0	4,0	3,0	4,0	-	3,0	-	-	3,0	3,0	-

При розгляді характеристик досліджуваних утилізованих ВР – МС, А-ІХ-1, А-ІХ-2 та амотолу (табл. 3.5) видно, що при відносно малому критичному діаметрі цих ВР швидкість їх детонації складає від 4700 до понад 5000 м/с, тобто вибухові складові в чистому вигляді з такою швидкістю детонації непридатні для ущільнення структурно-нестійкого ґрунтового масиву. Оскільки недоліком утилізованих ВР є велика кількість газів, що утворюється при вибуху, в тому числі токсичних, добір компонентів мав враховувати і екологічний фактор.

Таблиця 3.5. Характеристики досліджуваних утилізованих ВР

Характеристики	МС	А-ІХ-1	А-ІХ-2	Амотол
Критичний діаметр, мм	15-20	20	20	40-50
Швидкість детонації, м/с	5400	6000	5800	4700

3.1.3. Спінені вибухові композиції

Беручи до уваги, що метод ущільнення просадних лесових ґрунтів за допомогою енергії вибухів застосовується на забудованих територіях, особливої важливості набуває питання управління вибуховим імпульсом з метою зниження шкідливого сейсмічного впливу на навколишні споруди. Актуальним для вирішення цієї проблеми є розроблення нових низькошвидкісних вибухових сумішей з менш інтенсивним тривалим імпульсом для забезпечення рівномірного ущільнення на необхідну товщю просадних лесових ґрунтів.

Традиційно водонаповнені спінені вибухові композиції складаються з аміачної селітри, поверхнево-активних речовин (ПАР) і води [82].

Піноутворювачі є поверхнево-активними речовинами першого класу на основі низькомолекулярних з'єднань дифільного характеру, що мають гідрофільну частину (одну або кілька полярних груп, наприклад -ОН, -СООН, -S O₃H, -OSO₃H, COOMe, N⁺(CH₃)₃J⁻, -NH₂) і гідрофобний аліфатичний ланцюг, іноді включає ароматичну групу.

За хімічними властивостями ПАР поділяються на аніоноактивні (наприклад, солі карбонових кислот, алкілсульфати, алкілсульфонати),

катионоактивні (наприклад, четвертинні амонієві основи, солі амінів) і неіоногенні (спирти, ефіри і т.д.).

ПАР це багатоатомні органічні молекули, тому головним є питання про взаємозв'язок між будовою молекул і їх поверхнево-активними властивостями. Згідно з правилом Траубе, при збільшенні числа атомів вуглецю в алкільному ланцюгу поверхнева активність зростає в 3,2 на кожен групу $=\text{CH}_2$. Причини, що обумовлюють таку поведінку ПАР, пояснюються тим, що поверхнева активність визначається роботою адсорбції, тобто збереженням енергії від переходу молекули ПАР з об'єму фази на поверхню, яка на одну метиленову групу становить 3 кДж/моль. Звідси ряд дослідників роблять висновки, що кожна група $=\text{CH}_2$ розташована по відношенню до поверхні так само, як будь-яка інша група в ланцюзі, а це може бути тільки при горизонтальному розташуванні [83].

ПАР першого класу відносять до колоїдних або міцелярнорозчинних, другого класу – до неколоїдних або молекулярнорозчинних. Перше застосування ПАР першого класу знайшли місце в якості миючих засобів, емульгаторів і піноутворювачів. Неколоїдні ПАР застосовують як емульгатори або стабілізатори ПАР.

Тому більшість практично важливих промислових емульгаторів і піноутворювачів є складні суміші поверхнево-активних речовин. В результаті на межі розподілу емульсії або піни відбувається адсорбція відразу кілька речовин. Однак процес адсорбції навіть двох ПАР вивчений недостатньо, що суттєво ускладнює завдання отримання стабільної піни.

Піна – висококонцентрована гетерогенна система газ-рідина, в якій бульбашки газу розділені тонкими плоскими прошарками рідини, що утворюють замкнуту решітку. Від висококонцентрованої емульсії піни відрізняються тим, що рідина дисперсної фази замінена газом.

Принципово причини стійкості піни ті ж самі, що й у висококонцентрованих емульсії, однак наявність плоских плівок додає ряд особливостей у багатьох властивостях пін.

На відміну від емульсій, які в ряді випадків стійкі протягом багатьох днів піни, за невеликим винятком (тверді піни), стійкі лише протягом декількох годин [84].

Значно менша стійкість піни в порівнянні з емульсіями, обумовлена тим, що плівки піни маючи мікронну товщину дуже легко піддаються до зовнішніх впливів (випаровування і т.п.). Лише в умовах герметизації в зарядній порожнині піни наближаються по стійкості до висококонцентрованих емульсій, стабілізованими тими ж ПАР, в яких плівки неперервної фази захищені від випаровування та інших впливів рідиною дисперсної фази.

У нашому випадку, коли рідка фаза представлена у вигляді суспензії селітри з водою, піносуспензія більш стійка, так як рідина дисперсної фази випаровується, а піна залишається у вигляді твердого каркаса частинок селітри, зцементованих ПАР.

Характеристики піноутворювачів [85].

1. Сульфосолі – контакт чорний нейтралізований, рафінований (КЧНР), ТУ 38-3022-80. Дана ПАР є продуктом нейтралізації содою або їдким натрієм кислого гудрону – відходу виробництва рафінованого від масел і смол, одержуваного сульфуванням контактним газом (SO_3) прямої перегонки або гідроочищених гасо-газойльових фракцій нафти або легкого газойлю каталітичного крекінгу.

- 1) Зовнішній вигляд – малов'язка темна рідина
- 2) рН продукту – 7 – 10
- 3) Масова частка сульфосолей – 40 – 45 %
- 4) Масова частка несульфатних речовин (смол і масел) – не більше 1 %
- 5) Пожежонебезпека – пожежобезпечний
- 6) Токсичність – не токсичний

2. Рафінований алкіларілсульфонат марки ДС-РАС (ТУ 38-10764-75). Ця ПАР створена на основі сульфокислот гасових фракцій і являє собою натрові солі нафтових сульфокислот.

- 1) Зовнішній вигляд – однорідна прозора рідина
- 2) Розчинність у воді – повна

- 3) Вміст нессульфатних речовин – не більше 1 %
- 4) Вміст основної речовини – не менше 45 %
- 5) Вміст соди – не більше 3 %
- 6) Пожежонебезпека – пожежобезпечний
- 7) Токсичність – не токсичний

3. Алкілсульфати натрію (СТП 13-1-78). Цю ПАР отримують при сульфатуванні олеумом синтетичних жирних первинних спиртів фр. C₁₀-C₁₈ або вторинних немильних спиртів, з наступною нейтралізацією кислих сульфоефірів їдким натром.

- 1) Зовнішній вигляд – паста світло-жовтого кольору
- 2) Вміст основної речовини – не менше 25 %
- 3) Вміст нессульфатних з'єднань – не менше 12 %
- 4) Пожежонебезпека – пожежобезпечний
- 5) Токсичність – не токсичний

4. Алкілсульфати натрію - миючий «Прогрес» (ТУ 10 719-707). ПАР марки «Прогрес» (натрієві солі вторинних алкілсульфатів) отримують шляхом сульфатування суміші технічних фракцій олефінових вуглеводнів нормальної будови з наступною нейтралізацією і очищенням .

- 1) Зовнішній вигляд – однорідна рідина
- 2) Вміст основної речовини – не менше 30 %
- 3) Вміст нессульфатних вуглеводнів по відношенню до активної речовини – не більше 1 %
- 4) рН продукту – 7,5 – 8,5
- 5) Пожежонебезпека – пожежобезпечний
- 6) Токсичність – не токсичний

Компонентний склад і характеристики спінених пастоподібних ВР наведені в таблиці 3.6. Як видно з приведених даних, щільність вибухових композицій за рахунок аерації суміші може регулюватись в межах від 200 до 800 кг/м³, критичний діаметр зарядів ВР в жорсткій оболонці становить (30 – 40)·10⁻³ м. Заряди в жорсткій оболонці чутливі до детонатора ЕД-8.

Фізична стабільність аерованої системи в діапазоні температур від +30 до -10°C у відкритій посудині становить 9 – 24 год, в закритій посудині становить

порядку 5 – 8 діб. При зниженні температури до -15°C стабільність ВР різко падає за рахунок замерзання оболонок пінокомірок і руйнування піни.

Льодостійкість спінених ВР низька, так як піносуспензія розчиняє лід, обводнюється і втрачає стабільність.

Таблиця 3.6. Компонентний склад і характеристики спінених пастоподібних ВР

№ п/п	Компоненти ВР	Вміст компонентів, мас. %				
		Суміш I	Суміш II	Суміш III	Суміш IV	Суміш V
1	Аміачна селітра	92,0-93,3	89,8-92,9	86,5-88,5	90,5-91,5	83,5-84,5
2	Сульфосолі - контакт чорний нейтралізований, рафінований	2,0-4,0	2,0-4,0	–	–	–
3	Рафінований алкіларілсульфонат	1,5-3,5	–	5,0-7,0	5,0-7,0	5,0-7,0
4	Етилендіамін	0,2-0,5	–	–	–	–
5	Алкілсульфати натрію	–	1,0-3,0	–	–	–
6	Контакт Петрова	–	–	1,0-3,0	–	1,0-3,0
7	Карбоксиметилцелюлоза	–	–	0,5-1,5	–	0,5-1,5
8	Алкілсульфати натрію (вторичн.)	–	–	–	1,0-3,0	–
9	Поліакриламід	–	–	–	0,5-1,5	–
10	Вода	1,0-2,0	2,0-5,0	3,0-4,0	–	3,0-4,0
11	Алюмінієва пудра	–	–	–	–	3,0-4,0
Характеристики						
1	Щільність, кг/м ³	500-800	500-800	200-350	200-250	300-650
2	Кратність піни	1,8-3,0	1,8-3,0	3,6-4,0	3,6-4,2	3,6-4,0
3	Критичний діаметр, 10 ⁻³ м - відкритого заряду	50-70	50-80	50-70	60-90	50-70
	- в жорсткій оболонці	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40
4	Фізична стабільність в інтервалі температур від +30 до -10°C: – у відкритій посудині, год.	9-10	10-12	14-17	20-24	15-18
	– у закритій посудині, діб	5-7	6-7	5-8	–	6-8
5	Теплота вибуху, 10 ³ Дж/кг	3500-3770	3520-3780	3500-3700	3500-3700	3530-3750
6	Мінімальний ініціюючий імпульс - відкритого заряду, кг ТНТ	0,01-0,03	0,01-0,03	0,01-0,03	0,01-0,02	0,01-0,03
	- в жорсткій оболонці	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8
7	Льодостійкість	не льодостійкі				

3.2. Формування вибухових характеристик вдосконалених малощільних вибухових речовин

3.2.1. Параметри детонації сумішевих вибухових речовин

Динамічні характеристики малощільних сипучих ВР досліджувалися на вибуховому полігоні НАН України в порівнянні з характеристиками штатного ВР – амоніту № 6ЖВ і стандартного ігданіту АС/ДТ. При цьому досліджувалась детонація відкритих зарядів ігданіту діаметром $(160 - 180) \cdot 10^{-3}$ м, малощільних ВР і амоніту – діаметром $(50 - 60) \cdot 10^{-3}$ м. У жорсткій оболонці діаметр зарядів ігданіту становить $140 \cdot 10^{-3}$ м, малощільних ВР і амоніту – $(30 - 40) \cdot 10^{-3}$ м. Бризантність зарядів визначалась згідно ДСТУ EN 13631-1:2008 «Вибухові речовини для цивільного застосування. Бризантні вибухові речовини. Частина 1. Вимоги» [86].

Час наростання тиску в імпульсі та тиску на фронті ударної хвилі визначався експериментальним шляхом за стандартними методиками, швидкість наростання тиску до максимуму – за розрахунком.

Динамічні характеристики сипких вибухових сумішей наведені у таблиці 3.7. Як видно з приведених даних, на відміну від амоніту № 6 ЖВ і ігданіту, мінімальна швидкість детонації малощільних ВР у відкритих зарядах становить $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м/с, а в зарядах в жорсткій оболонці – $(1,4 - 1,6) \cdot 10^{-3}$ м/с. Розходження значень швидкості детонації в малощільних сумішах становить 30 – 35%, це свідчить про пульсуючий режим детонації цих ВР.

Встановлена бризантність малощільних ВР, становить $(5 - 11) \cdot 10^{-3}$ м, в той час, як у ігданіту вона становить $(15 - 20) \cdot 10^{-3}$ м, а штатного амоніту – $(24 - 29) \cdot 10^{-3}$ м.

Тривалість зростання тиску в імпульсі до максимуму у малощільних ВР знаходиться в межах $(43 - 60) \cdot 10^{-6}$ с, у ігданіту $(30 - 40) \cdot 10^{-6}$ с, у бризантного амоніту – $(4 - 5) \cdot 10^{-6}$ с. Тиск на фронті хвилі у малощільних сумішей знаходиться в межах $(0,5 - 0,95) \cdot 10^9$ Па, а у амоніту тиск істотно більше і досягає $(5,5 - 6,1) \cdot 10^9$ Па.

Таблиця 3.7. Динамічні характеристики сумішевих ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР				
			Амоніт №6ЖВ	Ігданіт АС/ДТ	Малощільна ВР АС/СФ/ВП	Малощільна ВР АС/СФ/ППС	Малощільна ВР АС/СФ/АП
1	Швидкість детонації: відкритий заряд	10^3 м/с	3,2-3,7	2,4-2,6	1,4-2,0	1,0-1,5	1,5-2,1
	заряд в жорсткій оболонці		3,5-4,8	2,7-3,0	1,6-2,4	1,4-2,1	1,6-2,5
2	Бризантність ВР	10^{-3} м	24-29	15-20	8-10	5-7	9-11
3	Час зростання тиску в імпульсі	10^{-6} с	4-5	30-40	45-50	55-60	43-48
4	Тиск на фронті хвилі	10^9 Па	5,5-6,1	2,0-2,5	0,8-0,9	0,5-0,6	0,85-0,95
5	Швидкість зростання тиску	10^{14} Па/с	11-15	0,5-0,8	0,16-0,20	0,08-0,11	0,18-0,22

Швидкість зростання тиску в імпульсі у малощільних ВР становить $(0,08 - 0,22) \cdot 10^{14}$ Па/с, проти $(11 - 15) \cdot 10^{14}$ Па/с у амоніту № 6ЖВ.

Висока пористість малощільних сумішей обумовлює режим повільного вибухового перетворення цих сумішей, що забезпечує ефективність їх використання на окремих видах вибухових робіт, зокрема, при роботі вибуху на викидання і ущільнення нестійких просадних ґрунтів.

3.2.2. Параметри детонації спінених вибухових композицій

Динамічні характеристики спінених сумішей досліджувалися в порівнянні з малощільними ВР на основі АС/СФ/ППС. При цьому вивчалася детонація відкритих зарядів діаметром $(50 - 90) \cdot 10^{-3}$ м. Бризантність зарядів вивчалася за ГОСТ 5984-80. У всіх випадках досліджувались свіжоприготовлені спінені суміші, так як піносистеми змінюють свої характеристики в часі.

Динамічні характеристики спінених ВР наведені у таблиці 3.8. З наведених даних видно, що швидкість детонації відкритих зарядів ВР становить $(1,0 - 2,5) \cdot 10^3$ м/с, малощільної сипучої ВР на основі АС/СФ/ППС $(1,0 - 1,5) \cdot 10^3$ м/с. Відповідно, бризантність спінених сумішей трохи вище, ніж сипучих – $(7 - 11) \cdot 10^{-3}$ м проти $(5 - 8) \cdot 10^{-3}$ м.

Таблиця 3.8. Динамічні характеристики спінених ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР					Малощільна ВР АС/СФ/ППС
			Суміш I	Суміш II	Суміш III	Суміш IV	Суміш V	
1	Швидкість детонації: - відкритий заряд	10^3 м/с	1,0-2,4	1,0-2,5	–	–	1,0-2,2	1,0-1,5
	- заряд в жорсткій оболонці		1,1-3,2	1,1-3,0	1,9-2,1	2,0-2,2	2,1-2,3	1,4-2,1
2	Бризантність в сталевому кільці	10^{-3} м	7-11	7-11	7-9	7-8	8-11	5-8
3	Час зростання тиску в імпульсі	10^{-6} с	40-50	45-50	50-55	50-60	55-60	55-60
4	Тиск на фронті хвилі	10^9 Па	0,7-0,8	0,7-0,8	0,6-0,7	0,5-0,7	0,6-0,8	0,5-0,6
5	Швидкість зростання тиску	10^{14} Па/с	0,14-0,20	0,14-0,17	0,11-0,14	0,08-0,14	0,12-0,16	0,08-0,11

Тривалість зростання тиску в імпульсі до максимуму у досліджених вибухових композиціях близька і складає $(40-60) \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Тиск на фронті хвилі у спінених ВР на $(0,1-0,2) \cdot 10^9 \text{ Па}$ вище, ніж у сипучих малощільних ВР.

Швидкість зростання тиску в імпульсі у спінених ВР становить $(0,08 - 0,20) \cdot 10^{14} \text{ Па/с}$, у сипучих сумішей - $(0,08 - 0,11) \cdot 10^{14} \text{ Па/с}$.

Дослідження динамічних характеристик спінених ВР змінної щільності показує, що описані спінені вибухові композиції можуть ефективно використовуватися для рівномірного ущільнення просядних лесових ґрунтів на необхідну потужність та при розмінуванні мінних полів.

3.2.3. Термодинамічні та екологічні характеристики сумішевих складів на основі утилізованих вибухових матеріалів

При розробці складів сумішевих ВР на основі утилізованих вибухових матеріалів проводили термодинамічні розрахунки з метою попередньої оцінки їх працездатності. Термодинамічні розрахунки дозволяють прогнозувати здатність сумішевих ВР для ущільнення структурно-нестійких ґрунтів. До

важливих факторів відносять показники теоретичної енергії сумішевої ВР – теплоти вибуху, швидкості детонації, об'єму газів при вибуху, фугасності, детонаційного тиску та ін. Теплота вибуху є найбільш важливою характеристикою вибухових матеріалів, від якої залежить швидкість детонації, температура вибуху, працездатність і загальна дія вибуху. За теплою вибуху оцінювали ефективність сумішевих ВР та загальну дію вибуху. Чим більше тепла виділяється при підриванні сумішевої ВР, тим вище її працездатність.

Сумішеві ВР повинні мати невисоку швидкість детонації (від 1800 до 2300 м/с) для забезпечення більш м'якої та тривалої дії ущільнення ґрунтового масиву. Швидкість детонації характеризує швидкість звільнення теплової енергії, яка міститься у вибуховій речовині. З підвищенням швидкості детонації росте енергія ударної хвилі, що сприяє підвищенню ступеня ущільнення. Швидкість детонації сумішевих ВР має значний вплив на величину тиску на фронті детонаційної хвилі. Тобто, чим нижче швидкість детонації, тим буде більша тривалість її дії на ґрунтовий масив при меншому тиску. А це сприятиме більш рівномірному ущільненню по всій товщі ґрунтового масиву без переущільнення у безпосередній близькості від заряду та не до ущільнення на певній відстані від нього.

Термодинамічні розрахунки сумішевих ВР проводили за методом Авакяна, який дозволяє робити розрахунки енергетичних і вибухових характеристик ВР: теплоти вибуху, температури вибуху, об'єму газів при вибуху, кисневого балансу, детонаційного тиску, швидкості детонації, фугасності та ін. [87].

Термодинамічні характеристики вибухових сумішей на основі утилізованих ВР (А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС, амотолу та KClO_4) наведені у табл. 2.9. В ній також наведено визначені експериментально методом конуса з кутом розкриття 5° значення критичного діаметра та визначені на зарядах діаметром 52мм значення швидкості детонації сумішей. Узагальнюючи ці дані, можна відзначити, що для сумішей на основі ВР А-ІХ-1 критичний діаметр змінюється в межах $24 \div 30$ мм при швидкості детонації 1920 – 1970м/с, на основі ВР А-ІХ-2 з критичним діаметром $d = 26 - 28$ мм, швидкість детонації складає $D = 1950 - 1980$ м/с, для сумішей на основі МС з критичним діаметром $d = 19 - 21$ мм,

швидкість детонації складає $D = 2630 - 2810$ м/с. Таким чином, експериментальні результати вимірювань свідчать про досягнення поставленої в дослідженнях мети – отримання низькошвидкісних вибухових сумішей, що не вміщують нітроефіри, з прийнятним критичним діаметром та швидкістю детонації, що відповідають вимогам технології ущільнення структурно-нестійких ґрунтів системою свердловинних зарядів малого діаметра та за допомогою траншейного способу.

Результати термодинамічних розрахунків показали, що вибір компонентів для сумішевих низькошвидкісних ВР зроблено правильно.

Згідно з термодинамічними розрахунками найбільш оптимальною серед досліджених низькошвидкісних сумішевих ВР є рецептури на основі суміші утилізованих вибухових матеріалів та окислювача – перхлорату калію з домішками, тобто: утилізована ВР (А-ІХ-1 або А-ІХ-2) – 8–10%; перхлорат калію – 83–88%; каталізатори розкладу перхлорату калію – до 6 %.

В хімічному відношенні вибух являє собою незворотну реакцію перетворення вихідної речовини, або суміші речовин у газоподібні продукти. З метою визначення кількості газів, що виділяються при підриванні зразків 1–11 сумішевих ВР (табл. 2.10) були проведені розрахунки по багатоцільовій програмі „Астра” – „Моделювання хімічних та фазових рівноваг при високих температурах”.

Програма „Астра” призначена для визначення характеристик рівноваги, фазового та хімічного складу різних систем. В основу програми покладено універсальний термодинамічний метод визначення характеристик рівноваги гетерогенних систем, які засновані на фундаментальному принципі максимуму ентропії. Програма дозволяє провести розрахунки кількості та складу утворених газоподібних продуктів згорання (з надлишком окислювача) з використанням вищих валентностей елементів та гетерогенних середовищ за фронтом ударної хвилі.

Для проведення розрахунків потрібно надати вихідну інформацію щодо елементарного складу термодинамічної системи, що розглядається, та її початкову концентрацію. Опис хімічного складу – пряме завдання мольного вмісту кожного елементу, який входить в систему. Також в базу даних

необхідно надати термодинамічні, теплофізичні та термохімічні властивості складових частин та їх щільність.

Результати розрахунків кількості газів, що виділяються при підриванні сумішевих ВР на основі А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС, амотолу та перхлорату калію, наведено у таблиці 3.10.

Вміст сумішевих ВР наведено у розділах 3.2.1 та 3.2.2.

В таблиці 3.10 надано газовий склад продуктів, що виділяються при підриві сумішевих ВР, кількість яких перевищує 0,1 моль/кг.

Аналіз таблиці 3.10 показує, що при вибуху сумішевих ВР виділяється багато кисню, оскільки кисневий баланс ВР позитивний. Із нетоксичних газів виділяються водяна пара, двоокис вуглецю, водень та азот, які є складовими атмосферного повітря. У зразках №5 та №7 вміст токсичного газу – оксиду вуглецю (СО) при вибуху не більше 1 моль/кг, що забезпечується відповідним кисневим балансом ВР. У газових продуктах також присутня невелика кількість оксиду азоту (NO) – до 0,5 моль/кг і менше.

Щодо продуктів розкладу окислювача $KClO_4$, то у газовому складі присутні хлор та незначна кількість HCl . Із хлормістких продуктів розкладу ВР найбільше конденсованих (пилоподібних) часток солі KCl . Із конденсованих продуктів також присутні сліди окисів титану та барію.

В цілому газовий склад продуктів розкладу за вмістом токсичних газів знаходиться на рівні газового складу запобіжних ВР, в яких одним із компонентів є $NaCl$ (кухонна сіль). Враховуючи те, що для ущільнення ґрунтового масиву необхідна відносно незначна кількість вибухових речовин (до 30-40 кг), екологічний стан атмосфери при вибуху ВР за розрахунками має бути задовільним.

Таблиця 3.9. Термодинамічні характеристики вибухових сумішей

Найменування характеристики	Номери зразків та їх характеристики										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кисневий баланс, %	31,8	29,7	28,2	23,2	36,1	28,5	37,3	41,8	25,2	30,7	40,3
Теплота вибуху, кДж/кг	1027	1368	1795	2595	1821	2222	1751	1274	2612	1674	1035
Температура вибуху, К	1295	1912	1970	3000	1230	2425	1580	1100	2738	2020	1857
Об'єм газів, л/кг	313	319	335	600	314	319	307	314	340	350	346
Фугасність, см ³	188	238	249	322	177	310	240	170	325	260	150
Факт. критичн. діаметр, мм	24	28	30	26	28	28	20	19	21	-	-
Факт. швидк. дет., м/с	1920	1930	1970	1970	1950	1980	2810	2630	2770	-	-

Таблиця 3.10. Кількість газів, що виділяються при підриванні вибухових сумішей

Найменування газу	Номери зразків та кількість газів, моль/кг										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
O ₂	7,58	7,53	7,40	6,10	9,25	7,30	9,23	9,60	6,52	8,05	10,41
H ₂	0,16	0,24	0,23	0,42	0,06	0,23	0,43	0,02	0,32	0,31	0,12
H ₂ O	0,52	0,91	0,87	1,37	0,32	0,88	0,90	0,09	1,08	1,54	0,83
CO	1,51	1,93	1,92	2,78	0,84	1,89	0,66	0,57	2,50	1,56	0,32
CO ₂	0,60	0,89	0,87	1,12	0,51	0,88	0,37	0,30	1,04	0,98	0,29
N ₂	0,10	0,10	0,50	0,97	1,22	0,46	0,78	0,30	0,65	0,71	1,00
NO	0,16	0,16	0,34	0,43	0,56	0,32	0,46	0,29	0,36	0,38	0,48
Cl	-	1,54	1,58	1,45	1,38	1,50	1,48	1,69	1,48	1,22	1,08
HCl	0,38	0,48	0,48	0,58	0,26	0,47	0,21	0,16	0,52	0,54	0,36
KCl	4,00	4,30	4,20	3,70	4,10	4,20	4,32	4,65	3,95	4,34	4,53
BaO	0,13	0,12	-	-	0,10	-	0,13	-	-	-	-
TiO ₂	0,46	-	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2.4. Вибухові характеристики низькошвидкісних сумішевих вибухових речовин на основі утилізованих вибухових речовин

При оцінці вибухових характеристик утилізованих вибухових речовин А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС та амотолу, та на основі аналізу їх термодинамічних розрахунків було розглянуто у параграфі 3.2.3, що ці ВР в чистому вигляді не можуть забезпечити вимоги до низькошвидкісних сумішевих ВР в подовжених зарядах, призначених для ущільнення ґрунтового масиву. У зв'язку з цим виконано обґрунтування та вибір рецептур низькошвидкісних сумішевих ВР на основі утилізованих ВР та окислювачів. У підрозділі 3.1.2 обґрунтовано вибір компонентів (табл. 3.5, 3.6) та підготовлений хімічний склад запропонованих сумішей для виконання термодинамічних розрахунків і проведено термодинамічні розрахунки, які наведено у таблиці 3.9.

З таблиці 3.9 видно, що всі зразки мають позитивний (додатній) кисневий баланс, що обумовлено достатньо високим вмістом перхлорату калію. З аналізу термодинамічних розрахунків можна зробити висновок, що для ощадливого підривання по швидкості детонації та енергетичним характеристикам може задовольнити рецептура на основі перхлорату калію з домішками каталізаторів розкладу та пального. Однак, дана суміш може мати велике значення критичного діаметру детонації і потребує потужного імпульсу для підриву [88].

Тому введення в склад вибухової суміші утилізованих вибухових матеріалів А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС та амотолу дозволить покращити її ініціювання (підривання) та знизити критичний діаметр до заданих вимог.

Аналіз характеристик сумішевих ВР з амотолом 80/20 (80% аміачної селітри та 20% тротилу) показав, що при введенні у вибухову суміш додатково аміачної селітри з позитивним кисневим балансом підвищується кисневий баланс суміші, який і так достатньо високий. Вміст тротилу в суміші (див. зразки 10 і 11 таблиці 3.9, 3.10) невисокий, тому амотол не має значного впливу на характеристики сумішевих ВР. Однак, при введенні в суміш 10% амотолу енергетичні характеристики сумішевих ВР різко

знижуються і можна прогнозувати, що для їх ініціювання знадобиться досить потужний імпульс, а критичний діаметр детонації при цьому буде дуже великий. Крім того, аміачна селітра дуже гігроскопічна, тому суміш на основі амотолу буде мати нестабільні характеристики при вибуховому розкладі. Таким чином, суміш на основі перхлорату калію і амотолу не дозволяє досягнути потрібних характеристик.

Проаналізуємо термодинамічні характеристики вибухової суміші на основі перхлорату калію та утилізованих матеріалів А-ІХ-1, А-ІХ-2 та МС.

Матеріал А-ІХ-1 представляє флегматизований гексоген (флегматизатор парафіно-церезинова суміш до 6%). А-ІХ-1 - потужна вибухова речовина і вона позитивно впливає на розкладання сумішевої ВР, поліпшить її запалення та дозволить одержати стабільне розкладання суміші, а також забезпечить їй потрібні характеристики для ощадливого підривання. Зразок 5 (таблиця 3.9) з 8% матеріалу А-ІХ-1 по швидкості детонації, об'єму газоподібних продуктів та енергетичним характеристикам відповідає цим вимогам.

Матеріал А-ІХ-2 на відміну від А-ІХ-1 вміщує 20% алюмінієвого порошку. Енергетичні характеристики матеріалу А-ІХ-2 значно вищі, ніж у А-ІХ-1. Оскільки, при розкладі алюмінію утворюються його окисли, які, як відомо [88], являються каталізаторами розкладу перхлорату калію, то слід чекати більш повного його розкладання. При розгляді характеристик зразка 7 (таблиця 3.9) видно, що по швидкості детонації, енергетичним характеристикам та об'єму газоподібних продуктів детонації він відповідає потрібним нам вимогам.

Морська суміш МС вміщує 57% гексогену, 20% тротилу, 17% алюмінієвого порошку та до 6% флегматизатору. МС має дещо нижчі енергетичні характеристики, ніж матеріал А-ІХ-2. Враховуючі те, що кисневий баланс гексогену – 21%, а тротилу – 74%, введення морської суміші в запропоновані вибухові склади приводить до росту швидкості детонації та калорійності. Крім того, дизельне паливо має кисневий баланс – 300%, що приводить до ще більшого зростання швидкості детонації. Виходячи з цього, МС можна використовувати для розробки сумішевої ВР без добавок

дизельного палива, однак при цьому можливе зниження енергетичних характеристик суміші, що приведе до збільшення критичного діаметру детонації ВР.

Згідно з термодинамічними розрахунками оптимальна рецептура низькошвидкісних сумішевих ВР на основі утилізованих вибухових матеріалів та окислювача перхлорату калію з добавками буде такою: утилізовані ВР - А-ІХ-1 або А-ІХ-2 – 8-10%; перхлорат калію – 83-88%; каталізатори розкладу перхлорату калію – до 6%.

Таким чином, термодинамічні розрахунки показали, що варіюванням вмісту активного компоненту (утилізованих ВР) таких, як А-ІХ-1, А-ІХ-2 та вводячи до складу окислювач, інертну добавку та інші технологічні добавки можна отримати сумішеві ВР, які можуть бути застосовані при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів.

Враховуючи те, що програми по визначенню термодинамічних параметрів вибухових сумішей основані на певних припущеннях, остаточний вміст складу можна визначити лише після практичного визначення вибухових характеристик – швидкості детонації, критичного діаметру, повноти детонації в експериментальних умовах.

На основі термодинамічних розрахунків вибрані склади низькошвидкісних сумішевих вибухових речовин. Основним компонентом сумішевої ВР є окислювач перхлорат калію. В якості горючого – гексогенмісткий матеріал А-ІХ-1 або А-ІХ-2, одержаний за конверсією. Оскільки перхлорат калію важко розкладається, для прискорення його розкладу використовують каталізатори - окисли практично всіх металів, а також азотнокислий барій. Додатково у вибухову суміш додається до 3 % дизельного палива або мінерального масла як пального, а також як добавки для поліпшення запалювання та органолептичних властивостей.

Підготовка компонентів для виготовлення сумішевих ВР має велике значення. В основному вона зводиться до сушіння, подрібнення, просіювання та усереднення (змішування).

Компоненти, що постачаються виробництву, вміщують різну кількість вологи. Волога відіграє велике значення в сумішевих ВР, оскільки вона впливає на злежуваність ВР, їх працездатність та чутливість до запалення.

Перхлорат калію має низьку гігроскопічність, однак його вологість потрібно підтримувати на рівні не більше 0,2 %, тому його обов'язково сушать при температурі 45°-50° С впродовж 4-5 годин. Азотнокислий барій сушать при температурі до 90° С (1,5 – 3 години).

Окиси металів сушать при температурі 100-120° С впродовж 1 години.

Вибухові характеристики одинарних та сумішевих ВР мають велику залежність від дисперсності. Наприклад, грамоніт 79/21 і амоніт 6ЖВ мають значення критичного діаметру детонації 80-90мм і 15-20мм відповідно, хоча мають однаковий склад (79 % тротилу та 21 % аміачної селітри), а відрізняються тільки дисперсністю компонентів. Для різних складів підбирають дисперсність компонентів у відповідності з залежністю їх характеристик від дисперсності [89]. Тому подрібнення та просіювання компонентів є важливим. Є велика кількість обладнання для подрібнення матеріалів – зубовалкові дробарки, молоткові, шарові млини і дисмембратори та ін. Використання того чи іншого обладнання для подрібнення залежить від характеристик матеріалів. Так, подрібнення вибухових матеріалів, наприклад, гексогенмістких, потребує м'яких зусиль (не ударних) тиску на ВР, тому їх подрібнення ведуть в дезінтеграторах і в водному середовищі.

У нашому випадку конверсійні вибухові гексогенмісткі матеріали подрібнювали на гідравлічних пресах типу П-50 з дистанційним управлінням. У відповідності з початковим розміром кусків подрібнюваних матеріалів на пресі встановлювали кінцевий вимикач, переміщенням якого регулювали обмеження величини ходу преса (переміщення нижньої плити). Вимикач обмежував хід плити ступінчасто – 45мм, 20мм, 10мм, 3мм. Зусилля руйнування конверсійних шашок А-ІХ-1, А-ІХ-2, МС склало 20-23 кг/см², тобто такі низькі величини тиску руйнування шашок (кусків) не є небезпечними, оскільки чутливість до тертя досліджуваних матеріалів на два порядки більша. Тим не менше процес подрібнення проводили дистанційно.

Просіювання проводили через сито № 025 з розміром вічка 250мм. При цьому одержували полідисперсний порошок з діаметром часток не більше 250 мкм.

При відпрацюванні вибухових сумішей перхлорат калію та азотнокислий барій подрібнювали в кульовому млині з фарфоровими кульками. Час подрібнювання встановлювали в залежності від початкової дисперсності матеріалу. При цьому матеріал підсушували до номінальної вологості. Потім вказані компоненти просіювали через сито № 025 (250 мкм).

Двоокис титану не подрібнювали, а тільки просіювали (протирали) через сито № 0125 (125 мкм).

Індивідуальні компоненти не потребували усереднення, оскільки після просіювання через сита вони мали потрібне і усереднене значення величин діаметру часток.

Одержання вибухової суміші проводили шляхом змішування компонентів у лабораторному змішувачі СРК-3 об'ємом 3л.

Змішувач СРК-3 споряджений лопатями Z - подібної форми, які обертаються в корпусі камери у протилежних напрямках з різною швидкістю, при цьому повідна лопать обертається швидше веденої. У результаті цього напрям дії сили на суміш, яка знаходиться між обома лопатями, постійно змінюється, сприяє інтенсивному перемішуванню до одержання однорідної маси.

Розглянувши низкошвидкісні рецептури ВР для ущільнення структурно-нестійких ґрунтів встановлено, що керування параметрами вибухового імпульсу шляхом використання ВР регульованої щільності забезпечує можливість рівномірного ущільнення просадних ґрунтів на необхідну потужність.

Розділ 4. ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1. Формування зовнішньої та внутрішньої структури гранул аміачної селітри при дії ультразвукового випромінювання

Мікроскопічні дослідження зовнішньої та внутрішньої структури сколу гранул (частинок) аміачної селітри, як обробленої ультразвуковим випромінюванням, так і без, виконано в Інституті надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля за допомогою мікроскопу типу Ломо Метап Р-1, оснащеного ССD відеокамерою «DigitalKOCOM», які дозволяють виводити дані дослідних зразків на дисплей комп'ютеру зі збільшенням у 176, 360 та 900 разів (рис. 4.1) [89].

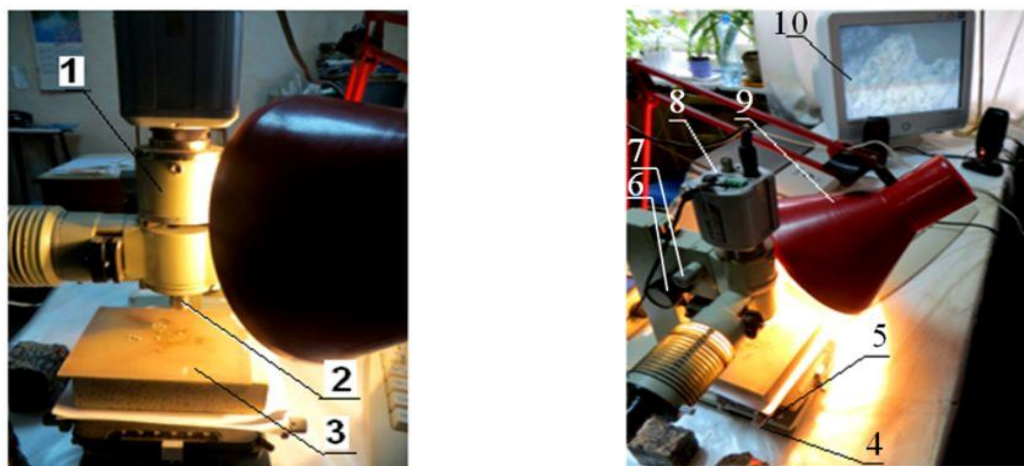


Рис. 4.1. Загальний вигляд мікроскопа Ломо Метап Р-1

Мікроскоп Ломо Метап Р-1 оснащений ССD відеокамерою DigitalKOCOM, підключений до комп'ютера і складається з: 1 – мікроскоп, 2 – об'єктив, 3 – площадка для розміщення дослідних зразків, 4 – гвинт для переміщення площадки по горизонтальній осі, 5 – гвинт для переміщення площадки по вертикальній осі, тобто для переміщення об'єктива навколо своєї осі, 6 – гвинт для грубого переміщення площадки мікроскопу по вертикальній осі, 7 – гвинт для тонкого переміщення площадки мікроскопу по вертикальній осі, 8 – камера, 9 – лампа, яка необхідна для освітлення дослідного зразка, 10 – дисплей комп'ютера.

Принцип роботи мікроскопу наступний: при обертанні гвинта 6 відбувається налаштування зображення у мікроскопі 1, тонке налаштування

зображення – за допомогою гвинта 7, ціна поділки якого становить 2 мкм, тобто при повному його оберті на 360° відбувається переміщення об'єктиву мікроскопу 2 на 100 мкм вверх або вниз, відносно площадки 3. За допомогою відеокамери 8, зі збільшенням освітленості завдяки лампі 9, відбувається відтворення зображення на дисплеї комп'ютера 10. Загальний вид відеокамери представлено на рисунку 4.2 [90].

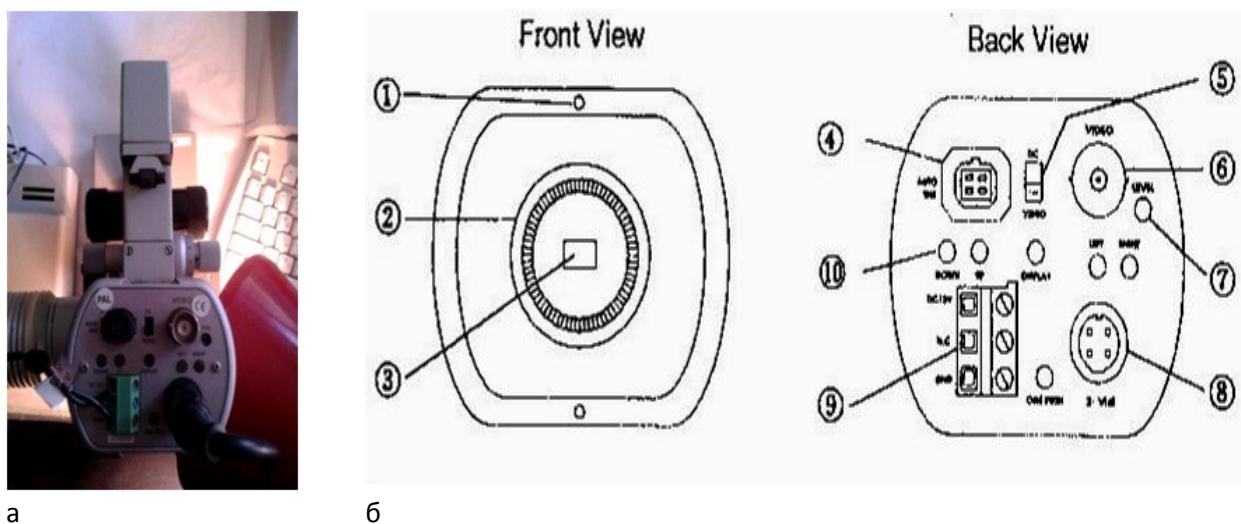


Рис. 4.2. Загальний вигляд CCD відеокамери DigitalKOCOM:

а – вид зверху; б – схема

CCD відеокамера DigitalKOCOM складається з: 1 – гвинт, що фіксує тримач для лінзи, фіксація C/CS кріплення тримача для лінзи і запобігання втрати фокуса; 2 – тримач для лінзи, може змінювати утримання C і CS кріплення разом з лінзою; 3 – блок зображення. Зображення ретранслюється до цього блоку через лінзи, при наявності CCD і оптичного фільтра можна завдяки цьому блоку уникнути забруднення та відбитків пальців, що може погіршувати якість зображення; 4 – роз'єм з автоматичною діафрагмою – підключення кабелю до автоматичної діафрагми; 5 – перемикач автоматичної діафрагми – дає можливість вибирати перемикач в залежності від типу лінз (вгору – робота з DC, вниз – робота з відео); 6 – відео-вихідний роз'єм – підключення кабелю до відеовиходу; 7 – рівень регулювання; 8 – роз'єм виходу – підключення до комп'ютера; 9 – вхід напруги – DC+12V, 300 mA.

Тіло гранул аміачної селітри (нітрат амонію) NH_4NO_3 являє собою полікристалічну структуру білого кольору, яка вміщує в собі 60 % кисню, 35 % азоту і 5 % гідрогену [91, 92].

Структура сколу гранул АС досліджувалась з глибиною проникнення 40 мкм (рис. 4.3) і 60 мкм (рис. 4.4) без обробки ультразвукового випромінювання (УЗВ). Крім того показано поверхню фрагменту уламків аміачної селітри (рис. 4.3 в і 4.4 б).

Зображення сколу гранули аміачної селітри після ультразвукової обробки наведено на рисунку 4.5, а на рисунку 4.6 гранули аміачної селітри змащені індустриальною оливою. Ультразвуком оброблялись як звичайні гранули аміачної селітри так і змащені дизельним паливом (рис. 4.7).

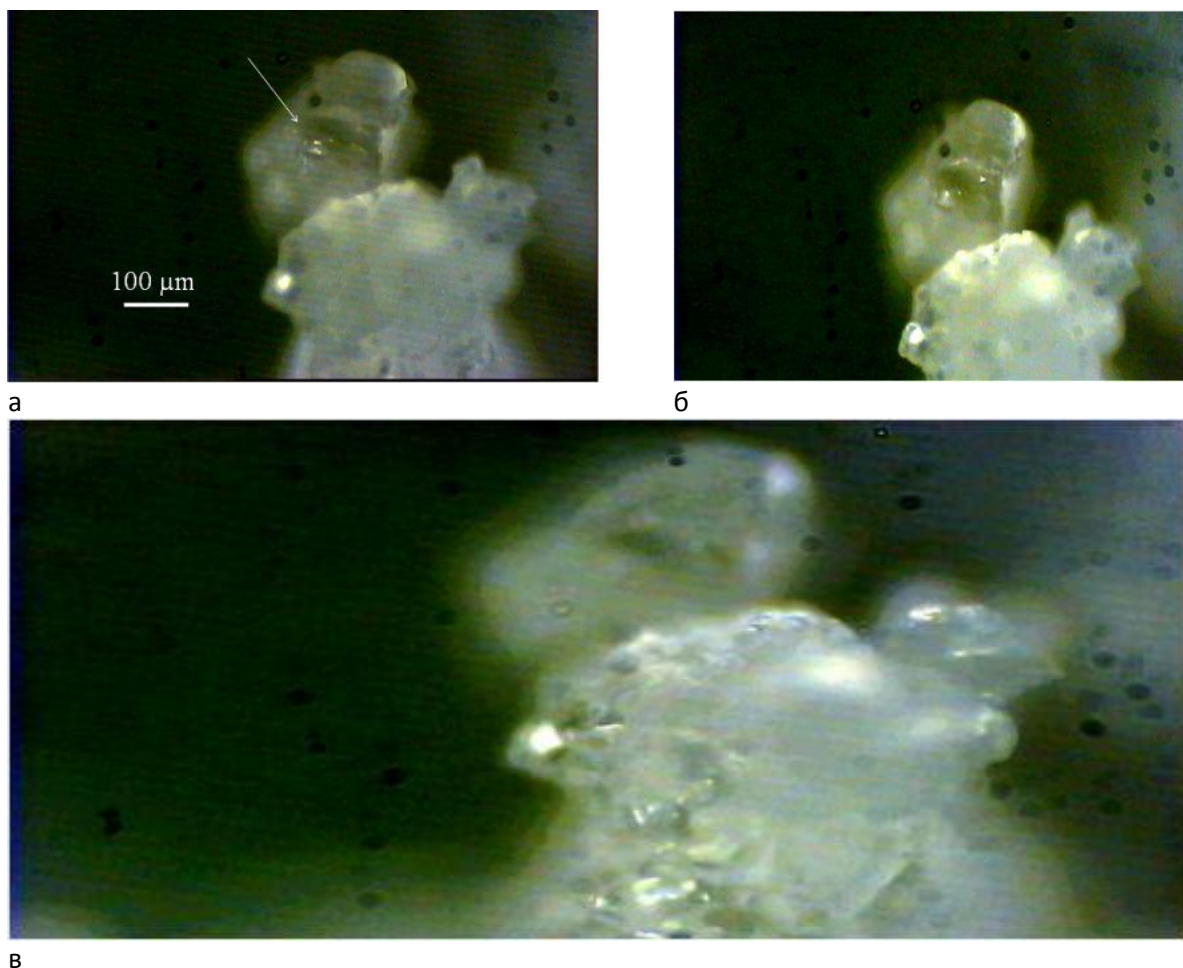


Рис. 4.3. Загальний вигляд поверхні пор гранульованої аміачної селітри глибиною 40 мкм: *а, б* – поверхня дна пори; *в* – поверхня зразка

За даними спостережень під мікроскопом можна зробити висновок, що наявні на поверхні сколу гранули аміачної селітри пори знаходяться в межах від 3 % до 8 %. Проте ця частина поверхні існуючих пор гранули залишається не реалізованою, оскільки вона знаходиться в закритому вигляді.

Дещо інша картина спостерігається на сколі гранули, яка оброблена ультразвуковим випромінюванням. По перше – вона має гладку і блискучу поверхню, це обумовлене тим, що за рахунок впливу ультразвукових хвиль (УЗХ) відбувається тертя між гранулами селітри, що в свою чергу сприяє відділенню слабо з'єднаних мікрочасток від гранули. По друге – екваторіальний скол гранули показує, що в ній наявний канал, тобто поверхня гранули має тріщинуватий характер, а це дозволить збільшити активну площу поверхні гранули за рахунок відкриття каналу до поверхні внутрішніх пор [89].

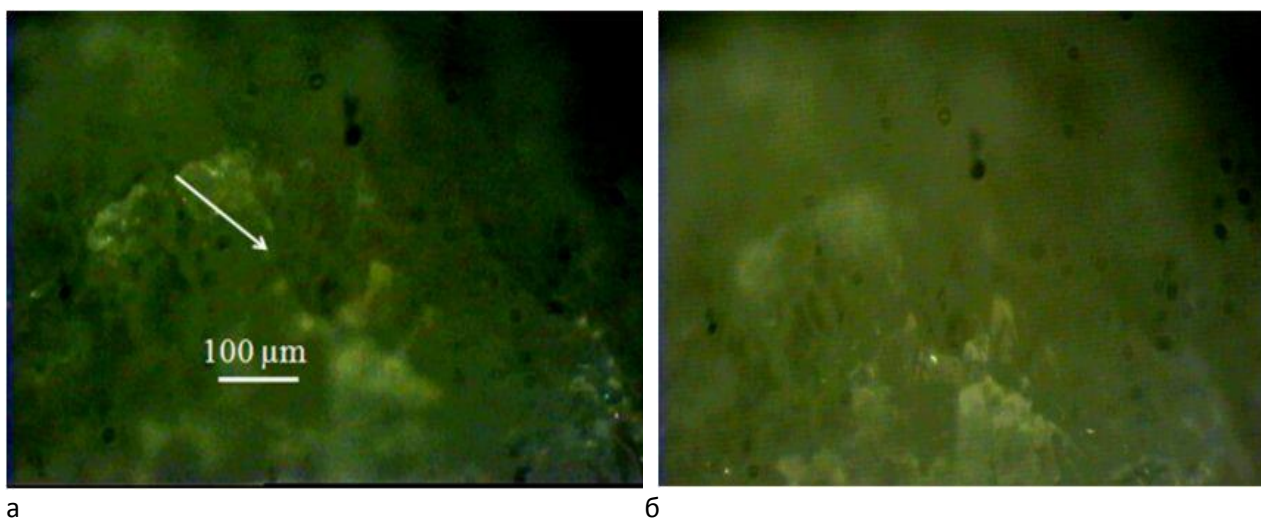


Рис. 4.4. Загальний вигляд поверхні пор гранульованої аміачної селітри глибиною 60 мкм: *а* – поверхня дна пори; *б* – поверхня зразка

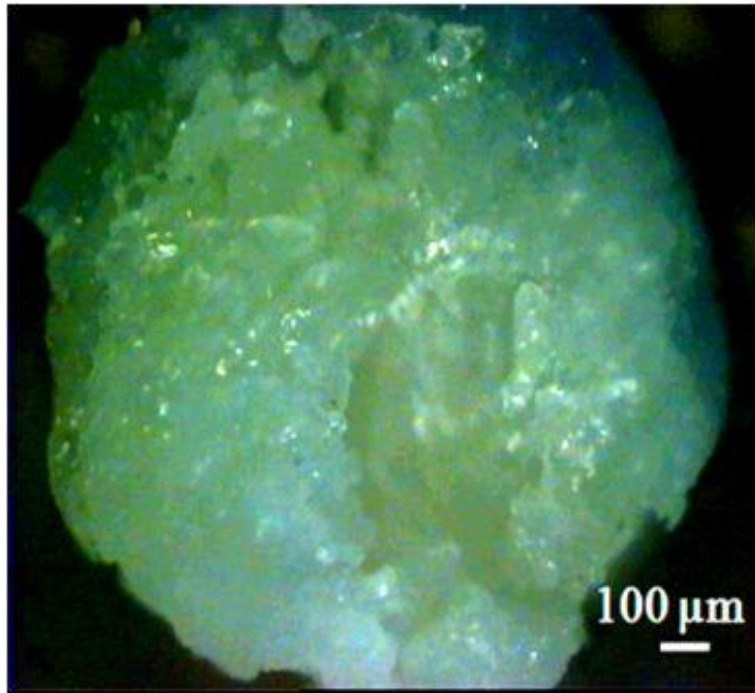


Рис. 4.5. Зображення сколу гранули аміачної селітри після ультразвукової обробки

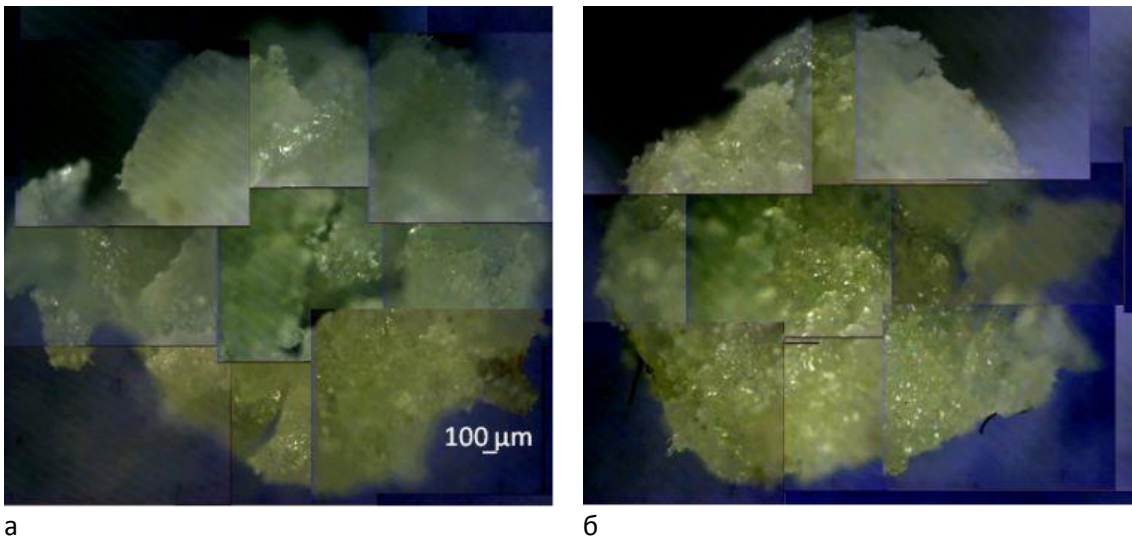
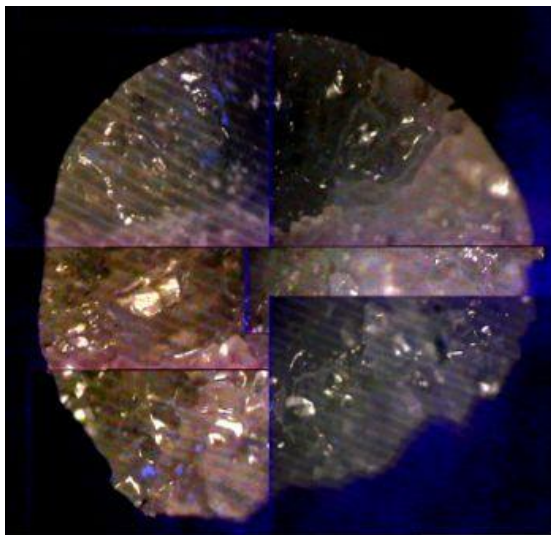
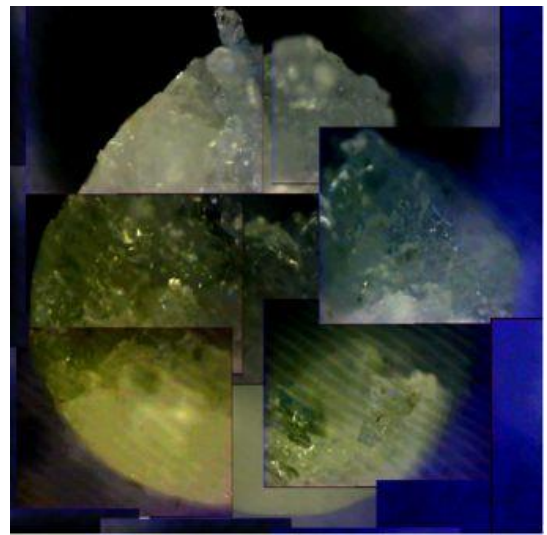


Рис. 4.6. Зображення сколу двох півсфер (а,б) гранули аміачної селітри після обробки індустріальною оливою



а



б

Рис. 4.7. Зображення сколу двох півсфер (а, б) гранул аміачної селітри з дизельним паливом після ультразвукової обробки

З рисунку 4.6 видно, що гранула має жовтуватий відтінок, а на рисунок 4.7 більш темного відтінку. Гранули аміачної селітри, які оброблені УЗ хвилями (рис. 4.5, 4.7) мають гладку поверхню, це обумовлене тим, що за рахунок тертя між ними відбувається відділення часток, які слабо з'єднані з гранулою.

Як видно з фотографій (рис. 4.5 – 4.7) поверхня гранул є щільною та блискучою. Екваторіальний скол гранули показує, що в ній наявний канал. Поверхня гранул має тріщинуватий характер.

4.2. Зміна пористості аміачної селітри в наслідок дії ультразвукового випромінювання

Оскільки активна поверхня площі гранул АС обробленої ультразвуковим випромінюванням залежить від відкритої і закритої пористості доцільно більш детально розглянути повну пористість АС.

При цьому можна виділити кілька категорій пористості [93]:

- повна (або загальна) пористість;
- відкрита пористість (або пористість насичення);
- закрыта (або ефективна) пористість.

Повна пористість аміачної селітри складається з відкритої пористості – це наявність пустот, укладених між зернами селітри, каверн і тріщин та закритої пористості – це замкнуті пори селітри. Коефіцієнт відкритої пористості можна визначити згідно з ГОСТ 33832. Кількісно пористість характеризується коефіцієнтом пористості, який являє собою відношення об'єму пор, тріщин, каверн і замкнутих пор до загального об'єму зразка селітри, і виражається в частках одиниці або відсотках.

В експерименті застосовувались наступні матеріали: олива індустріальна марки I-40А з наступними параметрами: кінематична в'язкість – 68 мм²/с при температурі 40 °С, щільність – 0,88 г/см³ при температурі 20 °С, масова частка сірки не більше 1 %, зольність не більше 0,1 %; щільна гранульована аміачна селітра фірми ПАТ «Рівнеазот» України і пориста аміачна селітра фірми «Акрон».

Крім того, для проведення лабораторних досліджень, використовували стандартне лабораторне обладнання, а саме; ваги неавтоматичної дії з похибкою вимірювань $\pm 0,01$ г; стакани об'ємом 600 см³ згідно ГОСТ 25336 [94], колба конічна об'ємом 150 см³ (допускається використання конічної колби об'ємом 250 см³); баня водяна термостатична, з термостатичною похибкою не більше 1°С, яка забезпечує робочі температури 25°С і 50°С; пластмасова воронка з циліндричними стінками на верхньому кінці з діаметром рівним 200 мм; сито розміром 0,5 мм згідно ГОСТ 3826 [95], яке сумісне з воронкою; фільтрувальний папір швидкої фільтрації з щільністю 150 г/м²; вбираюча тканина.

Підготовка зразків для випробування була наступною: спочатку відбирались проби АС масою (70 \pm 5) грам методом квартування і засипались в конічні колби з герметичною пробкою (рис. 4.8).

Ці колби нагрівались на водяній бані до температури + 50 °С та витримувались при даній температурі протягом 2 годин. Потім охолоджують ці колби, помістивши їх у водяну баню з температурою + 25 °С протягом 2 годин. При цьому спостерігали за рівнем води у водяній бані, який не повинен бути нижче рівня проби аміачної селітри (рисунок 4.9). Після чого ці проби зберігались при температурі (20 \pm 3) °С до проведення експерименту.



Рис. 4.8. Зразки гранульованої аміачної селітри



Рис. 4.9. Охолодження зразків аміачної селітри

Експеримент проводився для двох незалежних випробувань протягом короткого проміжку часу на двох пробах. Послідовність виконання експерименту була наступною: спочатку видалили частинки гранул АС розміром менше ніж 0,5 мм за допомогою сита. Пробу вагою (50 ± 1) грам помістили в скляну колбу. Потім в колбу наливали індустріальну оливу марки І-40А (рис. 4.10) доки воно повністю не покриє гранули АС, обережно перемішували таким чином, щоб поверхня всіх гранул була повністю змочена. У накритій склом колбі зразок АС витримувався протягом 1 години при температурі $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. Після чого через воронку з ситом фільтрували зразок АС протягом 1 години для повного стікання надлишкової оливи (рис. 4.11). В наступному етапі для остаточного видалення надлишку оливи зразок АС рівномірно за допомогою м'якої плоскої кісточки поміщали на аркуш фільтрувального паперу розміром 500x500 мм. з попередньо загнутими зі всіх боків кінців приблизно на 40 мм для запобігання скатування гранул АС, в середині якої розміщена всмоктуюча тканина.

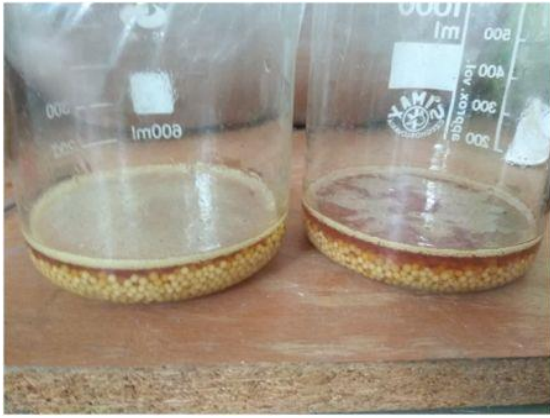


Рис. 4.10. Проби аміачної селітри, змішаної з індустріальною оливою



Рис. 4.11. Фільтрація оливи через сито

Через 2 хвилини гранули АС переміщали на фільтрувальний папір. Накривши зверху ще одним аркушем фільтрувального паперу катали гранули АС приклавши незначне зусилля за рахунок 8 кругових рухів. Потім, піднімаючи протилежні краї паперу переміщують зразок АС до центру. Після проведення трьох таких операцій дослідний зразок обережно переміщують на чистий аркуш фільтрувального паперу і повторюють вище описану операцію (рис. 4.12). Одразу після катання гранули поміщали в попередньо зважену чашу і зважували з точністю до $\pm 0,01$ гр.

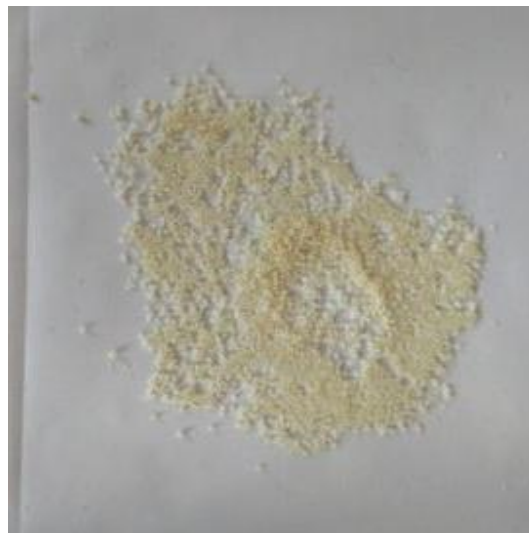


Рис. 4.12. Проба аміачної селітри після процедури катання на фільтраційному папері

Пористість аміачної селітри, обробленої ультразвуковим випромінюванням протягом 2, 4 та 6 хвилин з частотою $22 \pm 1,65$ кГц визначали аналогічним чином.

Відкрита пористість аміачної селітри (X , %) як обробленої ультразвуковим випромінюванням, так і без, визначається за формулою:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1}, \quad (4.1)$$

де m_2 – маса проби зразка після просіювання, яка дорівнює 50 г;
 m_1 – маса проби після оброки, г.

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень визначається за формулою:

$$X_{cp} = \frac{X_1 + X_2}{2}. \quad (4.2)$$

Закрита пористість аміачної селітри визначається за формулою:

$$m_{закр} = m_{повна} - X_{cp}, \quad (4.3)$$

Де $m_{повна}$ – повна пористість, %, X_{cp} – відкрита пористість, %.

Визначити повну (абсолютну) пористість селітри можна методом Мельчера (вимірювання повної пористості) [89]. Даний метод заснований на тому, що маса проекстрагованого і висушеного зразка є величина постійна як для гранульованої аміачної селітри, так і після її подрібнення.

Таким чином, повна пористість селітри може бути визначена, якщо відомі щільність зразка і щільність (скелету) частинок аміачної селітри.

Щільність гранульованої (щільної) селітри становить $\rho_{обр} = 0,88 \text{ г/см}^3$, щільність (скелету) частинок аміачної селітри $\rho_{тв} = 1,725 \text{ г/см}^3$; для пористої селітри відповідно – $\rho_{обр} = 0,75 \text{ г/см}^3$, $\rho_{тв} = 1,725 \text{ г/см}^3$.

Якщо виразити об'єм скелету (твердої частини) аміачної селітри через щільність, тоді повну пористість можна визначити за формулою:

$$m_{повна} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right) 100\% \quad (4.4)$$

де $V_{зразка}$ – об'єм пор зразка; $\rho_{зразка}$ і $\rho_{тв}$ – щільність зразка селітри і його твердої частини (скелету або зерен).

Підставивши у формулу (4.4) відповідні значення, отримаємо:

для гранульованої «щільної» АС:

$$m_{повна} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,88}{1,725}\right) 100 = 49\%$$

для гранульованої «пористої» АС:

$$m_{повна} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,75}{1,725}\right) 100 = 56,5\%$$

Отже, знаючи повну пористість, за формулами (4.1)– (4.3) проводимо розрахунки отриманих експериментальних даних для визначення відкритої та закритої пористості:

– для гранульованої «щільної» АС:

$$X_{1цїл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,15}{54,15} 100 = 7,66\%$$

$$X_{1цїл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,05}{54,05} 100 = 7,49\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X_{\text{ср.цїл}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,66 + 7,49}{2} = 7,575\%$$

Закрита пористість:

$$m_{\text{закр.цїл}} = m_{\text{повна}} - X_{\text{ср.цїл}} = 49 - 7,575 = 41,425\%$$

– для гранульованої «пористої» АС:

$$X_{1\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,93}{53,93} 100 = 7,29\%;$$

$$X_{1\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,76}{53,76} 100 = 6,99\%.$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X_{\text{ср.пор}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,29 + 6,99}{2} = 7,14\%$$

Закрита пористість:

$$m_{\text{закр.пор}} = m_{\text{повна}} - X_{\text{ср.пор}} = 56,5 - 7,14 = 49,36\%$$

Аналогічно проводимо розрахунки щільної та пористої аміачної селітри після ультразвукової обробки:

– з ультразвуковою обробкою протягом 2 хвилин:

$$m_{\text{повна(цїл.)}} = \frac{V_{\text{зразка}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{зразка}}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{тв}}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,887}{1,725}\right) 100 = 48,6\%$$

$$m_{\text{повна(пор.)}} = \frac{V_{\text{зразка}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{зразка}}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{тв}}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,763}{1,725}\right) 100 = 55,8\%$$

$$X_{\text{уз}}^{\text{цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,85}{53,85} 100 = 7,15\%$$

$$X_{\text{уз}}^{\text{цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,875}{53,875} 100 = 7,19\%$$

$$X_{\text{уз}}^{\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,05}{54,05} 100 = 7,49\%$$

$$X^{yz}_{2пор} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,02}{54,02} 100 = 7,44\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X^{yz}_{ср.цїл} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,15 + 7,19}{2} = 7,17\%$$

$$X^{yz}_{ср.пор} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,49 + 7,44}{2} = 7,47\%$$

Закрита пористість пористої АС після ультразвукової обробки:

$$m^{yz}_{закр.цїл} = m_{повна} - X^{yz}_{ср.цїл} = 48,6 - 7,17 = 41,43\%$$

$$m^{yz}_{закр.пор} = m_{повна} - X^{yz}_{ср.пор} = 55,8 - 7,47 = 48,33\%$$

– з ультразвуковою обробкою протягом 4 хвилин:

$$m_{повна(цїл.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,891}{1,725}\right) 100 = 48,3\%$$

$$m_{повна(пор.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,77}{1,725}\right) 100 = 55,4\%$$

$$X^{yz}_{2цїл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,15}{54,15} 100 = 7,66\%$$

$$X^{yz}_{2цїл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,18}{54,1} 100 = 7,58\%$$

$$X^{yz}_{2пор} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,2}{54,2} 100 = 7,75\%$$

$$X^{yz}_{2пор} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,17}{54,17} 100 = 7,7\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X^{yz}_{ср.цїл} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,66 + 7,58}{2} = 7,62\%$$

$$X^{y3}_{cp.nop} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,75 + 7,7}{2} = 7,73\%$$

Закрита пористість пористої АС після ультразвукової обробки:

$$m^{y3}_{закр.цїл} = m_{повна} - X^{y3}_{cp.цїл} = 48,3 - 7,62 = 40,68\%$$

$$m^{y3}_{закр.nop} = m_{повна} - X^{y3}_{cp.nop} = 55,4 - 7,73 = 47,67\%$$

– з ультразвуковою обробкою протягом 6 хвилин:

$$m_{повна(цїл.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right)100\% = \left(1 - \frac{0,891}{1,725}\right)100 = 48,3\%$$

$$m_{повна(nop.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right)100\% = \left(1 - \frac{0,77}{1,725}\right)100 = 55,4\%$$

$$X^{y3}_{2цїл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1}100\% = \frac{50 - 53,87}{53,87}100 = 7,18\%$$

$$X^{y3}_{2цїл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1}100\% = \frac{50 - 53,88}{53,88}100 = 7,2\%$$

$$X^{y3}_{2nop} = \frac{m_2 - m_1}{m_1}100\% = \frac{50 - 54,18}{54,18}100 = 7,72\%$$

$$X^{y3}_{2nop} = \frac{m_2 - m_1}{m_1}100\% = \frac{50 - 54,17}{54,17}100 = 7,7\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X^{y3}_{cp.цїл} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,18 + 7,2}{2} = 7,19\%$$

$$X^{y3}_{cp.nop} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,72 + 7,7}{2} = 7,71\%$$

Закрита пористість пористої АС після ультразвукової обробки:

$$m^{y3}_{закр.цїл} = m_{повна} - X^{y3}_{cp.цїл} = 48,3 - 7,19 = 41,11\%$$

$$m^{y3}_{закр.nop} = m_{повна} - X^{y3}_{cp.nop} = 55,4 - 7,71 = 47,69\%$$

Результати визначень відкритої, закритої та повної пористості різних типів аміачної селітри як до, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Вплив ультразвукового випромінювання на категорії пористості аміачної селітри

Селітра	Повна пористість, %	Відкрита пористість, %	Закрита пористість, %
Гранульована (щільна) АС	49	7,575	41,425
Пориста АС	56,5	7,14	49,36
Гранульована (щільна) АС після ультразвукової обробки			
2 хв.	48,6	7,17	41,43
4 хв.	48,3	7,62	40,68
6 хв.	48,3	7,19	41,11
Пориста АС після ультразвукової обробки			
2 хв.	55,8	7,47	48,33
4 хв.	55,4	7,73	47,67
6 хв.	55,4	7,71	47,69

Наведені дані свідчать про те, що вплив ультразвукового випромінювання на пористість аміачної селітри носить наступний характер: при впливі ультразвуку на АС протягом 2 хвилин зменшується пористість на 0,4 % для щільної АС і 0,7 % для пористої АС, тобто відбувається ущільнення АС. При цьому відкрита пористість для щільної АС зменшується на 0,4 %, для пористої АС збільшується на 0,3 %, закрита пористість для щільної АС залишається практично незмінною, для пористої АС зменшується на 1 %. Обробка АС ультразвуком протягом 4 хвилин зменшується пористість на 0,7 % для щільної АС і на 1,1 % для пористої АС. Відкрита пористість для щільної АС дещо збільшується, а закрита зменшується на 0,7 %. Для пористої АС відповідно: відкрита пористість збільшується на 0,6 %, а закрита зменшується на 1,7 %. Після 6 хвилинної обробки пористість для обох типів селітри залишається практично незмінною.

Аналіз експериментальних досліджень свідчить про те, що ультразвукове випромінювання аміачної селітри дозволяє суттєво збільшити її утримуючу здатність за рахунок збільшення активної площі поверхні, яке виникає за рахунок перерозподілу відкритої і закритої пористості як для щільної так і пористої АС, внаслідок утворення каналів до внутрішніх пор гранул. Водночас цей вплив носить нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Це підтверджується максимальним перерозподілом відкритої і закритої пористості. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

4.3. Вплив ультразвукового випромінювання на утримуючу здатність аміачної селітри

Для підтвердження отриманих результатів визначено **утримуючу здатність АС** за допомогою статичного методу, який оснований на дії сил тяжіння. Послідовність проведення дослідження наступна: спочатку пробу АС масою 100 г засипали в склянку ємністю 600 см³. ДП масою 20 г наливали в хімічний стакан і переносили в склянку з аміачною селітрою таким чином, щоб рідина рівномірно змочила всі гранули. Для цього аміачну селітру і дизельне паливо ретельно перемішували. Просочення гранул ДП тривала протягом 20 хв, після чого суміш розміщували на сито і не вбране в гранули дизельне паливо вільно стікало з сита протягом 1 доби.

Утримуюча здатність щільної та пористої аміачної селітри як у звичайному стані, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням протягом 2, 4 та 6 хвилин з частотою $22 \pm 1,65$ кГц досліджувалась за допомогою дизельного палива, яке відповідає сучасним стандартам якості та вимогам екологічного стандарту Євро 5.

Обробка аміачної селітри ультразвуком проводилась в Інституті надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля наступним чином. Від ультразвукового генератора УЗГ5-1,6/22 (рис. 4.13) до обмотки збудження

перетворювача підводиться дві напруги: постійна і змінна. Під дією постійної напруги через обмотки 8-ми пакетів протікає постійний струм поляризації. Перемінна напруга створює струм збудження. В двигуні, таким чином, утворюються поздовжні механічні коливання. Ці коливання передаються на діафрагму (на якій розміщена суміш аміачної селітри та дизельного палива (АС/ДП)) і далі на воду, яку заповнюють таким чином, щоби її рівень був на рівні суміші АС/ДП в склянці (рис. 4.14).



Рис. 4.13. Ультразвуковий генератор УЗГ5-1,6/22 [96]

Кавітація, яка утворює умови для переходу суміші у високодисперсний стан з утворенням однорідної і хімічно чистої суміші, вимагає певної інтенсивності. В процесі обробки, при виборі оптимального значення цієї інтенсивності ультразвуку варто мати на увазі, що при занадто малій інтенсивності кавітаційні процеси не розвиваються, а надмірне підвищення інтенсивності для даної частоти приводить до значного зростання розтягу максимального радіуса кавітаційної площини, що приводить до послаблення кавітаційних процесів.

Поріг кавітації залежить від фізико-хімічних властивостей рідини і, особливо, від частоти ультразвуку [96].

Акустична кавітація є ефективним засобом перетворення енергії звукової хвилі низької щільності в енергію високої щільності, пов'язану з пульсаціями і утворенням кавітаційних бульбашок. У фазі розрідження акустичної хвилі в рідині утворюється розрив у вигляді порожнини, яка заповнюється насиченою парою цієї рідини. У фазі стиснення під дією підвищеного тиску і сил поверхневого натягу порожнина зачиняється. Через

стіни порожнини в неї проникає розчинений у рідині газ, який потім піддається сильному адіабатичному стисненню.



Рис. 4.14. Розміщена проба АС/ДП на діафрагмі з заповненою водою

Так, для збудження кавітації у воді при 20 кГц потрібна інтенсивність звуку близько 1 Вт/см², при 200 кГц – 10 Вт/см², при 500 кГц – 200 Вт/см², а при 3 мГц – 50 кВт/см². Ультразвуковий вплив на суміш протікає з частотою 22±1,65 кГц при інтенсивності звуку в межах від часток Вт/см² до декількох Вт/см² (таблиці 4.2) [89, 96, 98 – 101].

Таблиця 4.2. Режим роботи УЗГ5-1,6/22

Назва	Величина
Напруга живлячої мережі, В	220/380
Число фаз	3 з нулем
Частота живлячої мережі, Гц	50
Максимальна потужність, споживана від мережі, кВА	4
Потужність вихідна номінальна, кВт	1,6
Робоча частота, кГц	22±1,65
Струм підмагнічування, А	10
Вага, кг	235

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом (ДП) визначаємо за формулою [89]:

$$m_{сер} = \frac{m_1 + m_2}{2}, \quad (4.5)$$

де m_1, m_2 – маса утриманого ДП двох зразків для АС.

Утримуюча здатність аміачної селітри визначається за формулою [89]:

$$X = \frac{m_{сер} - m}{m_{сер}} \quad (4.6)$$

де $m_{сер}$ – середня маса утриманого дизельного палива з аміачною селітрою, г; m – маса проби аміачної селітри, г.

Визначмо за формулами (4.5), (4.6) утримуючу здатність аміачної селітри як з обробкою ультразвуком, так і без.

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри без ультразвукової обробки, г:

$$m_{сер.щільна} = \frac{m_1 + m_2}{2} = \frac{102,9 + 102,96}{2} = 102,925$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри без ультразвукової обробки, %:

$$X_{щіль} = \frac{m_{сер.щільна} - m}{m_{сер.щільна}} \cdot 100 = \frac{102,925 - 100}{102,925} \cdot 100 = 2,84$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри без ультразвукової обробки, г:

$$m_{сер.пориста} = \frac{m_3 + m_4}{2} = \frac{104,6 + 104,64}{2} = 104,62$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри без ультразвукової обробки, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{104,62 - 100}{104,62} \cdot 100 = 4,416$$

Після обробки ультразвуком отримали:

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, г:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_5 + m_6}{2} = \frac{103,81 + 103,79}{2} = 103,8$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{ціл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{103,8 - 100}{103,8} \cdot 100 = 3,66$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, г:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_7 + m_8}{2} = \frac{105,5 + 105,47}{2} = 105,485$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{ціл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{105,485 - 100}{105,485} \cdot 100 = 5,2$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, г.:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_9 + m_{10}}{2} = \frac{104,72 + 104,71}{2} = 104,715$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{ціл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{104,715 - 100}{104,715} \cdot 100 = 4,5$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, г:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_{11} + m_{12}}{2} = \frac{105,74 + 105,71}{2} = 105,725$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{105,725 - 100}{105,725} \cdot 100 = 5,415$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, г.:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_{13} + m_{14}}{2} = \frac{106,89 + 106,89}{2} = 106,865$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{106,865 - 100}{106,865} \cdot 100 = 6,424$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, г:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_{15} + m_{16}}{2} = \frac{106,3 + 106,34}{2} = 106,32$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{106,32 - 100}{106,32} \cdot 100 = 5,944$$

Результати визначень утримуючої здатності аміачної селітри відносно дизельного палива без та з обробкою її ультразвуком протягом 1 доби наведено в таблиці 4.3.

Утримуюча здатність щільної та пористої аміачної селітри має досить низькі показники, що становлять: для щільної АС – 2,84 %, для пористої АС – 4,416 %. Після ультразвукової обробки значення утримуючої здатності становлять: для щільної АС після 2 хвилин обробки – 3,66 % (більше на 28,8 %, порівняно з початковою), після 4 хвилин – 5,2 % (тобто зростає на 83,1 %) та після 6 хвилин – 4,6 % (більше на 62 %); для пористої АС утримуюча здатність після обробки її протягом 2, 4, 6 хвилин становить відповідно: 5,415 %, 6,424 %, 5,944 % (утримуюча здатність збільшилася на 22,62 %, 45,5 %, 34,6 % відповідно), тобто, найбільший ефект досягається при обробці АС ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин коли

максимальна утримуюча здатність дизельного палива в пористій селітрі зростає з 4,416 % до 6,424 % або в 1,45 рази.

Таблиця 4.3. Утримуюча здатність аміачної селітри відносно дизельного палива

Селітра	Утримуюча здатність, %	Збільшення утримуючої здатності після УЗ обробки порівняно з початковою утримуючою здатністю, %
Щільна		
АС+ДП без УЗ	2,84	-
АС+ДП УЗ (2хв)	3,66	28,8
АС+ДП УЗ (4хв)	5,2	83,1
АС+ДП УЗ (6хв)	4,6	62
Пориста		
АС+ДП без УЗ	4,416	-
АС+ДП УЗ (2хв)	5,415	22,62
АС+ДП УЗ (4хв)	6,424	45,5
АС+ДП УЗ (6хв)	5,944	34,6

Аналіз експериментальних досліджень свідчить про те, що ультразвукове випромінювання аміачної селітри дозволяє суттєво збільшити її утримуючу здатність за рахунок збільшення активної площі поверхні, яке виникає за рахунок перерозподілу відкритої і закритої пористості як для щільної так і пористої АС, внаслідок утворення каналів до внутрішніх пор гранул. Водночас цей вплив носить нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Це підтверджується максимальним перерозподілом відкритої і закритої пористості. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

За результатами експериментальних досліджень було побудовано залежності утримуючої здатності АС від часу її обробки ультразвуком відносно дизельного палива (рис. 4.15).

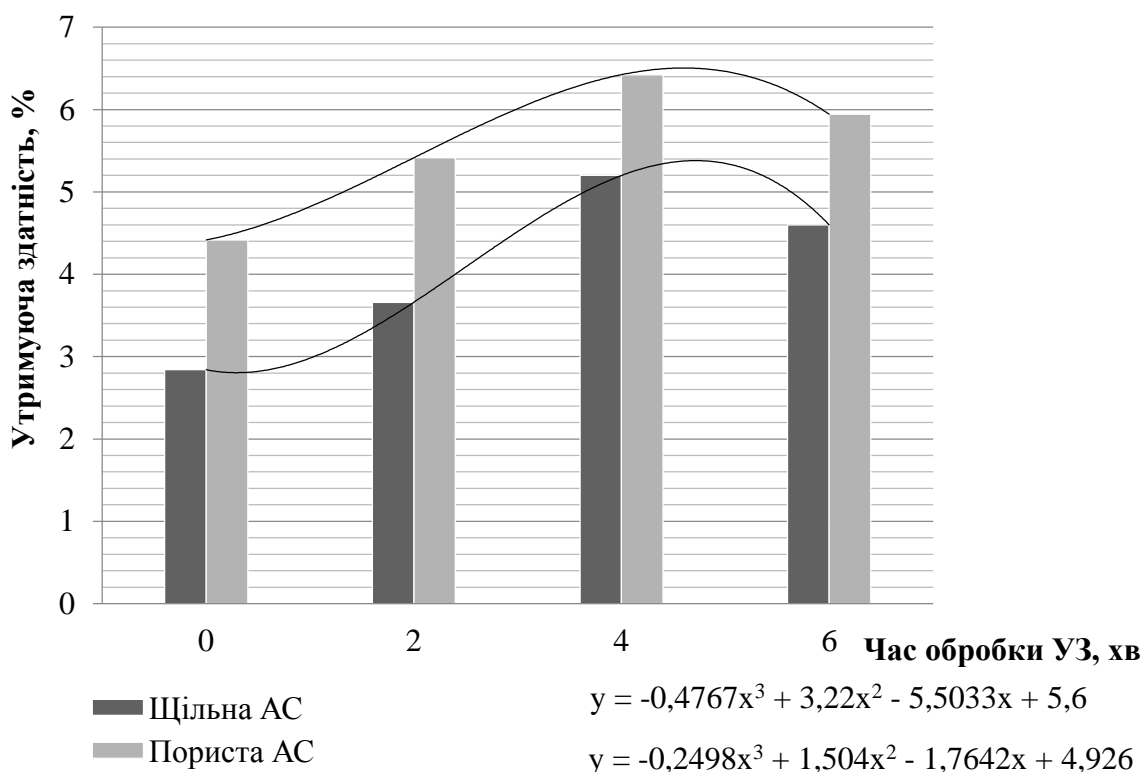


Рис. 4.15. Аналіз впливу ультразвукової обробки на утримуючу здатність щільної та пористої АС відносно ДП

Зниження утримуючої здатності АС при обробці її ультразвуком понад 4 хвилини можна пояснити тим, що при тривалій дії ультразвуку починають руйнуватись самі гранули, що призводить до збільшення щільності самої АС, а відповідно, зменшення її активної поверхні.

Отже, вплив ультразвукових хвиль на гранули аміачної селітри супроводжується наступними ефектами: інтенсифікуються процеси переносу ваги, підвищується температура оброблюваного матеріалу, відбувається перерозподіл тиску за об'ємом пресування, він стає більш рівномірним через зниження пристінного тертя, а за рахунок руйнування внутрішніх перегородок в гранулах збільшується активна площа поверхні АС.

4.4. Формування вибухових параметрів спінених водонаповнених композицій оброблених ультразвуковим випромінюванням

Ущільнення просадних нестійких ґрунтів є основним технологічним процесом, і вирішення цього питання та пошук оптимізованих рішень займають значущу роль в будівельній промисловості та воєнній справі.

У попередньому розділі запропоновано вдосконалені малоцільні сумішеві та спінені вибухові речовини для ущільнення просадних лесових ґрунтів. Важливим фактором є забезпечення фізичної стабільності ВР такого класу, особливо при ущільненні значної площі, а також забезпечити відповідну продуктивність і рівень безпеки робіт при виготовленні значних об'ємів готового продукту для великих зарядів.

Вдосконалення вибухової технології повинно бути направлено на забезпечення фізичної стабільності і динамічних характеристик спінених вибухових композиції для ефективного використання при ущільненні просадних лесових ґрунтів та розмінуванні мінних полів та створення безпеки проведення безпосередньо самих вибухових робіт [102].

Запропонований у добір компонентного складу спінених вибухових композицій місцевого приготування на основі порошкоподібних і рідких ПАР дозволяє керування параметрами вибухового імпульсу шляхом використання ВР регульованої щільності, що в свою чергу, забезпечує можливість їх використання для рівномірного ущільнення просадних лесових ґрунтів на необхідну потужність.

Основним недоліком запропонованих спінених ВР є низька фізична стабільність композиту, особливо у відкритому заряді, яка становить 9–24 год. в діапазоні температур від +30 до -10°C, а при зниженні температури до -15°C ця стабільність різко падає, що призводить до руйнування піни. При цьому структура системи руйнується, газові включення укрупнюються, що обумовлює зниження чутливості системи до підривного імпульсу. Це пов'язано з тим, що приготування композиту проводиться шляхом введення піноутворювача у гранульовану, а не подрібнену аміачну селітру, що призводить до зниження детонаційної

чутливості та зменшення утримуючої здатності виготовлених водонаповнених спіненних вибухових композицій.

Одним з основних параметрів, що характеризує фізичну стабільність водонаповнених спіненних вибухових композицій на основі аміачної селітри, поверхнево-активних речовин (ПАР) і води є утримуюча здатність аміачної селітри. У третьому розділі встановлено, що обробка аміачної селітри (АС) ультразвуком дозволяє суттєво збільшити її утримуючу здатність. Водночас ці результати мають нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

Вплив ультразвукового випромінювання на фізичну стабільність запропонованих спіненних пастоподібних ВР наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Вплив ультразвукового випромінювання на характеристики спіненних пастоподібних ВР (суміш)

№ п/п	Компоненти ВР	Вміст компонентів, мас. %				
		Суміш I	Суміш II	Суміш III	Суміш IV	Суміш V
1	Фізична стабільність в інтервалі температур від +30 до -10°C:					
	– у відкритій посудині, год.	9-10	10-12	14-17	20-24	15-18
	– у закритій посудині, діб	5-7	6-7	5-8	–	6-8
2	Фізична стабільність в інтервалі температур від +30 до -10°C після обробки АС ультразвуком (4 хв.):					
	– у відкритій посудині, год.	11-14	11-15	16-20	23-28	18-24
	– у закритій посудині, діб	6-8	7-9	6-10	–	7-11

Як видно з приведених даних, фізична стабільність аерованої системи в діапазоні температур від +30 до -10°C у відкритій посудині для спіненних композицій без обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить 9-24 год., а після ультразвукового випромінювання АС протягом 4 хвилин знаходиться в межах 11-28 год. Аналогічний приріст фізичної стабільності

спостерігається і в закритій посудині: без обробки АС ультразвуковим випромінюванням – 5-8 діб, а після обробки – 6-11 діб. Крім того, на фізичну стабільність спінених композицій суттєво впливає алюмінієва добавка, яка підвищує фізичну стабільність спінених композицій від 14-17 год. до 15-18 год. і від 5-8 діб до 6-8 діб відповідно для аерованих систем у відкритій і в закритій посудині без обробки АС ультразвуковим випромінюванням та від 16-20 год. до 18-24 год. і від 6-10 діб до 7-11 діб відповідно для аерованих систем у відкритій і в закритій посудині після обробки АС ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин.

Динамічні характеристики спінених сумішей досліджувалися як з обробкою АС ультразвуковим випромінюванням, так і без. При цьому вивчалася детонація відкритих зарядів діаметром $(50-90) \cdot 10^{-3}$ м. Бризантність зарядів вивчалася за ГОСТ 5984-80 [103]. У всіх випадках досліджувались свіжоприготовлені спінені суміші, так як піносистеми змінюють свої характеристики в часі.

Динамічні характеристики спінених ВР наведені в таблиці 4.5. З наведених даних видно, що швидкість детонації відкритих зарядів ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить $(1,0-2,5) \cdot 10^3$ м/с, а після обробки – $(1,2-2,6) \cdot 10^3$ м/с. Бризантність спінених сумішей знаходиться в межах – $(7-11) \cdot 10^{-3}$ м. як для ВР після обробки АС ультразвуковим випромінюванням, так і без.

Час наростання тиску в імпульсі до максимуму у досліджених сумішей близькі і складають відповідно $(40-60) \cdot 10^{-6}$ с для зарядів без обробки АС ультразвуковим випромінюванням і $(45-65) \cdot 10^{-6}$ с для зарядів після обробки АС ультразвуковим випромінюванням. Тиск на фронті хвилі у спінених ВР після обробки АС ультразвуковим випромінюванням на $(0,05-0,1) \cdot 10^9$ Па вище, ніж у спінених ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням. Швидкість наростання тиску в імпульсі у спінених ВР після обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить $(0,09 - 0,21) \cdot 10^{14}$ Па/с, у спінених ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням – $(0,08 - 0,20) \cdot 10^{14}$ Па/с.

Таблиця 4.5. Динамічні характеристики спінених ВР (суміш)

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР				
			Суміш I	Суміш II	Суміш III	Суміш IV	Суміш V
Без обробки АС ультразвуковим випромінюванням							
1	Швидкість детонації: - відкритий заряд	10 ³ м/с	1,0-2,4	1,0-2,5	–	–	1,0-2,2
	- заряд в жорсткій оболонці		1,1-3,2	1,1-3,0	1,9-2,1	2,0-2,2	2,1-2,3
2	Бризантність в сталюму кільці	10 ⁻³ м	7-11	7-11	7-9	7-8	8-11
3	Час зростання тиску в імпульсі	10 ⁻⁶ с	40-50	45-50	50-55	50-60	55-60
4	Тиск на фронті хвилі	10 ⁹ Па	0,7-0,8	0,7-0,8	0,6-0,7	0,5-0,7	0,6-0,8
5	Швидкість зростання тиску	10 ¹⁴ Па/с	0,14-0,20	0,14-0,17	0,11-0,14	0,08-0,14	0,12-0,16
Після ультразвукового випромінювання АС протягом 4 хвилин							
1	Швидкість детонації: - відкритий заряд	10 ³ м/с	1,2-2,4	1,3-2,6	–	–	1,2-2,3
	- заряд в жорсткій оболонці		1,3-3,3	1,2-3,1	1,9-2,2	2,0-2,3	2,2-2,4
2	Бризантність в сталюму кільці	10 ⁻³ м	7-11	7-11	7-9	7-8	8-11
3	Час зростання тиску в імпульсі	10 ⁻⁶ с	45-50	45-55	50-55	55-65	55-65
4	Тиск на фронті хвилі	10 ⁹ Па	0,75-0,85	0,75-0,9	0,65-0,75	0,65-0,7	0,75-0,8
5	Швидкість зростання тиску	10 ¹⁴ Па/с	0,16-0,21	0,15-0,17	0,12-0,15	0,09-0,15	0,13-0,17

Аналіз наведених даних свідчить про те, що попередня обробка АС ультразвуковим випромінюванням значно покращує динамічні характеристики запропонованих спінених ВР. За рахунок попередньої обробки АС ультразвуковим випромінюванням та добавкою 3 – 4 % дисперсного алюмінію можна досягти значної фізичної стабільності та покращити динамічні характеристики запропонованих спінених вибухових композицій.

Дослідження динамічних характеристик спінених ВР змінної щільності показує, що описані вибухові суміші можуть ефективно використовуватися при ущільненні просадних ґрунтів та розмінуванні мінних полів.

Розділ 5. АНАЛІТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ВИБУХОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ

5.1. Аналітичне оцінення можливостей керування параметрами вибухового імпульсу для регулювання впливу на ґрунтовий масив

Основні способи керування параметрами вибухового імпульсу полягають в управлінні контактним впливом зарядів ВР на навколишній масив, порядком підривання зарядів.

Характер такого впливу визначається:

- а) властивостями матеріалів ВР, хімічним складом, концентрацією;
- б) щільністю, дисперсністю і геометричними параметрами заряду;
- в) характером ініціювання;
- г) іншими конструктивними особливостями заряду;
- д) механічними властивостями масиву в приконтактній зоні;
- е) порядком підривання.

Різноманітність практичного застосування вибухових речовин, вибухових конструкцій і властивостей збурених вибухом масивів об'єктивно створюють передумови для найбільш раціонального використання енергії вибуху для різних цілей при будівництві та гірничому виробництві в цілому в тих чи інших умовах.

Однією з невирішених проблем є стабілізація детонації в не патронованих зарядах значної протяжності. Існує ряд причин нестаціонарного вибухового збурення і затухання детонаційного процесу, серед яких найбільш значними є:

- а) нерівномірність компонентів ВР і властивості гетерогенних (багатофазних середовищ);
- б) розвантажувальна дія межі заряду;
- в) не водостійкість (розмочування), обумовлена гідрофобними основним компонентом, селітри;
- д) змінення параметрів вибухового перетворення на контакті різних ВР.

Існують і інші проблеми пов'язані з дією вибуху в зовнішньому середовищі. Якщо відбувається повне вибухове розкладання заряду, то необхідна амплітуда вибухового імпульсу, яка випромінюється в оточуюче середовище, знаходиться на відстані до 10 радіусів заряду і більше. У той же час різкий характер імпульсу призводить до надзвичайно швидкої дисипації енергії хвилі, при цьому вплив заряду у просторі відбувається досить нерівномірно. Це характерно для більшості промислових ВР зі швидкістю стаціонарної детонації понад 3,5 – 4 км/с.

Тому традиційною проблемою є зміна параметрів імпульсу, що дозволить максимально знизити непотрібні втрати енергії в бризантній зоні і збільшити радіус розповсюдження дією одного заряду.

Не менш важливою є проблема оптимального розташування свердловин по масиву, що дозволяє підібрати параметри сповільнення, які забезпечать необхідний режим підривання для досягнення максимального ефекту використання енергії вибуху.

Крім того, важливим фактором в умовах реальних ґрунтових масивів є неоднорідність їхньої геологічної структури та фізико-механічних характеристик. Особливо ця неоднорідність проявляється у верхніх шарах ґрунтових наносів, де нерідко спостерігається вихідна шарувата структура масиву, пов'язана з його геологічним походженням. Однак, якщо об'єктом інженерної діяльності є лесовий просадний масив, склад його більш однорідний по глибині з рівномірним зростанням щільності або зменшенням поруватості в природному заляганні. Ситуація змінюється в зв'язку з застосуванням будь-якої технології ущільнення такого масиву. Вона передбачає попереднє його замочування для руйнування достатньо міцних природних в'язків між блоками і агрегатами, складеними з грантових часток і пов'язаними між собою соляними плівками, здатними розчинятися під дією надмірної вологи. Оскільки ця волога є практично нестисливою, вона під дією напружень на силовому фронті та поза ним вимушена переміщуватись відносно ґрунтового скелету. Швидкість переміщення ґрунтових часток і вологи прямо пропорційно пов'язані з швидкістю спочатку ударної, а потім вибухової хвилі. В свою чергу швидкість ударної хвилі прямо пов'язана з

швидкістю детонаційного фронту в заряді, тобто з енергією вибухової речовини в заряді. Таким чином, відома інерційність середовища в динамічному процесі розвитку деформацій підсилюється через взаємне переміщення компонентів, що складають ґрунт, оскільки посилюється вплив в'язкої складової на процес розвитку об'ємних деформацій.

З динаміки ґрунтів відомо [42], що інерційне багатоконпонентне ґрунтове середовище з відносно слабкими структурними зв'язками для повноцінного розвитку деформаційного процесу в динамічному режимі потребує більш повільного зростання і спадання навантаження в процесі проходження хвилі напружень. Це ставить відповідні вимоги до параметрів вибухового імпульсу, який забезпечує достатнє навантаження, що довше утримується в часі. Проблема може вирішитись лише застосуванням ВР з максимально низькою швидкістю детонації.

Рішення даного питання може бути здійснене наступними шляхами, що розглядаються в дисертаційній роботі:

1. Вдосконалення хімічного складу ВР. Оскільки на даний час практично всі основні компоненти низько бризантних ВР відомі, вдосконалення компонентного складу в залежності від конкретних цілей проводиться шляхом введення гідрофобних, каталітичних, інертних, квазіінертних (низькокалорійних) та інших добавок.

2. Обробка структури ВР або основного компоненту (селітри) з метою підвищення хімічної активності, яка ускладнена в грубо дисперсних ВР малою площею хімічного контакту. Мета – підвищення площі поверхні і часткова іонізація. Досягти можна за рахунок механічної (в тому числі ультразвукової) обробки, шляхом опромінення електромагнітними хвилями і зарядженими частинками.

На сучасному етапі розвитку засобів механізації зарядних робіт практичний інтерес представляє два способи покращення характеристик імпульсу, а саме: із застосуванням тонких зовнішніх оболонок з інертного матеріалу; з використанням в довгих свердловинах проміжних бойовиків, які добре сприймають імпульс від основного слабшого ВР.

У рішенні інших проблем визначальним фактором є механічні властивості навколишнього масиву: імпеданс, міцність на стиск, дилатансія, умови крихкості, анізотропності, неоднорідності.

Для того, щоб керувати процесом вибухового імпульсу необхідно встановити наступні взаємозв'язки: параметрів заряджання, властивостей ґрунтового масиву в приконтатній зоні і вихідних параметрів вибухового імпульсу, що діють на середовище; механічних властивостей масиву і параметрів хвилі у зовнішньому середовищі; параметрів зовнішнього навантаження на ґрунтовий масив.

На основі чисельних експериментів і теоретичних досліджень, проведених в останні десятиліття, встановлено, що в ряді типових умов підривання зарядів ВР режим протікання реакції вибухового перетворення близький до стаціонарного, тобто швидкість поширення ударної хвилі близька до постійної.

Найпростішим квазістаціонарним режимом підривання циліндричного заряду є підривання з осьовим ініціюванням, що породжує циліндричну хвилю.

При цьому, до моменту виходу ударної хвилі на поверхню заряду, за виконання умови, коли продукти детонації (ПД) задовольняють рівнянню стану ідеального газу, поширення параметрів ПД за фронтом детонаційної хвилі (ДХ) описується системою звичайних диференціальних рівнянь

відносно автотомельної змінної $\xi = \frac{h}{t}$, $\xi = \frac{h}{t}$.

$$\begin{cases} \frac{du}{d\xi} \left[\frac{(\xi - u)^2}{C^2} - 1 \right] = \frac{u}{\xi} \\ (\xi - u) \frac{du}{d\xi} = \frac{C^2}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{\xi} \end{cases} \quad (5.1)$$

де h – радіальна координата Лагранжа, t – час, u – масова радіальна швидкість руху, C – швидкість звуку, ρ – щільність ПД.

В [102] наводиться наближене рішення системи рівнянь (5.1) відносно масової радіальної швидкості руху u . Найбільший практичний інтерес

представляє воно в момент досягнення ударною хвилею (УХ) межі ВР «продукти детонації – середовище»:

$$u_R(h) = D \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{h}{R} \right)^\alpha \right]^\beta \right\} \quad (5.2)$$

де D – швидкість розповсюдження детонації; R – радіус заряду; $\alpha = 1,05$; $\beta = 0,67$ (2/3).

Знаючи величину $u(h)$ в будь-який попередній момент часу, (а для цього замість R в (5.2) підставляється довільне менше значення радіусу ударної хвилі), визначаємо поле переміщень $S(h)$ і поле щільності $\rho_R(h)$. Потім, використовуючи взаємозв'язок координат Лагранжа і Ейлера ($r = h + S(h)$), де r - координата Ейлера, перераховуємо розподіл масових швидкостей і щільності в координатах Ейлера. Результати наведені в таблиці 5.1.

Дані таблиці 5.1 дозволяють оцінити питому кількість руху, що виникає при вибуху в середовищі [104]:

$$\begin{aligned} \frac{\int_0^R \rho_0 u h d h}{R} &= \rho_0 u(R) R \int_0^1 \frac{u}{u(R)} \cdot \frac{h}{R} \cdot \alpha \left(\frac{h}{R} \right) = 0,263 \rho_0 u(R) R \\ &= 0,197 \rho_0 D R \end{aligned} \quad (5.3)$$

Реальний розподіл вище наведених параметрів детонаційної хвилі відрізняються тим, що:

- ударний фронт є косим, оскільки хвиля детонації поширюється не тільки в радіальному, але і в поздовжньому напрямку;
- швидкість детонації не є постійною, принаймні по радіусу, оскільки зовнішня плазма реакції вибухового розкладання чуттєво реагує на зниження дії краю [105];
- наявність неоднорідності призводить до спотворення стаціонарного поширення реакції, зокрема, до поздовжніх пульсацій, що не пов'язані з характером ініціюючого імпульсу [106].

Таблиця 5.1. Розподіл масових швидкостей і щільності в умовах стаціонарної детонації при осьовому ініціюванні

h/R	r/R	ρ/ρ_0	$U/U(R)$
0,05	0,1510	0,137	0,50289
0,10	0,2605	0,191	0,0604
0,15	0,3523	0,247	0,0932
0,20	0,4330	0,304	0,1272
0,25	0,5051	0,362	0,1624
0,30	0,5700	0,427	0,1986
0,35	0,6288	0,497	0,2360
0,40	0,8622	0,577	0,2747
0,45	0,7306	0,668	0,3146
0,50	0,7746	0,772	0,3560
0,55	0,8143	0,898	0,3989
0,60	0,8500	1,046	0,4437
0,65	0,8819	1,228	0,4905
0,70	0,9101	1,457	0,5398
0,75	0,9347	1,756	0,5921
0,80	0,9558	2,168	0,6481
0,85	0,9732	2,817	0,7093
0,90	0,9867	3,932	0,7780
0,95	0,9961	7,171	0,8600
0,97	0,9979	9,258	0,9004
0,99	0,9997	20,674	0,9521

Оскільки практичний досвід даних досліджень зроблено на основі багатокомпонентних грубо дисперсних ВР, що уявляють собою гетерогенне середовище, викладемо сучасне уявлення про нестаціонарне вибухове перетворення в цих, порівняно слабких вибухових композиціях, ґрунтуючись на [107].

Якщо адіабатичне охолодження в хвилі розрідження перевищує самий розігрів ВР за рахунок протікання реакції, остання припиняється, що описується умовою [108]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{TV}}{Cv} \cdot \frac{dk}{dt} + \left(\frac{dT}{dv}\right)_{s,k} \frac{dv}{dt} < 0 \quad (5.4)$$

де Q_{TV} – тепловий ефект реакції при постійній температурі T та об’ємі v ; k – частка прореагованої речовини, Cv – теплоємність при постійному об’ємі.

Відомо [109], що нормальна детонація завжди виникає з перетиснутого режиму. Якщо при переході перетиснутої детонаційної хвилі в нормальний режим хімічна реакція на фронті ударної хвилі затухає, то хвиля в нормальному режимі носить нестійкий фронт. Затухання хімічної реакції означає зменшення хімічного піку ПД. Вона діє як поршень, рухаючи в початкове положення ВР ударну хвилю, що призводить до виникнення на її поверхні шару ударної стиснутої ВР (УВР). Швидкість затухання в ударній хвилі менше, ніж на хімічному піці, тому саме затухання може долатися за рахунок реакції в УВР у вигляді адіабатичного теплового вибуху (АТВ) і хімічна реакція може виникнути знову.

Таким чином, хімічна реакція на фронті детонаційної хвилі низькошвидкісних ВР може піддаватися подальшій реанімації. У ВР з досить нестійким фронтом реакція при всіх тисках ударного стиснення знизу (аж до детонаційних) розвивається за законами «повільної» кінетики. Тому утворення АТВ на межі розподілу ПД – УВР призводить до практично миттєвого виникнення детонації УВР, яка рухається навздогін в напрямку фронту ударної хвилі. При цьому тиск детонації УВР значно перевищує тиск на хімічному піці, тобто УВР детонує в значно перетиснутому режимі. При виході з цього режиму реакція знову починає затухати, виникає новий шар УВР і т. д.

За рахунок неоднорідності компонентного складу, флуктуації температури і інших причин АТВ в УВР виникає не одночасно по всій поверхні межі розподілу ПД – УВР, а хаотично. Півсфери, що утворюються внаслідок АТВ наздоганяють фронт ударної хвилі, утворюючи при цьому в початковій ВР сильно перетиснуті детонаційні хвилі.

Слід зазначити, що незважаючи на можливу відсутність вибухового тепловиділення в ударному стрибку виникає значно невірноважений стан речовини. Відсутність на даний час відомостей про ударно-хвильову кінетику не дозволяє дати обґрунтовану кількісну оцінку описуваних явищ, тому на даний час найбільш надійна джерелом отримання кількісних результатів - експеримент і його феноменологічна інтерпретація.

Зважаючи на складність процесу вибухового перетворення параметри початкового імпульсу, що діє у зовнішньому середовищі, відчують також певні коливання, навіть у випадку, коли має місце стабільність усереднених в часі характеристик зазначеного перетворення.

Однак в цьому, найбільш цікавому з практичної точки зору випадку, при дії вибуху у зовнішньому пасивному середовищі доцільно ввести усереднені параметри: середня амплітуда тиску, середній час зростання, середній час спадання і т.д. З метою розпізнавання такого роду параметрів від справжніх будемо позначати їх з нижній індексом «m» (від слова medial - середній).

Через неможливість забезпечення при заряджанні між ВР і зовнішнім середовищем щільного контакту, тобто на межі ВР – середовище завжди присутні повітряні проміжки, по яким попереду фронту ударної хвилі поширюється зовнішня плазма і, таким чином, зростання реального зовнішнього тиску вже на контакті здійснюється не стрибком, а за час, що вимірюється в мікросекундах.

На рис. 5.1 схематично показано поверхню ударного фронту (пунктиром) і поверхню контакту (суцільна лінія). Якщо в момент часу t_0 край фронту досягне точки В, то в момент часу $t_1 = t_0 + \Delta t$ в точці А почне зростати тиск, де Δt - час передачі сигналу про вибухову хвилю зовнішньою плазмою. Цей сигнал є деякою інтегральною функцією імпульсу ВР в деякій точці В і досягає максимуму не обов'язково в момент приходу ударної хвилі.

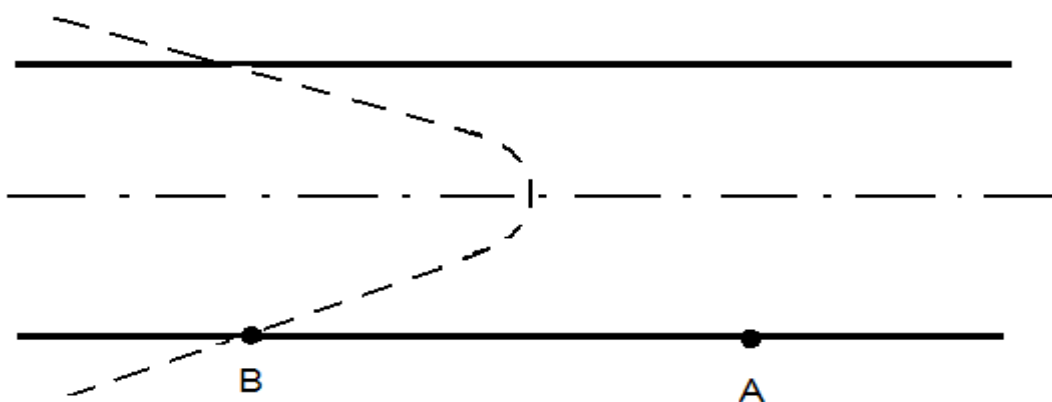


Рис. 5.1. Схема розповсюдження ударного фронту

Якщо припустити, що передача сигналу про імпульс в точці В в точку А здійснюється після початку з деякою, приблизно постійною швидкістю, яка дещо перевищує швидкість поширення ударної хвилі, то можна оцінити тривалість зростання переднього фронту хвилі. З цією метою виділимо в заряді ВР переріз, на якому щільність суміші ПД – ВР відповідає вихідній.

Для випадку стаціонарної радіальної детонації такий переріз віддалений від осі заряду на відстань, що становить $0,6 R$. У момент, коли вказаний переріз досягне точки В, а хвиля розрідження досягне контактної поверхні, подальше «підживлення» імпульсу в точці А припиниться. Позначимо цей момент часу t_1 . Отже, в точці А імпульс досягне максимуму в момент часу, що становить

$$t_z = t_1 + \Delta t.$$

Для випадку радикального ініціювання

$$t_3 - t_1 = t_2 - t_1 = \frac{0,4R}{U_m} \approx 0,533 \frac{R}{D} \quad (5.5)$$

Насправді вказана радіальна компонента масової швидкості в силу того, що ударний фронт є косим, менше ніж $0,75 D$, а товщина ущільненого шару ВР в рамках його початкового об'єму з тієї ж причини дещо менша.

Слід зазначити, що величина Δt також не постійна. Але, для грубої оцінки часу зростання імпульсу на контакті ВР (ПД) – зовнішнє середовище формула (5.5) може бути використана.

Що ж стосується оцінки амплітуди тиску P_m і тривалості спаду імпульсу $t_{y,m}$, то для їх оцінки скористаємося [110], де враховуються як характеристики ВР, так і зовнішнього середовища.

Інтенсивна вибухова хвиля, яка генерується за допомогою вибуху, поширюється в масиві і супроводжується руйнуванням породи і метанням окремоностей. На жаль, на даний час в літературі з цих питань відсутня достатня інформація, яка б в достатній мірі, як відображала уявлення протікання даних явищ, так і надала можливість до простих інженерних рішень.

Найбільш розповсюджене припущення - ігнорується в'язкість механізму руйнування і, як наслідок, до уваги береться тривалість впливу

позитивної та негативної фаз вибухової хвилі. Наведена нижче схематизація дозволяє повністю усунути зазначені якісні недоліки, а також врахувати зміну тривалості хвилі на різних відстанях [111]:

1. Всякому акту руйнування передуює проходження хвилі, епіюра нормальних напружень в якій, досить точно відображається функцією типового сигналу:

$$\sigma_{n,m}(t) = A \cdot e^{-\lambda t} \sin \mu(t - t^*) \quad (5.6)$$

де t^* – момент приходу хвилі у відповідний елемент, A – амплітуда за відсутності в'язких властивостей ($\lambda=0$), λ – декремент затухання, обумовлений релаксацією напружень, μ – основний частотний параметр;

2. До моменту руйнування середовище є практично пружним (з незначною в'язкістю). Тому можливість бічного розпору характеризується значеннями коефіцієнта Пуассона ν , а бічне напруження визначається співвідношенням:

$$\sigma_B = \sigma_n \cdot \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (5.7)$$

3. Впливом відколу на процес подальшого поширення хвилі (до входу її на вільну поверхню) нехтуємо. Це цілком припустимо, з огляду на те, що природна тріщинуватість корелюється з в'язкими властивостями і «хвіст» імпульсу не робить помітного впливу на передню частину в більш далеких зонах розповсюдження хвилі.

4. Довговічність (час до настання етапу руйнування) визначається із співвідношення, що дозволяє узагальнити як термофлуктуаційну теорію (відкол при розриві), так і лінеаризовану концепцію теорії Кулона:

$$\tau = \alpha \cdot \exp\{\gamma\sigma_B - \delta\sigma_n\} \quad (5.8)$$

де α , γ , δ - коефіцієнти, що визначаються властивостями матеріалу (грунту).

Умови руйнування при довільних (непостійних) значеннях зовнішніх напружень визначаються за допомогою інтеграла накопичення пошкоджуваності Бейлі:

$$\int_{t^*}^t \frac{dt'}{\tau(t')} \geq 1 \quad (5.9)$$

Розрахунок параметрів заломлених і відбитих на межах твердих середовищ хвиль помірної інтенсивності (до декількох тисяч атмосфер) проводиться відповідно до акустичного (лінійно пружного) наближення:

$$p' = \frac{2\rho\sqrt{\rho\rho'c'} \cdot \sqrt{c^2 - c'^2 \cos^2 \nu}}{\rho'c' \sin \nu + \rho\sqrt{c^2 - c'^2 \cos^2 \nu}} \quad (5.10)$$

$$\tilde{p} = p \frac{\rho'c' \sin \nu - \rho\sqrt{c^2 - c'^2 \cos^2 \nu}}{\rho'c' \sin \nu + \rho\sqrt{c^2 - c'^2 \cos^2 \nu}} \quad (5.11)$$

$$\tilde{v} = \frac{\tilde{p}}{\rho c} \quad (5.12)$$

де p , p' , \tilde{p} – відповідно, параметри тиску в падаючій, заломленій і відбитій хвилях, Па; ν – масова швидкість відображеної хвилі, м/с; ρ , ρ' – відповідно, щільність в першій і другий середовищах, кг/м³; c , c' – відповідні параметри швидкостей розповсюдження коливань, м/с; ν – кут між вектором розповсюдження хвилі і дотичною площиною до поверхні контакту.

5.2. Теоретичний розрахунок параметрів вибухового імпульсу на межі розподілу вибухова речовина – ґрунтовий масив

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 [112].

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 малощільних вибухових сумішей, спінених вибухових композицій, обробкою їх ультразвуковим випромінюванням, тощо.

Аналіз попередніх досліджень при вирішенні задачі знаходження радіусу зони ущільнення ґрунтів навколо свердловини [113–121] малощільними 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 [110, 112].

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

$$\begin{cases} U_H = \sqrt{(P_{max} - P_0) \cdot (v_0 - v)} \\ P_{max} = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right] \\ U_H = \frac{D}{K+1} \left(1 - \sqrt{2K \frac{\frac{P_{max}-1}{2P_{cp}}}{\sqrt{(K+1)\frac{P_{max}}{2P_{cp}}+(K-1)}}}} \right) & \text{при } P_{max} > P_{cp} \\ U_H = \frac{D}{K+1} \left\{ 1 + \frac{2K}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_{max}}{2P_{cp}} \right)^{\frac{K-1}{2K}} \right] \right\} & \text{при } P_{max} < 2P_{cp} \end{cases} \quad (5.13)$$

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.

$$P_{cp} = (k - 1)\rho_0'Q_v \quad (5.14)$$

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

$$B = \frac{\rho c^2}{n} \quad (5.15)$$

де 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.

$$\begin{aligned} P_r &= \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \left[\left(P_{max} \frac{r''' - r}{r'' - r_0} \right) + P_{min} \left(1 - \frac{r''' - r}{r''' - r_0} \right) \right] && \text{при } r_0 < r < r''' \\ P_r &= \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \left[\left(P_{min} \frac{r'' - r}{r'' - r'''} \right) + P_{сеп} \left(1 - \frac{r'' - r}{r'' - r'''} \right) \right] && \text{при } r''' < r < r'' \\ P_r &= P_{ср} \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 && \text{при } r'' < r < r' \\ P_r &= P_r' \left(\frac{r'}{r}\right)^{2\gamma} && \text{при } r > r' \end{aligned} \quad (5.16)$$

де 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 ізентропи ідеального газу, який становить $\gamma = 1,3$

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

$$\begin{aligned} P_{min} &= 1.4P_{ср} - 0.4P_{max} \\ r''' &= r_0 \left(1 - K_1 \frac{U_H}{D} \right) \\ r'' &= r_0 \left(1 + K_2 \frac{U_H}{D} \right) \end{aligned} \quad (5.17)$$

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

$$t_1 = 0,64 \frac{r_0}{D} \quad (5.18)$$

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

$$t_2 = \frac{1,2r_0 + 2r''}{D} \quad (5.19)$$

При цьому тиск P_r становитиме: в момент часу t_1 :

$$P_r = P_{min} \left(\frac{r_0}{r'''} \right)^6 \quad (5.20)$$

в момент часу t_2 :

$$P_r = P_{cp} \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6 \quad (5.21)$$

а при $t = 0$:

$$P_r = P_{max}$$

Графік залежності P_r від t апроксимується залежністю:

$$P = P_0 e^{-\alpha t} \quad (5.22)$$

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

$$\begin{aligned} \text{при } t=0 & \quad P = P_0 = P_{max} \\ \text{при } t=t_1 & \quad P_r' = P_{min} \left(\frac{r_0}{r'''} \right)^6 \end{aligned} \quad (5.23)$$

Звідси отримуємо:

$$\alpha = \frac{\ln P_{max} - \ln P_r'}{t_1} \quad (5.24)$$

Час зростання вибухового імпульсу визначається за формулою:

$$\tau = \frac{0.4r_0}{\frac{3}{4} D} \quad (5.25)$$

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 таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Фізичні і динамічні характеристики ВР

Найменування	Показники			
	амоніт №6ЖВ	Ігданіт	спінена ВР	спінена ВР, оброблена УЗ
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, c 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

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 (5.13 – 5.21), знаходимо:

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

$$U_H = 1370 \text{ М/с}$$

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

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

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

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

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

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

при $t=t_1$ $P_r' = \left(\frac{r_0}{r'''} \right)^6 P_{min} = \left(\frac{0.03}{0.0367} \right)^6 \cdot 6.37 \cdot 10^9 = 1.9 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$

при $t=t_2$ $P_r = \left(\frac{r_0}{r''} \right)^6 P_{cp} = \left(\frac{0.03}{0.0533} \right)^6 \cdot 6.89 \cdot 10^9 = 0.22 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$

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

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

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 спінені 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:

$$P_r = \frac{P' Dt}{b} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2k} \quad \text{при } 0 < t < t' \quad (5.26)$$

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 підриванні зарядів ігданіту і спіненої ВР.

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

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{2r(P_r - P_0) - 2\rho_0 c R \bar{U}}{\rho_0 \cdot r_0^2 + \rho_0(R^2 - r_0^2)} \quad (5.27)$$

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

За даними розрахунків таблиці 5.3 на рисунку 5.2 графічно наведено вибухові імпульси для амоніту №6 ЖВ, ігданіту та спіненої ВР при підриванні зарядів ВР радіусом 30 мм у просадних лесових ґрунтах. На рисунку 5.3 наведено час зростання вибухового імпульсу наведених ВР.

Таблиця 5.3. Розрахункові параметри вибухового імпульсу ВР

Найменування		Показники			
		амоніт №6 ЖВ	ігданіт	спінена ВР	спінена ВР з УЗ
Початковий тиск на фронті уданої хвилі, $P_{max} \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		8,19	6,92	5,52	4,18
Тиск в свердловині, за умови миттєвої детонації, $P_{сер} \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		6,89	5,82	4,27	3,25
Мінімальний тиск, $P_{min} \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		6,37	5,38	3,77	3,26
Тиск в момент часу t_1 , $P_r \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		1,9	1,76	0,31	0,4
Тиск в момент часу t_2 , $P_r \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		0,22	0,24	0,009	0,016
Час проходження ділянки від r^0 до r''' , $t_1, \cdot 10^{-6} \text{ с}$		5,1	5,57	12,8	12,8
Час проходження ділянки від r''' до r'' , $t_2, \cdot 10^{-6} \text{ с}$		38,5	39,94	135,4	122,3
Час зростання вибухового імпульсу, мкс при:	$r_0=0,03 \text{ м}$	4,3	4,6	10,6	10,6
	$r_0=0,06 \text{ м}$	8,65	9,28	21,33	21,33
	$r_0=0,09 \text{ м}$	12,97	13,91	32,0	32,0

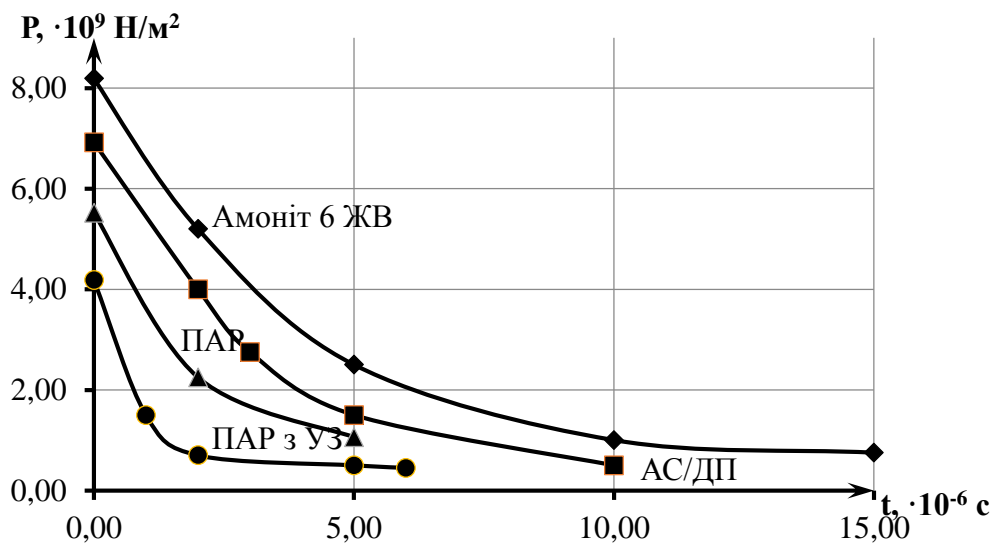


Рис. 5.2. Залежність тиску на межі розподілу «продукти детонації – середовище» від часу

Як видно з рисунку 5.2, у зарядах на основі спіненних 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 вибухового імпульсу на межі «продукти детонації – середовище» для спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, становить $122,34 \cdot 10^{-6}$ 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 спінених 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.

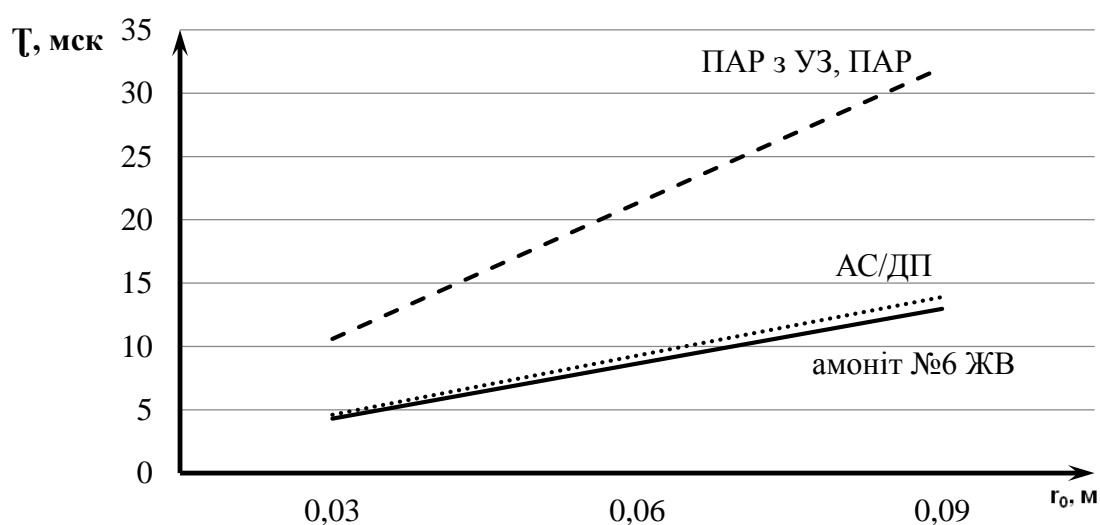


Рис. 5.3. Залежність тривалості зростання вибухового імпульсу від радіусу заряду ВР

Структурно-нестійкі 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 малощільних ВР дозволяють визначити характер ущільнення структурно-нестійких просадних ґрунтів в залежності від їх стану та обрати раціональні технологічні схеми вибуху для ущільнення територій цих ґрунтів покритих поверхневими або горизонтальними циліндричними зарядами вибухових речовин із застосуванням спінених 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 структурно-нестійких ґрунтів у вигляді лесів.

Отже, дані теоретичних розрахунків свідчать про те, що найбільшого ефекту при ущільненні 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, що в свою чергу має сприяти рівномірному ущільненню просадних ґрунтів на необхідну товщу.

5.3. Оцінка параметрів вибухового імпульсу за допомогою спектральних характеристик

Основними параметрами вибухового імпульсу прийнято вважати: максимальне значення напруження в імпульсі та тривалість його дії.

Змінюючи тим чи іншим способом ці параметри здійснюють керування вибуховим імпульсом. Однак знання цих двох параметрів вибухового імпульсу є неповним для оцінки дії хвиль напружень та для розкриття фізичної сутності керування їх параметрами.

У цьому розділі розглянемо такі характеристики, які найбільш повно відображають вибуховий процес і цим дозволяють точніше оцінити його ефективність.

Нехай на деякій відстані R від джерела вибуху хвиля напруження описується аналітичною функцією

$$\sigma(t) = f(t) \quad (5.28)$$

Введемо спектральну щільність вибухового імпульсу (120):

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5.29)$$

Як відомо з теорії спектрів між /2.1/ и /2.2/ існує наступний зв'язок:

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (5.30)$$

Формули (5.29) та (5.30) є основними за теорією спектрів. Вони є парою перетворень Фур'є, що пов'язують між собою дві функції: вагому функцію часу $f(t)$ і комплексну функцію частоти $S(j\omega)$.

Формула (5.30) являє собою інтеграл Фур'є в комплексній формі. Суть цієї формули полягає в тому, що функція $f(t)$ представлена сумою синусоїдальних складових. Тому вона може бути представлена лише сумою нескінченно великої кількості нескінченно малих коливань, нескінченно близьких за частотою. Комплексна амплітуда кожного окремого коливання нескінченно мала, і становить:

$$dc = \frac{1}{\pi} S(j\omega) d\omega.$$

Формулу (5.30) можна записати у ваговій формі, тоді інтегрування проводиться тільки за позитивними частотами. Ввівши позначення

$$S(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega),$$

отримаємо /враховуючи, що A – парна, а B – непарна функція/

$$\sigma(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega) \cos \omega t - B(\omega) \sin \omega t] d\omega \quad (5.31)$$

Можна отримати ще один запис формули (5.31) у вигляді

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} [S(j\omega)e^{j\omega t} + S(-j\omega)e^{-j\omega t}]d\omega$$

У квадратних дужках стоїть сума сполучених величин, що дорівнює подвоєній ваговій частині. Тому

$$\sigma(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

Введемо ще одне уточнення. Підінтегральна функція у формулі (5.30) описує окремий, нескінченно малий додаток, тобто, коливання з нескінченно малою амплітудою dc :

$$\frac{1}{\pi} S(j\omega)e^{j\omega t}d\omega = dce^{j\omega t}.$$

Звідси знаходимо:

$$S(j\omega) = \pi \frac{dc}{d\omega}.$$

Таким чином, величина $S(j\omega)$ виражає не безпосередньо амплітуду, а так звану спектральну густину. Однак, оскільки вона впливає не суттєво, то нею нехтують і називають $S(j\omega)$ комплексним спектром неперіодичної функції, а абсолютне значення – модуль цієї величини $|S(j\omega)| = S(\omega)$ просто спектром.

Спектральна характеристика вибухового імпульсу, описана за формулою (5.29), дозволяє оцінити зміну параметрів на різних відстанях від центру вибуху з урахуванням дисипативних втрат.

Крім спектральної функції, доцільно розглянути і такі характеристики, які глибше відображають вибуховий процес, а саме:

а) енергія спектру:

$$W = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S^2(j\omega)d\omega; \quad (5.32)$$

б) діюча тривалість імпульсу Δt , під якою розуміють проміжок часу, у якому зосереджена переважна частина енергії імпульсу, і яка знаходиться за формулою

$$\int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} \sigma^2(t) dt = \mu \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2(t) dt = \mu A_t, \quad (5.33)$$

де $A_t = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2(t) dt$ – величина, пропорційна повній енергії імпульсу, μ – частка повної енергії імпульсу, що припадає на проміжок часу Δt . Зазвичай приймають $\mu = 0,9$;

в) діюча ширина спектру Δf , знаходиться за допомогою формули

$$\int_0^{2\pi\Delta f} S^2(j\omega) d\omega = \mu \int_0^{\infty} S^2(j\omega) d\omega \quad (5.34)$$

г) коефіцієнт форми вибухового імпульсу $\eta = \Delta f \Delta t$.

Він характеризує не тільки форму вибухового імпульсу, а і його спотворення під час проходження через вимірювальний тракт з обмеженою смугою робочих частот;

д) частоти істотних гармонійних складових, що визначаються за кривою спектра $S(\omega)$.

Проведемо дослідження параметрів вибухового імпульсу за допомогою наведених вище спектральних характеристик.

Відомо, що безпосереднє вимірювання тиску газів продуктів детонації у свердловині пов'язано з великими труднощами. Вирішення цієї задачі значно полегшиться, якщо скористатися спектральною характеристикою вибухового імпульсу, записаною у формулі (5.29).

При розповсюдженні імпульсу в масиві складові спектра поглинаються неоднаково на різних частотах, у результаті чого змінюється не тільки величина, але і форма імпульсу напруження.

Якщо спектральна щільність імпульсу біля стінки свердловини становить $S_0(j\omega)$, то в результаті поглинання спектральна щільність

зміниться до значення $S(j\omega)$ у точці масиву, що досліджується, яка розташована на відстані R від центру вибуху.

З одного боку величину $S(j\omega)$ можна визначити із співвідношення:

$$S(j\omega) = S_0(j\omega)\eta_n^R(\omega)\eta_r(R), \quad (5.35)$$

де $\eta_n^R(\omega)$ – коефіцієнт пропускання середовища, що стискається. Визначається експериментально; $\eta_r(R)$ – коефіцієнт геометричної розбіжності. Для плоскої хвилі $\eta_r(R) = 1$.

З іншого боку, $S(j\omega)$ можна визначити за формулою (5.29).

Вирішуючи рівняння (5.35) відносно $S_0(j\omega)$, знаходимо

$$S_0(j\omega) = \frac{S(j\omega)}{\eta_n^R(\omega)\eta_r(R)}$$

Відповідно до співвідношення (5.30) напруження біля стінки свердловини визначатиметься за формулою:

$$\sigma_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S(j\omega)}{\eta_n^R(\omega)\eta_r(R)} e^{j\omega t} d\omega \quad (5.36)$$

Зазначимо, що інтеграл виду (5.36) легко визначається за допомогою відомої в теорії функцій комплексної перемінної теореми про відраховання.

Таким чином, при визначенні експериментальним шляхом параметри вибухового імпульсу на певній відстані R від джерела збурення за формулою (5.36), можна визначити тиск біля стінки свердловини.

Вимірювання параметрів хвиль напруження на відстані R від вибуху проводиться за допомогою п'єзодатчиків, під'єднаних через приставку АЦП Е-440 до ПК з програмним забезпеченням.

Приставка АЦП Е-440 перетворює аналоговий сигнал в цифровий, має 14 каналів та реєструє частоти в діапазоні 0,3 – 100 кГц.

Вимірювання компонентів нормальних складових напружень виконувались методом перетворення механічної величини в електричний заряд п'єзоелектричних перетворювачів при імпульсному механічному впливі на них з наступним перетворенням в електричну напругу з реєстрацією (рис. 5.4).

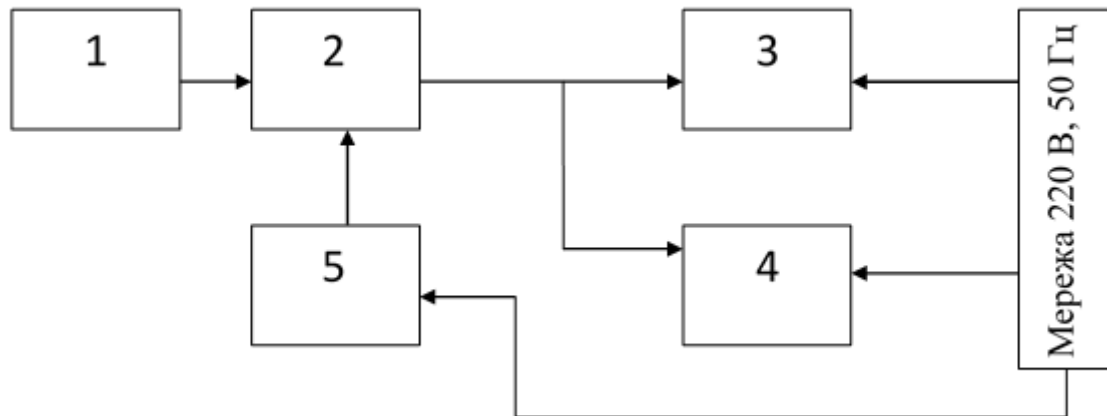


Рис. 5.4. Блок-схема вимірювального каналу:
1-п'єзонперетворювач (ДН-4, ДН-5); 2 - погоджувальний підсилювач (СУЗ-2); 3-перетворювач E14-440; 4- ПК з програмою Power Grafh; 5-блок живлення, ±15 В.

Обробка результатів вимірювань виконувалась нижче наведеним чином.

Амплітудні значення компонентів нормальних складових напружень (σ) визначаються за формулою:

$$\sigma = \frac{A}{S}, \text{ мПа}, \quad (5.37)$$

де A – амплітудне значення на виході системи, мВ; S – коефіцієнт передачі (чутливості) вимірювального каналу, який визначається за градацією мВ/мПа.

Якщо значення коефіцієнтів передачі підсилювача відрізняються від коефіцієнтів за градацією, то напруження (σ) визначається наступним чином:

$$\sigma = \frac{A}{K_n S}, \text{ мПа}, \quad (5.38)$$

де K_n – коефіцієнт передачі вимірювального каналу, мВ/пКл.

Вихідні та проміжні результати приймались з точністю до 1 %.

При дослідженні впливу на структурно-нестійкий ґрунтовий масив короткотривалих динамічних навантажень може виникати похибка за рахунок апаратури, через яку проходить імпульс напруги, перетворений датчиком.

Всі прилади мають обмежену смугу пропускання, тобто перехідну характеристику з кінцевим часом встановлення.

Внаслідок цього, напруження на виході вимірювального тракту, більшою чи меншою мірою буде завжди відрізнятися від досліджуваного напруження, як за часом зростання, так і за його величиною.

Проведемо аналіз динамічної похибки відтворюючих приладів з відомою шириною смуги пропускання, враховуючи спектр вибухового імпульсу.

Відомо [122], що вихідна реакція відтворюючої системи на вхідний вплив є деякою апроксимацією вхідного сигналу. Відповідно до теорії рядів Фур'є середньоквадратична похибка такої апроксимації оцінюється співвідношенням:

$$\varepsilon^2(\omega_H, \omega_B) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\tau \sigma^2(t) dt - \frac{1}{4\pi^2} \int_{\omega_H}^{\omega_B} S^2(j\omega) d\omega, \quad (5.39)$$

де ω_H, ω_B – нижня та верхня кругові частоти вимірювальної системи.

Відомо, що найбільша динамічна похибка системи буде виникати у випадку, коли вхідний вплив апроксимується прямокутним трикутним імпульсом [71].

Для зручності розрахунку амплітуду імпульсу приймаємо рівною одиниці. Формула (5.39) у цьому разі після перетворення буде мати вигляд:

$$\varepsilon^2(\omega_H, \omega_B) = \frac{\tau}{6\pi} \left(1 - \frac{3}{4\pi} \int_{x_H}^{x_B} \frac{\sin^4 x}{x^4} dx \right),$$

де

$$x = \frac{\omega\tau}{2}.$$

Враховуючи що

$$\int_{x_H}^{x_B} = \int_0^\infty - \int_0^{x_H} - \int_{x_B}^\infty \text{ та } \int_0^\infty \frac{\sin^4 x}{x^4} dx = \frac{\pi}{3},$$

отримаємо для виразу у круглих дужках наступне:

$$1 - \frac{3}{4\pi} \left(\frac{\pi}{3} - \int_0^{x_H} \frac{\sin^4 x}{x^4} dx - \int_{x_B}^{\infty} \frac{\sin^4 x}{x^4} dx \right).$$

Перший інтеграл може бути взятий, якщо розкласти підінтегральну функцію в статечний ряд і обмежитися членами першого порядку малості. Це можна зробити, маючи на увазі, що $x_H \ll 1$ за визначенням ($x_H = \omega_H \tau / 2$).

Другий - представляється асимптотичним рядом, оскільки $x_B \gg 1$ з тих же міркувань. Відкинувши всі члени, порядок малості яких більше одиниці, отримаємо:

$$\Delta_{\text{тр}}^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi f_H}{f_0} + \frac{f_0}{\pi f_B} \right), \quad (5.40)$$

где $f_H = \frac{\omega_H}{2\pi}$; $f_B = \frac{\omega_B}{2\pi}$; $f_0 = \frac{1}{\tau}$ – частоти у герцах;

$$\Delta_{\text{тр}}^2 = \frac{\varepsilon^2(\omega_H, \omega_B)}{\tau/8\pi}.$$

Формула (5.40) описує загальну динамічну похибку відтворюючого приладу при вхідному впливі у вигляді трикутного імпульсу.

Як приклад, визначимо динамічну похибку приставки АЦП Е-440 з наступними параметрами: $f_H = 0$, $f_B = 800$ Гц при реєстрації прямокутних трикутних імпульсів тривалістю 1 мс та 10 мс.

Згідно з формулою (5.40) маємо

$$\text{при } \tau = 1 \text{ мс} \quad \Delta_{\text{тр}}^2 = 12\%$$

$$\tau = 10 \text{ мс} \quad \Delta_{\text{тр}}^2 = 1,2\%$$

Для реальних імпульсів, у яких час зростання максимуму не дорівнює нулю, ці похибки будуть меншими.

Сумарні похибки вимірювань напружень і швидкостей частинок ґрунту не перевищували 5–10 % за умови, що час зростання був не менше 0,001 с.

Таким чином, дослідження спектральних характеристик вибухового імпульсу дозволяє глибше провести оцінку його параметрів, визначити

ширину смуги пропускання вимірювального каналу, що забезпечує найменше спотворення передачі імпульсу напружень.

5.4. Дослідження амплітудно-частотного спектру у хвиль напружень в структурно-нестійких ґрунтах

Як зазначалося вище одним із основних параметрів хвиль напружень, що генеруються за допомогою вибуху, є їх частотний спектр, який залежить від характеру імпульсу.

Відомо, що амплітуда та тривалість початкового імпульсу значно впливають на затухання хвиль напружень та розвиток незворотних об'ємних деформацій у ґрунтах [27, 115].

Змінюючи спрямовано параметри початкового імпульсу, можна керувати процесом вибухового ущільнення стискаючого середовища.

З цієї точки зору важливим етапом є встановити зв'язок між частотним спектром імпульсу та іншими параметрами хвиль напружень для того, щоб обґрунтовано вибрати відповідний метод керування вибуховим імпульсом.

Розглянемо частотні спектри хвиль напружень у нестійких ґрунтах та їх залежність від таких параметрів імпульсу, як час зростання та залежність зміни його у часі.

При аналізі форма імпульсу напружень у ґрунті апроксимувалась трикутником, що найбільш наближено до реальності, у наступному аналітичному вигляді:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < -\tau_1; \\ \sigma_m \left(1 + \frac{t}{\tau_1}\right), & -\tau_1 \leq t \leq 0; \\ \sigma_m \left(1 - \frac{t}{\tau_2}\right), & 0 \leq t \leq \tau_2; \\ 0, & t > \tau_2; \end{cases} \quad (5.41)$$

де σ_m – максимальне напруження імпульсу; τ_1, τ_2 – час зростання та спаду напружень.

Відповідно до формули (5.29) спектральна щільність трикутного імпульсу запишеться у вигляді:

$$S(j\omega) = \frac{\sigma_m}{\omega^2} \left(\frac{e^{j\omega\tau_1} - 1}{\tau_1} + \frac{e^{-j\omega\tau_2} - 1}{\tau_2} \right)$$

Для зручності дослідження залежності частотного спектра від параметрів хвилі напруження введемо позначення $\tau_1 = a\tau, \tau_2 = b\tau$, де a, b – раціональні числа, сума яких дорівнює одиниці, τ – загальна тривалість імпульсу.

З урахуванням цих позначень спектр трикутного імпульсу матиме вигляд:

$$S(\omega) = |S(j\omega)| = \frac{\sigma_m}{\omega^2} \left(\frac{1 - \cos a\omega\tau}{a\tau} + \frac{1 - \cos b\omega\tau}{b\tau} \right) \quad (5.42)$$

Як видно, спектр трикутного імпульсу залежить від максимального значення напруження σ_m та часу дії напруження τ , причому на частотний склад спектра впливає останній параметр.

Значення $S(\omega)$ при $\omega = 0$ знаходимо за формулою:

$$S(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} S(\omega) = \frac{\sigma_m \tau}{2}.$$

Таким чином, при $\omega = 0$ амплітуда спектру імпульсу чисельно дорівнює його площі і залежить від співвідношення параметрів a і b . Це свідчить про те, що із зменшенням параметра a , або довжини переднього фронту імпульсу, спектр переходить до більш високих частот. Так, при $a = 0,05 / \tau_1 = 5 \cdot 10^{-4} \text{с/}$ в спектрі імпульсу присутні частоти до 1600 Гц, у той час як при $a = 0,25 / \tau_1 = 25 \cdot 10^{-4} \text{с/}$ амплітуда спектральної щільності дорівнює нулю вже при частоті 400 Гц.

Фізична суть параметра a полягає в тому, що він опосередковано визначає швидкість навантаження. Отже, швидкість навантаження в даному випадку можна знайти за формулою:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma_m}{\tau_1} = \frac{\sigma_m}{a\tau}.$$

З даної формули видно, що зміна часу спаду напруження τ_2 не впливає на частотний склад спектра. Отже, частотний склад вибухового імпульсу визначається лише тривалістю переднього фронту τ_1 .

Розглянемо характер зміни вибухового процесу на різних відстанях від джерела збудження. З цією метою було проведено маломасштабні дослідження щодо дослідження цього явища. В якості ВР застосовувався детонаційний шнур та циліндричний заряд, $C_{\text{пог.}} = 0,24$ кг/пг. м.

На рис. 5.5 наведені криві спектральної щільності для одного з дослідів. Крива 1 описує спектр вибухового імпульсу на відстані 0,35 м, крива 2 – на відстані 0,48 м, крива 3 – на відстані 0,62 м.

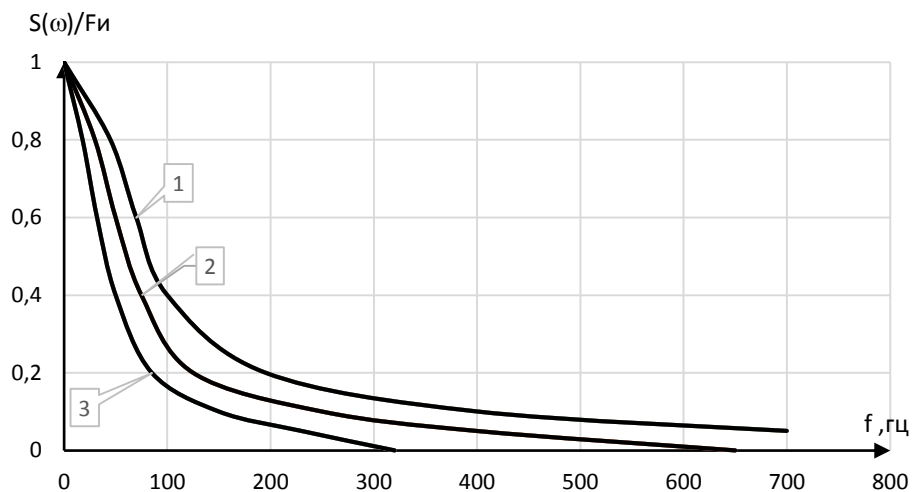


Рис. 5.5. Спектральна щільність вибухового імпульсу:
 1 – на відстані 0,35 м, 2 – на відстані 0,48 м,
 3 – на відстані 0,62 м від джерела збудження

Вибуховий імпульс у наших дослідях на різних відстанях описувався за допомогою функції (5.29).

Криві, наведені на рис. 5.5 були отримані за формулою (5.42) при наступних параметрах імпульсу:

$$\text{для } R_1 = 0,35 \text{ м, } \tau_1 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ с, } \tau = 64 \cdot 10^{-4} \text{ с ;}$$

$$\text{для } R_2 = 0,48 \text{ м, } \tau_1 = 16 \cdot 10^{-4} \text{ с, } \tau = 92 \cdot 10^{-4} \text{ с ;}$$

$$\text{для } R_3 = 0,62 \text{ м, } \tau_1 = 28 \cdot 10^{-4} \text{ с, } \tau = 148 \cdot 10^{-4} \text{ с ;}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \text{ – тривалість імпульсів.}$$

Як видно з рисунку 5.5 спектр вибухового імпульсу зі збільшенням відстані від джерела збудження пересувається в область нижчих частот, що свідчить про затухання високочастотних складових спектра.

Вище ми розглянули спектральні характеристики одиночного вибухового імпульсу. Цікавим є дослідження поведінки спектральних характеристик при взаємодії кількох імпульсів з метою вибору найбільш оптимальних схем виконання вибухових робіт. Для цього розглянемо ряд схем взаємодії вибухових імпульсів та оцінки їхньої ефективності за допомогою спектральних характеристик.

Розглянемо взаємодією двох прямокутних імпульсів, що генеруються джерелами вибуху і розташовані один від одного на певній відстані.

Розглянемо першу схему, на яку в результаті суперпозиції на відстані R від джерел вибуху виходить сумарний імпульс такий, як зображений на рис. 5а. Спектр цього імпульсу відповідно до залежності (5.29) описується за допомогою формули:

$$S_1(\omega) = 2\sigma_m\tau \frac{\sin \omega\tau}{\omega\tau},$$

де σ_m – максимальна амплітуда імпульсу, τ – тривалість імпульсу, $\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

На рис. 5.6 б представлена друга схема взаємодії вибухових імпульсів. Спектр цього результуючого імпульсу запишеться як:

$$S_2(\omega) = 2\sigma_m\tau \frac{\sin \omega \frac{\tau}{2}}{\omega \frac{\tau}{2}}.$$

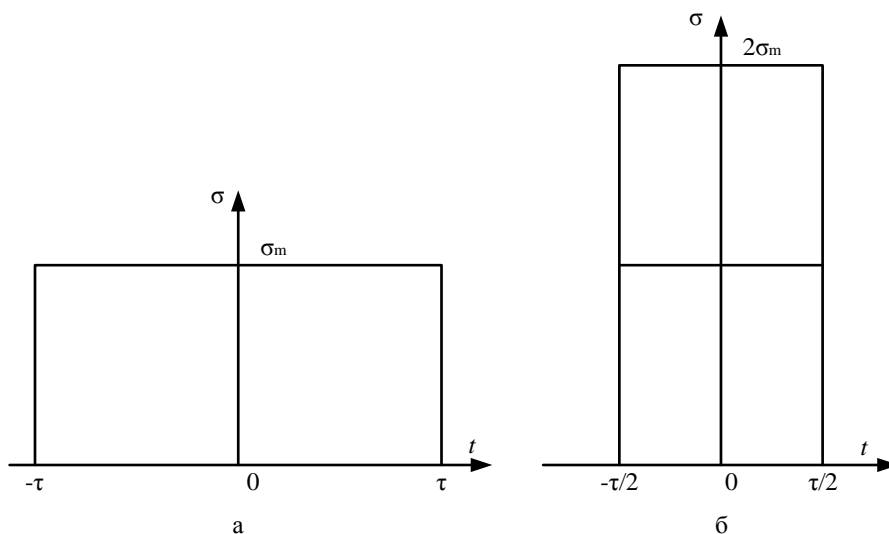


Рис. 5.6. Схеми сумарного імпульсу на відстані R від джерел вибуху відповідно: a – при тривалості τ і b – при тривалості $\tau/2$

Визначимо для кожної із запропонованих схем за формулами (5.33) і (5.34) діючу тривалість імпульсу $\Delta\tau$ та діючу ширину спектру Δf . Для першої схеми: $\Delta\tau_1 = 1,8\tau$; $\Delta f_1 = 0,9/4\tau$. Для другої схеми: $\Delta\tau_1 = 1,8\tau$; $\Delta f_1 = 0,9/4\tau$.

Показник η характеризує не тільки форму імпульсу, але і його спотворення при проходженні через вимірювальний тракт з обмеженою смугою робочих частот, в обох випадках однаковий і дорівнює $\eta = 0,405$.

Для першої схеми маємо: $\Delta\tau_1 = 2\Delta\tau_2$, а $\Delta f_1 = 0,5\Delta f_2$, тобто діюча тривалість імпульсу в 2 рази більша, ніж для другої схеми при ширині спектра в два рази меншої. Оскільки низькочастотний спектр зазнає меншого спотворення, ніж спектр, насичений більш високочастотними гармоніками, то застосування першої схеми з точки зору досягнення кращого ефекту ущільнення краще.

Для більш повної оцінки ефективності взаємодії вибухових імпульсів розглянемо енергію спектру. Застосовуючи формулу (5.35) для описаних вище схем, отримаємо відповідні вирази розподілу енергії за частотою:

$$\frac{dw_1}{d\omega} = N_1(\omega) = \frac{4\sigma_m^2 \sin^2 \omega\tau}{\pi \omega^2}$$

$$\frac{dw_2}{d\omega} = N_2(\omega) = \frac{16\sigma_m^2 \sin^2 \omega \frac{\tau}{2}}{\pi \omega^2}.$$

Криві розподілу енергії за частотою наведено на рис. 5.7. Як показує порівняння цих кривих для першої схеми (крива 1) основна частота енергії вибухового імпульсу розподілена на низьких частотах у межах 1-20 Гц, для другої схеми (крива 2) - зсунута в область вищих частот і становить 1-50 Гц.

Виходячи із частотної картини вибухового імпульсу, ефективність застосування методів керування його параметрами можна пояснити наступним чином. Подовження переднього фронту імпульсу, або зменшення швидкості навантаження, зсуває спектр в область більш низьких частот. Оскільки хвильові збудження низьких частот затухають повільніше поряд з пониженим опором деформованого середовища при менших швидкостях

навантаження, застосування вище розглянутих способів керування вибуховим імпульсом призводить до збільшення ущільненої зони структурно нестійкого масиву.

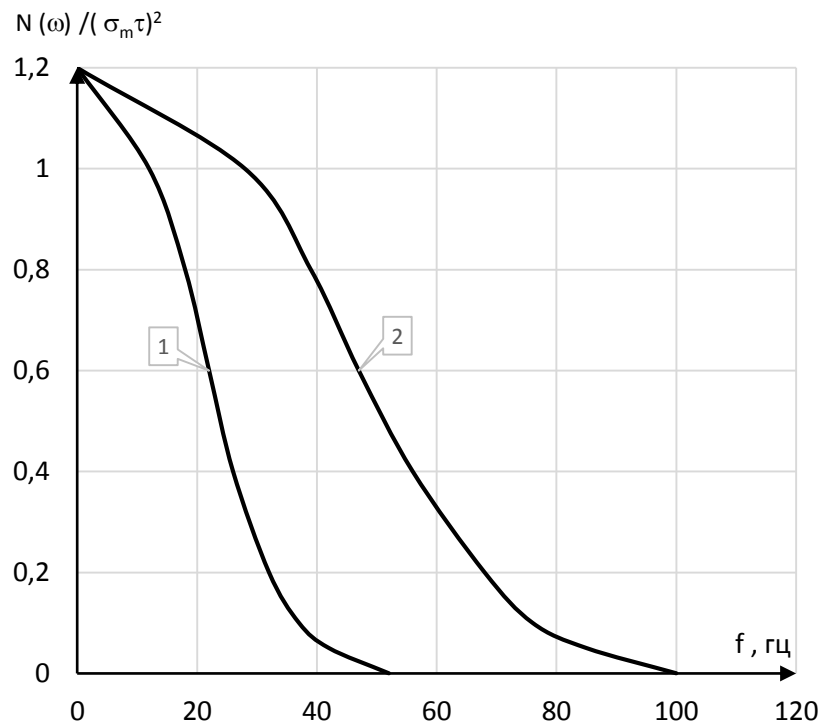


Рис. 5.7. Розподіл енергії вибухового імпульсу за частотою відповідно: 1 – для першої схеми тривалості вибухового імпульсу, 2 – для другої схеми тривалості вибухового імпульсу.

Таким чином, дослідження спектральних характеристик як параметра вибухового імпульсу дозволяє глибше розкрити природу методів керування енергією вибуху при ущільненні нестійких ґрунтів.

Характер частотного спектру хвиль напружень в структурно-нестійких ґрунтах в значній мірі залежать від швидкості навантаження або від тривалості зростання напруження у вибуховому імпульсі. Час розвантаження напруження не впливає на частотний склад спектру.

Зі збільшенням відстані амплітудно-частотний спектр зсувається в область більш низьких частот, що свідчить про затухання високочастотних складових спектру з віддаленням від джерела збуджень.

Дослідження різних схем взаємодії вибухових імпульсів за допомогою спектральних характеристик показало, що найбільш оптимальною схемою виконання вибухових робіт з точки зору досягнення найкращого ефекту

ущільнення ґрунтового масиву є схема, зображена на рис 5.6 а, яка дозволяє збільшити тривалість вибухового впливу на структурно-нестійкий масив.

При аналітичних та теоретичних оцінках можливостей керування параметрами вибухового імпульсу для регулювання впливу на ґрунтовий масив виявлено, що інерційність середовища в динамічному процесі розвитку деформацій підсилюється через взаємне переміщення ґрунтових компонентів, оскільки посилюється вплив в'язкої складової на процес розвитку об'ємних деформацій. Теоретичні розрахунки показали, що ефективність ущільнення просадних ґрунтів при застосуванні вибуху визначається не тільки максимальним тиском на фронті детонаційної хвилі, але і тривалістю вибухового імпульсу.

Розділ 6. МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ВИБУХОВИМ ІМПУЛЬСОМ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСАДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ

6.1. Керування вибуховим імпульсом за допомогою короткоповільненого підривання

Відомо, що при будівництві цивільних, гідротехнічних, промислових та інших споруд на нестійких ґрунтах за допомогою енергії вибуху небезпека для навколишніх будівель і споруд становити ми сейсмічний ефект вибуху.

При проектуванні і виконанні вибухових робіт основним параметром просадного ґрунтового масиву для вибору величини заряду є його потужність та розміри блоку. При цьому сейсмічний ефект вибуху зростатиме пропорційно потужності вибуху, тобто, загальній масі заряду, що підривається миттєво, а це не завжди можливо, особливо при виконанні вибухових робіт поблизу існуючих будівель та споруд.

Необхідність розробки технологічних схем для ліквідації просадних властивостей масиву структурно-нестійких ґрунтів великої потужності (25-30 м) в сейсмічно небезпечних районах вимагає використання прийомів, що дозволяють забезпечити необхідне ущільнення ґрунтів на певній площі з урахуванням заходів, які дозволяють звести до мінімуму сейсмічний вплив на оточуючі споруди.

При розробці таких технологічних схем враховувалися наступні фактори:

– оточуючі будівлі і споруди, що знаходяться навколо ущільнюючого блоку ґрунтового масиву, повинні піддаватися мінімальному сейсмічному впливу.

– ефект від впливу на ущільнюючий масив загального заряду ВР, розосередженого в блоці, не повинен знижуватися.

Виходячи з цих обмежень, прийнято наступну схему виконання робіт. При послідовному підриванні певної кількості зарядів виникає можливість орієнтувати дію вибухових хвиль таким чином, щоб, зберігаючись практично

постійною в тилу фронту вибухової хвилі, у напрямку розвитку процесу вглиб масиву сумарна величина напруження на фронті зростала.

Якщо розглянути найпростішу схему свердловин (рис. 6.1), то цього ефекту можна досягти послідовним підриванням зарядів (свердловини 1-4), причому інтервали уповільнення між вибухами свердловин вибираються таким чином, щоб вибух наступного заряду відбувався в момент проходження через нього фронту вибухової хвилі, що генерується попереднім зарядом.

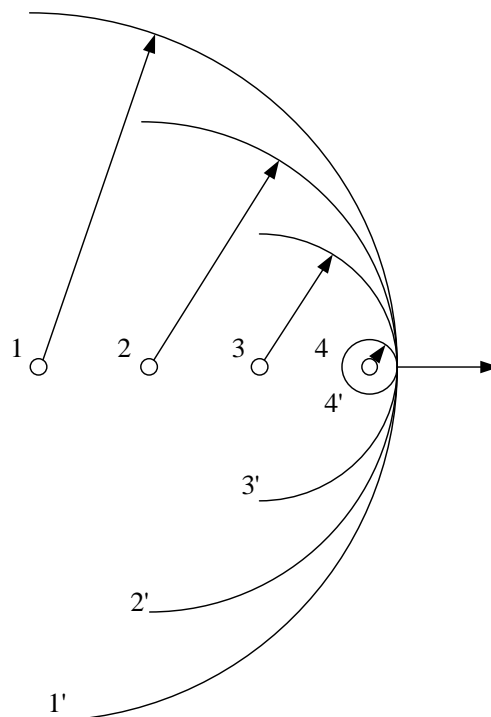


Рис. 6.1. Схема розповсюдження детонаційного фронту від свердловинних зарядів 1-4.

Для кількісної оцінки короткоуповільненого підривання (КУП) з точки зору зниження ступеня сейсмічного ефекту виходитимемо з принципу суперпозиції, тобто накладення. З цього принципу випливає, що, якщо в середовищі є збудження, що створюються з різних причин, то загальне збудження можна знайти як результат алгебраїчної суми окремих збуджень.

Згідно Шарпу [123] збудження в пружній області для i -го заряду описуватиметься за допомогою виразу:

$$u_i = u_m^{(i)} e^{-at} \sin \omega_i t, \quad (6.1)$$

де $u_m^{(i)}$ - максимальна амплітуда зміщення для i -го заряду, α - коефіцієнт затухання сейсмічних хвиль.

Згідно з експериментальними даними багатьох досліджень

$$u_m^{(i)} = k \left(\frac{Q_i}{R_i} \right)^{\nu}, \quad (6.2)$$

де Q_i - маса i -го заряду; ν - показник ступеня (визначається експериментально).

Розглянемо випадок, коли $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q$ (тоді $\omega_i = \omega$). Відмітимо, що у пружній області відстані від місця спостереження окремих зарядів практично рівні між собою, тобто $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$.

Визначимо результуюче зміщення при миттєвому підриванні однакових зарядів:

$$\begin{aligned} u_0 &= k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha t} \sin \omega t + k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha t} \sin \omega t + \dots + k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha t} \sin \omega t = \\ &= nk \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha t} \sin \omega t \end{aligned} \quad (6.3)$$

У разі короткоуповільненого підривання з інтервалом уповільнення Δt маємо:

$$\begin{aligned} u_t &= k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha t} \sin \omega t + k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha(t-\Delta t)} \sin \omega(t - \Delta t) + \dots + \\ &+ k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha[t-\Delta t(n-1)]} \sin \omega[t - \Delta t(n-1)] = \\ &= k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} \sum_{i=1}^n e^{-\alpha[t-\Delta t(i-1)]} \sin \omega[t - \Delta t(i-1)] \end{aligned} \quad (6.4)$$

Якщо прийняти у формулі (6.4), що $\Delta t = 0$, отримаємо вираз (6.3).

Для кількісної оцінки впливу короткоуповільненого підривання на результуюче зміщення при груповому впливі зарядів на ущільнюючий блок, введемо коефіцієнт:

$$k_t = \frac{u_t}{u_0} = \frac{k \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} \sum_{i=1}^n e^{-\alpha[t-\Delta t(i-1)]} \sin \omega[t - \Delta t(i-1)]}{nk \left(\frac{Q}{R} \right)^{\nu} e^{-\alpha t} \sin \omega t}. \quad (6.5)$$

Цей коефіцієнт показує у скільки разів сейсмічний ефект при короткоуповільненому підриванні менше, ніж при миттєвому підриванні.

Оскільки при визначенні сейсмічного ефекту нас цікавлять максимальні зміщення, то для виразу знаменника формули (6.5) можна записати:

$$nk \left(\frac{Q}{R}\right)^\nu e^{-\alpha t} \sin \omega t = nk \left(\frac{Q}{R}\right)^\nu e^{-\alpha t}.$$

Тоді формула (6.5) буде мати вигляд:

$$k_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{\alpha \Delta t (i-1)} \sin \omega [t - \Delta t (i-1)]. \quad (6.6)$$

Визначимо суму, яка знаходиться у чисельнику виразу (6.6):

$$\sum_{i=1}^n e^{\alpha \Delta t (i-1)} \sin \omega [t - \Delta t (i-1)] == \sum_{i=1}^n e^{\alpha \Delta t (i-1)} [\sin \omega t \cos \omega (i-1) \Delta t - \cos \omega t \sin \omega (i-1) \Delta t].$$

(6.7)

Скористаємося виразом:

$$\begin{aligned} e^{\alpha \Delta t (i-1)} \cos \omega (i-1) \Delta t - j e^{\alpha \Delta t (i-1)} \sin \omega (i-1) \Delta t &= e^{\alpha \Delta t (i-1) - j \omega (i-1) \Delta t} = \\ &= e^{(i-1)(\alpha \Delta t - j \omega \Delta t)} \end{aligned}$$

Тоді суму ряду:

$$\sum_{i=1}^n e^{(i-1)(\alpha \Delta t - j \omega \Delta t)}$$

визначимо, як суму геометричної прогресії з першим членом, рівним 1 і знаменником $e^{\alpha \Delta t - j \omega \Delta t}$

$$\sum_{i=1}^n e^{(i-1)(\alpha \Delta t - j \omega \Delta t)} = \frac{1 - e^{n(\alpha \Delta t - j \omega \Delta t)}}{1 - e^{\alpha \Delta t - j \omega \Delta t}}. \quad (6.8)$$

Якщо виділити у виразі (6.8) дійсну та уявну частини, то відповідно до формули (6.7) можна знайти:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n e^{\alpha \Delta t (i-1)} \cos \omega (i-1) \Delta t \sin \omega t = \\ &= \frac{1 - e^{\alpha \Delta t} \cos \omega \Delta t - e^{n \alpha \Delta t} \cos \omega n \Delta t + e^{(n+1) \alpha \Delta t} \cos (n-1) \omega \Delta t}{1 - 2e^{\alpha \Delta t} \cos \omega \Delta t + e^{2 \alpha \Delta t}} \sin \omega t. \\ &\sum_{i=1}^n e^{\alpha \Delta t (i-1)} \sin \omega (i-1) \Delta t \cos \omega t = \\ &= \frac{1 - e^{\alpha \Delta t} \sin \omega \Delta t - e^{n \alpha \Delta t} \sin \omega n \Delta t + e^{(n+1) \alpha \Delta t} \sin (n-1) \omega \Delta t}{1 - 2e^{\alpha \Delta t} \cos \omega \Delta t + e^{2 \alpha \Delta t}} \cos \omega t. \end{aligned}$$

Таким чином, коефіцієнт k_t визначається за формулою:

$$k_t = \frac{1 - e^{\alpha\Delta t} \cos\omega \Delta t - e^{n\alpha\Delta t} \cos\omega n\Delta t + e^{(n+1)\alpha\Delta t} \cos(n-1)\omega\Delta t}{n(1 - 2e^{\alpha\Delta t} \cos\omega \Delta t + e^{2\alpha\Delta t})} \sin\omega t - \frac{e^{\alpha\Delta t} \sin\omega \Delta t - e^{n\alpha\Delta t} \sin\omega n\Delta t + e^{(n+1)\alpha\Delta t} \sin(n-1)\omega\Delta t}{n(1 - 2e^{\alpha\Delta t} \cos\omega \Delta t + e^{2\alpha\Delta t})} \cos\omega t. \quad (6.9)$$

Після тригонометричних перетворень вираз /3.9/ набуде вигляду:

$$k_t = \frac{\sin\omega t - e^{\alpha\Delta t} \sin\omega(t+\Delta t) - e^{n\alpha\Delta t} \sin\omega(n\Delta t - t) + e^{(n+1)\alpha\Delta t} \sin\omega[t(n-1)\Delta t]}{n(1 - 2e^{\alpha\Delta t} \cos\omega \Delta t + e^{2\alpha\Delta t})} \quad (6.10)$$

Формула (6.10) дозволяє зробити розрахунок ступеня зниження сейсмічного ефекту при КУП для різних періодів коливань, числа груп уповільнень та часу уповільнення.

На рис. 6.2 наведено графік залежності k_t від тривалості дії вибуху $\tau = (n-1)\Delta t$ при $\Delta t = 0,02$ с, $T = 0,2$ с, $\alpha = 1,8$.

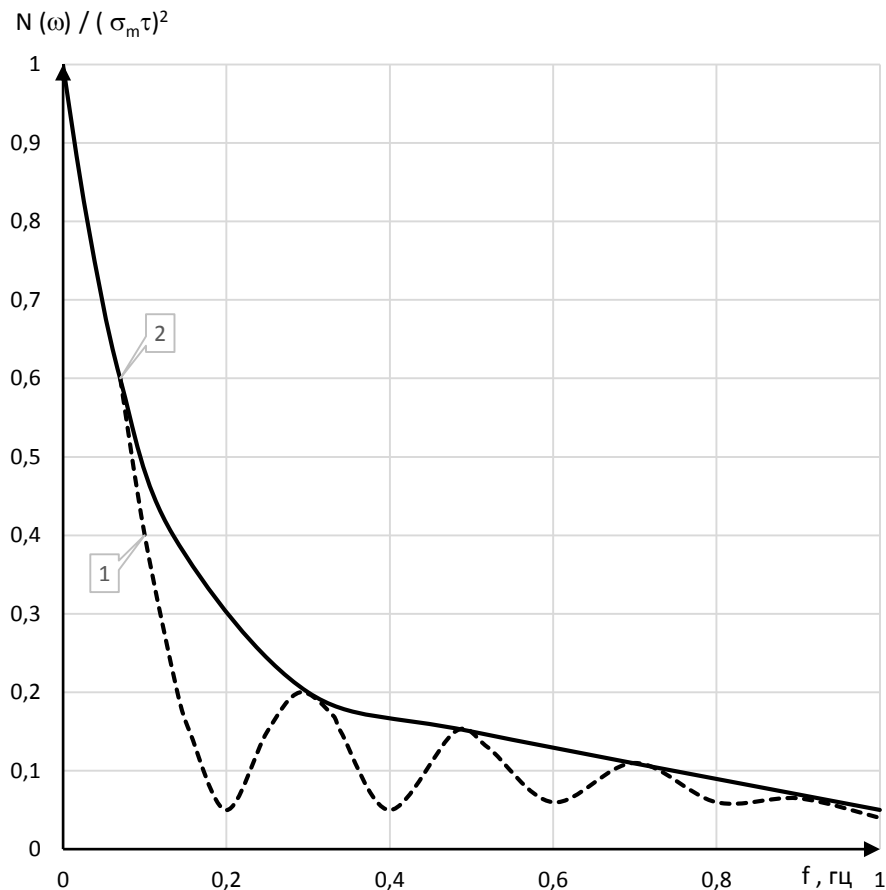


Рис. 6.2. Графік залежності k_t від тривалості дії вибуху.

Як видно із графіку (рис. 6.2), зміна сейсмічного ефекту в залежності від тривалості вибуху носить періодичний характер. Огинаюча крива, що зображена на рисунку суцільною лінією, відображає загальний характер зміни коефіцієнта k_t від τ , що якісно підтверджується експериментальними даними багатьох досліджень [27, 77, 112].

Переваги запропонованої технології полягають в наступному. Після вибуху першої свердловини утворюється порожнина, оточена системою тріщин, яка у комплексі є гасителем сейсмічних коливань у бік, протилежний розвитку процесу ущільнення (просідання). Стосовно до ущільнюючого блоку, спочатку підриваються ряди по контуру, які створюють надійний протисейсмічний екран. Необхідно аналітично оцінити ступінь затухання вибухових хвиль при проходженні через такий екран. Це буде розглянуто в наступному підрозділі, де вибухи з уповільненням виконуються всередині блоку, обмеженого екрануючою перешкодою.

6.2. Керування хвилею вибуху за допомогою екранування

Розглянемо найпростіший вид перешкоди (плоска перешкода у вигляді нескінченного прошарку із заданою товщиною h та швидкістю розповсюдження хвиль у ній C_2) (рис. 6.3).

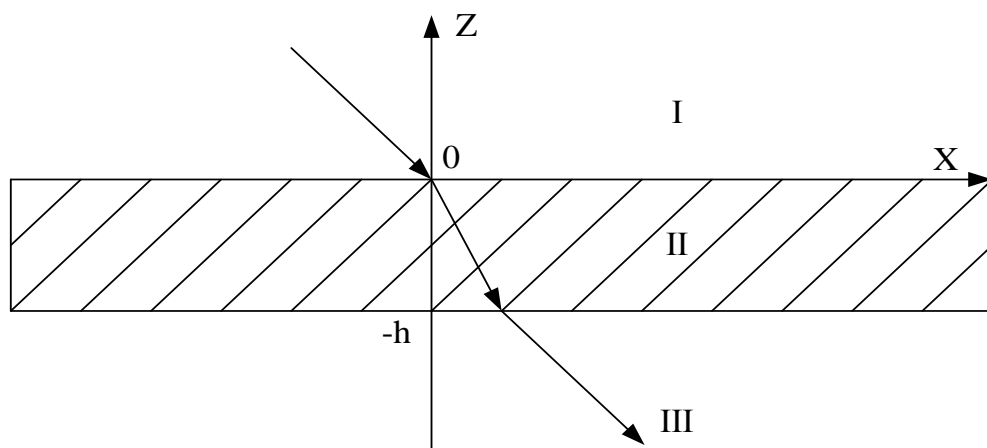


Рис. 6.3. Схема екрануючої перешкоди:
*I – ґрунтовий масив, II – екран,
 III – ґрунтовий масив за екранованою перешкодою.*

Нехай у ґрунтовому масиві зі швидкістю C_1 розповсюджується плоска хвиля, яка падає під кутом на екрануючий прошарок. Представимо падаюче збудження $u_0(x, z, t)$ за аналогією з формулою 4.30 у вигляді:

$$u_0(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_0(j\omega) e^{j\omega(t - \frac{\alpha}{C_1}x + \frac{\beta}{C_1}z)} d\omega, \quad (6.11)$$

де $S_0(j\omega)$ – функція комплексної змінної (спектр падаючого збудження), $\alpha = \sin \varphi$, $\beta = \cos \varphi$.

Вводячи нову змінну $p = j\omega$, отримаємо з 6.11:

$$u_0(x, z, t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} S_0(p) e^{p(t - \frac{\alpha}{C_1}x + \frac{\beta}{C_1}z)} dp. \quad (6.12)$$

При $S_0 = 1/p - j\omega$ падіння збудження буде плоскою монохроматичною хвилею у вигляді $u_0(x, z, t) = e^{j\omega(t - \frac{\alpha}{C_1}x + \frac{\beta}{C_1}z)}$.

Спробуємо встановити закони розповсюдження збуджуючих хвиль у припущенні, коли хвильовий процес описується за допомогою функцій $u_1(x, z, t)$, $u_2(x, z, t)$, $u_3(x, z, t)$, що задовольняють за межами джерела у середовищі наступним вимогам: $z > 0$, $-h < z < 0$ і $z < -h$. В результаті отримаємо відповідні рівняння:

$$\Delta u_1 = \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, \quad (v = 1; 3) \quad (6.13)$$

$$\Delta u_2 = \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}$$

з нульовими початковими умовами

$$u_v|_{t=0} = \frac{\partial u_v}{\partial t}|_{t=0} = u_2|_{t=0} = \frac{\partial u_2}{\partial t}|_{t=0} \quad (6.14)$$

та граничними умовами

$$\begin{aligned} u_1 = u_2, \frac{\partial u_1}{\partial z} = \frac{\partial u_2}{\partial z} & \quad \text{при } z = 0 \\ u_2 = u_3, \frac{\partial u_2}{\partial z} = \frac{\partial u_3}{\partial z} & \quad \text{при } z = -h. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Знайдемо функції u_1 , u_2 , u_3 у вигляді інтегралів, аналогічно як у формулі (6.12):

$$u_1 = u_0 + \frac{1}{2\pi j} \int_{(l)} S_0(p) e^{p(t - \frac{\alpha}{C_1}x + \frac{\beta}{C_1}z)} dp,$$

$$u_2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{(l)} \left[S_1(p) e^{p\beta_2 \frac{z}{c_2}} + S_2(p) e^{-p\beta_2 \frac{z}{c_2}} \right] e^{p(t - \alpha_2 \frac{x}{c_2})}, \quad (6.16)$$

$$u_3 = \frac{1}{2\pi j} \int_{(l)} S_3(p) e^{p(t - \alpha_3 \frac{x}{c_2} + \beta_3 \frac{z}{c_2})} dp,$$

$$\text{де } \alpha_2 = \frac{\alpha}{\gamma}, \quad \alpha_3 = \alpha, \quad \beta = \beta_3 = \sqrt{1 - \alpha^2}, \quad \gamma = \frac{c_1}{c_2}, \quad \beta_2 = \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{\gamma^2}}.$$

Враховуючи початкові (6.14) та граничні (6.15) умови знаходимо коефіцієнти:

$$S(p) = \frac{1 - \gamma^2}{\Delta(p)} S_0(p) \left[1 - e^{2p\frac{\beta_2 h}{c_2}} \right],$$

$$S_1(p) = \frac{2\beta S_0(p)}{\Delta(p)} (\gamma\beta_2 + \beta) e^{2p\frac{\beta_2 h}{c_2}}, \quad (6.17)$$

$$S_2(p) = -\frac{2\beta}{\Delta(p)} (\gamma\beta_2 - \beta) S_0(p),$$

$$S_3(p) = S_0(p) e^{\left(\frac{\beta}{c_1} - \frac{\beta_2}{c_2}\right)ph} \left[1 - \frac{(\beta - \gamma\beta_2)^2}{\Delta(p)} \left(1 - e^{2p\frac{\beta_2 h}{c_2}} \right) \right],$$

$$\Delta(p) = (\beta - \gamma\beta_2)^2 - (\beta + \gamma\beta_2)^2 e^{2p\frac{\beta_2 h}{c_2}} \quad (6.18)$$

Наступним етапом потрібно визначити збудження $u_3(x, z, t)$, що заломлене через ґрунтовий масив і перебуває за перешкодою.

Розглянемо випадок, коли $S_0(p) = 1/p - j\omega$ і виберемо за контур інтегрування l мале коло з центром у точці $p = j\omega$.

Останній інтеграл з (6.16) обчислюється за допомогою теореми про відрахування, що розглядається в теорії функцій комплексної перемінної. Дотримуючись цієї теореми, обчислюємо відрахування у точці $p = j\omega$, в результаті отримуємо:

$$u_3 = e^{j\omega\left(\frac{\beta}{c_1} - \frac{\beta_2}{c_2}\right)t} \left[1 - \frac{(\beta - \gamma\beta_2)^2}{\Delta(j\omega)} \left(1 - e^{2j\omega h \frac{\beta_2}{c_2}} \right) \right] e^{j\omega\left(t - \frac{\alpha}{c_1}x + \frac{\beta}{c_1}z\right)} \quad (6.19)$$

Враховуючи (6.18) припустимо, що $\beta_2 = -j|\beta_2|$, тоді з формули (6.19) знаходимо:

$$u_3 = e^{-\omega h \frac{|\beta_2|}{c_2}} A e^{j\omega\left[t - \frac{\alpha}{c_1}x + \frac{\beta}{c_1}(z+h)\right]}, \quad (6.20)$$

де

$$A = 1 - \frac{(\beta + j\gamma|\beta_2|)^2 \left(1 - e^{2\omega h \frac{|\beta_2|}{c_2}}\right)}{(\beta + j\gamma|\beta_2|)^2 - (\beta - j\gamma|\beta_2|)^2 e^{2\omega h \frac{|\beta_2|}{c_2}}}$$

Розглянемо величину u_3/u_0 , яка характеризує ступінь екранізації падаючого збурення, і назвемо її коефіцієнтом екранізації k_e :

$$k_e = \frac{u_3}{u_0} = A e^{\omega h \left(j \frac{\beta}{c_1} - \frac{|\beta_2|}{c_2}\right)}. \quad (6.21)$$

Як приклад, на рис. 6.4 наведена залежність коефіцієнта екранізації k_e від товщини прошарку h при наступних значеннях параметрів: $\varphi = 0$, $\gamma = 3$, $C_1 = 600$ м/с, при частоті 20 Гц (крива 1) та частоті 63 Гц (крива 2). На рис. 5.5 представлена залежність k_e від частоти падаючого збудження при $\varphi = 0$, $h = 1$ м, $\gamma = 3$, $C_1 = 600$ м/с. З цього рисунку видно, що екран, який розглядається, є хорошим фільтром для збуджень з частотою, яка з часом зростає. На рис. 5.6 побудовані криві залежностей коефіцієнта екранізації від параметра $\gamma = \frac{C_1}{C_2}$ ($C_1 > C_2$). Крива 1 побудована для параметрів $\omega = 20$ Гц, $C_1 = 600$ м/с, $h = 1$ м, крива 2 – $\omega = 63$ Гц, $h = 1$ м, $C_1 = 600$ м/с. Аналіз цих кривих свідчить про існування впливу на коефіцієнт екранізації частоти падіння збудження.

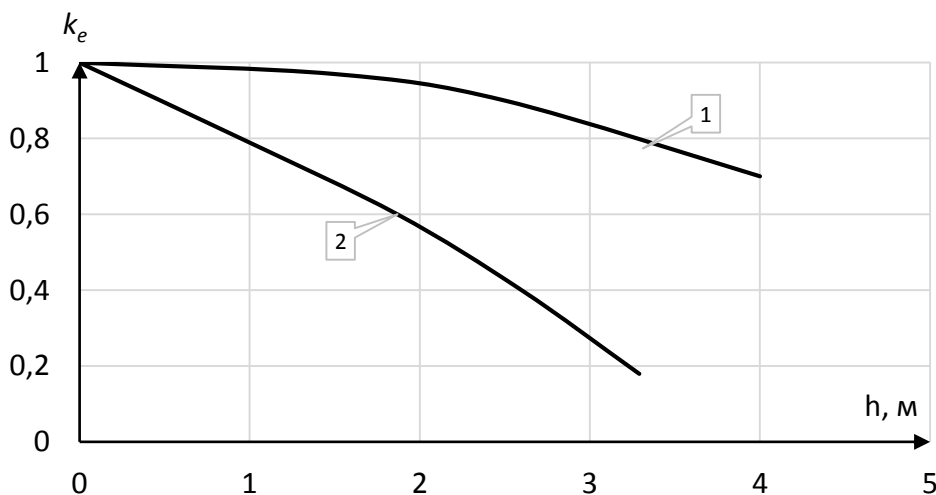


Рис. 6.4. Залежність коефіцієнта екранізації k_e від товщини прошарку h

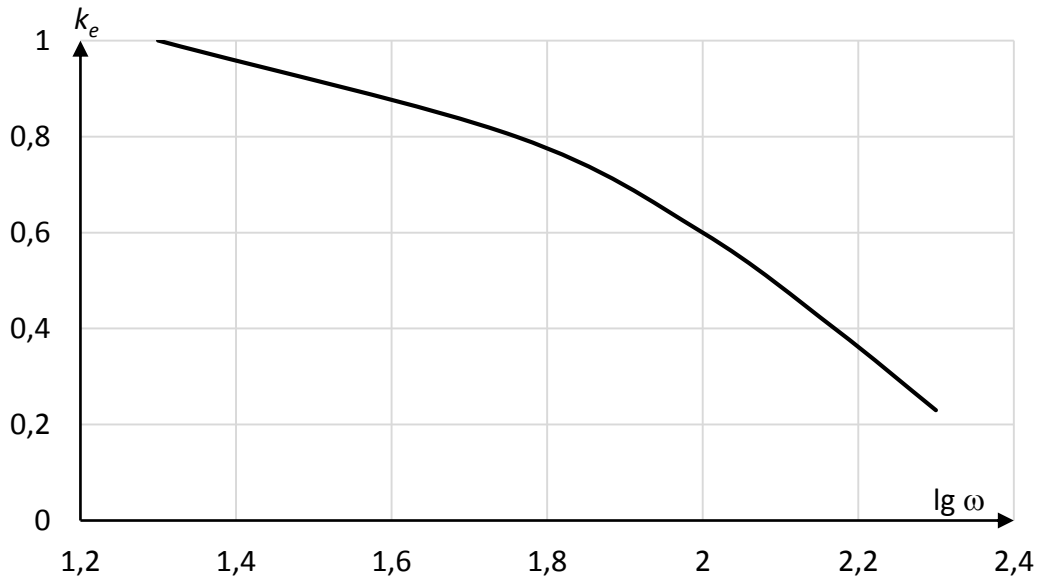


Рис. 6.5. Залежність коефіцієнту екранізації k_e від частоти падаючого збудження

Таким чином, отримана формула (6.21) дозволяє при відповідній комбінації параметрів γ , h , ω розрахувати екрануючу перешкоду, що забезпечує необхідний ступінь затухання падаючого вибухового збудження.

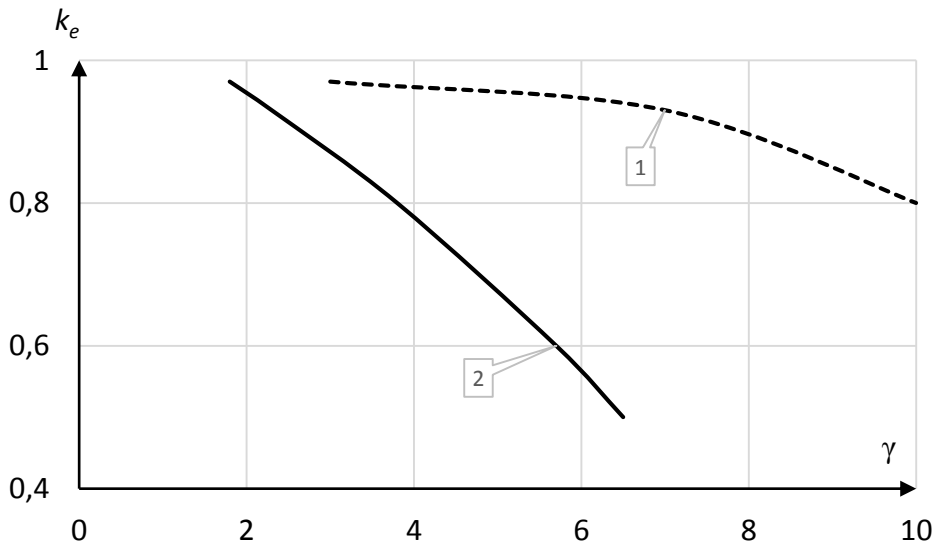


Рис. 6.6. Залежність коефіцієнту екранізації k_e від параметра γ

Передумовою до натурального дослідження дії сейсмозахисної перешкоди послужило теоретичне рішення задачі про поширення пружної нестационарної хвилі через прошарок із заданою товщиною h і швидкістю поширення хвилі в ній C_2 , викладене вище.

Метою експериментальних досліджень було визначення оптимальних параметрів перешкоди за умови отримання максимального коефіцієнта зниження інтенсивності коливання у хвилі за перешкодою та порівняння теоретичного коефіцієнта екранізації 6.21 з експериментальними.

Параметрами перешкоди є діаметр шурфів або те саме ширина перешкоди h , крок порожнин у ряді перешкоди b , її довжина l і глибина H .

На рис. 6.7 наведено графік залежності зміни швидкості зміщення частинок ґрунту в поверхневій хвилі від відстані та впливу штучної перешкоди. Заряд тротилу масою 5 кг розташований у свердловині глибиною 2 м. Штучна перешкода глибиною 3 м, довжиною 22,5 м, і з кроком між порожнинами 2 м знаходилася за 25 м ($R_0 = 15$) від осі заряду ВР. Профіль вимірювання охоплював діапазон відстаней 5 – 65 м та встановлювався за однопроменевою схемою розміщення датчиків.

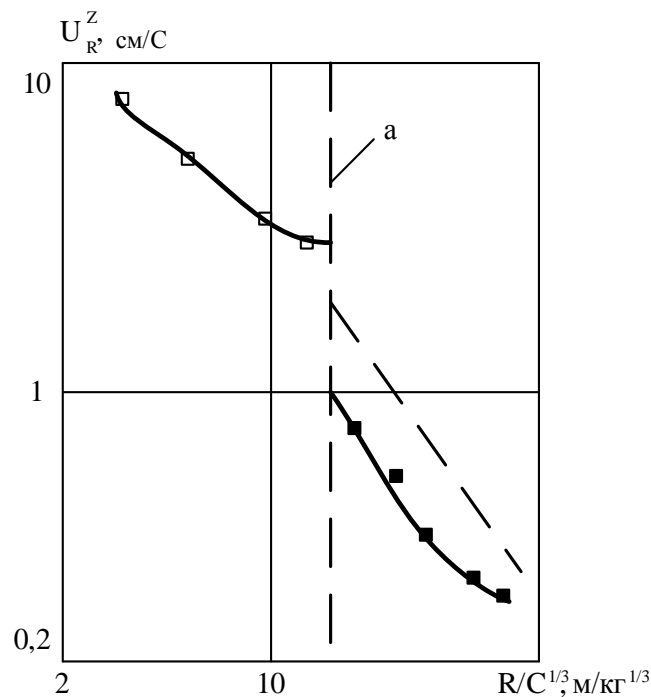


Рис. 6.7. Залежність зміни швидкості зміщення частинок ґрунту в поверхневій хвилі від відстані та впливу штучної перешкоди.

Як видно із рис. 6.7, перед перешкодою і за нею виразно проявляються два компоненти на інтенсивність вибухових хвиль штучної перешкоди – як зниження її інтенсивності за рахунок наявності шурфів, так і збільшення в процесі проходження по зоні залишкових деформацій ґрунтів, утвореної при

влаштуванні перешкоди вибуховим методом. При підході хвилі до цієї зони масова швидкість частинок у ній зростає, а після проходження перешкоди зменшується, досягаючи мінімального коефіцієнта екранізації $k_e = 0,35$ і далі поступово наближається до значень параметрів хвилі контрольного вибуху (пунктирна крива). Область рівновеликих значень швидкостей аналізованого та контрольного вибухів перебуває на відносній відстані $R_0 = 50$, тобто, розмір «тіні» за перешкодою становить 55 м або 2,5 l .

Як показали експерименти, розміри «тіні» (зони дії штучної перешкоди) залежать від розмірів перешкоди по фронту та вглиб масиву, а також від потужності вибуху, оскільки з останнім пов'язана величина періоду коливань, тобто довжина хвилі.

Аналіз наведених залежностей ще раз підтверджує в кількісному відношенні протяжність зони дії перешкоди, яка у всіх наших численних дослідях дорівнювала приблизно 2,5 l .

При вивченні дії штучних перешкод на параметри сейсмовибухових хвиль встановлено, що період коливань у приходній хвилі, діаметр шурфів у перешкоді та ефективність останньої пов'язані між собою. Зменшення періоду коливань, тобто довжини хвилі при незмінних параметрах перешкоди призводить до зменшення коефіцієнта екранізації k_e відповідно до наступної залежності

$$k_e = B \left(\frac{h}{\lambda} \right)^n, \quad (6.22)$$

де B, n – коефіцієнти, які характеризують ґрунтові умови.

Для лесоподібного суглинку маємо $B = 0,2$, $n = 0,22$. На рис. 6.8 наведено залежності коефіцієнта екранізації від параметра h/λ , побудовані за допомогою теоретичної формули 6.21 (крива 2), та формули 6.22 (крива 1).

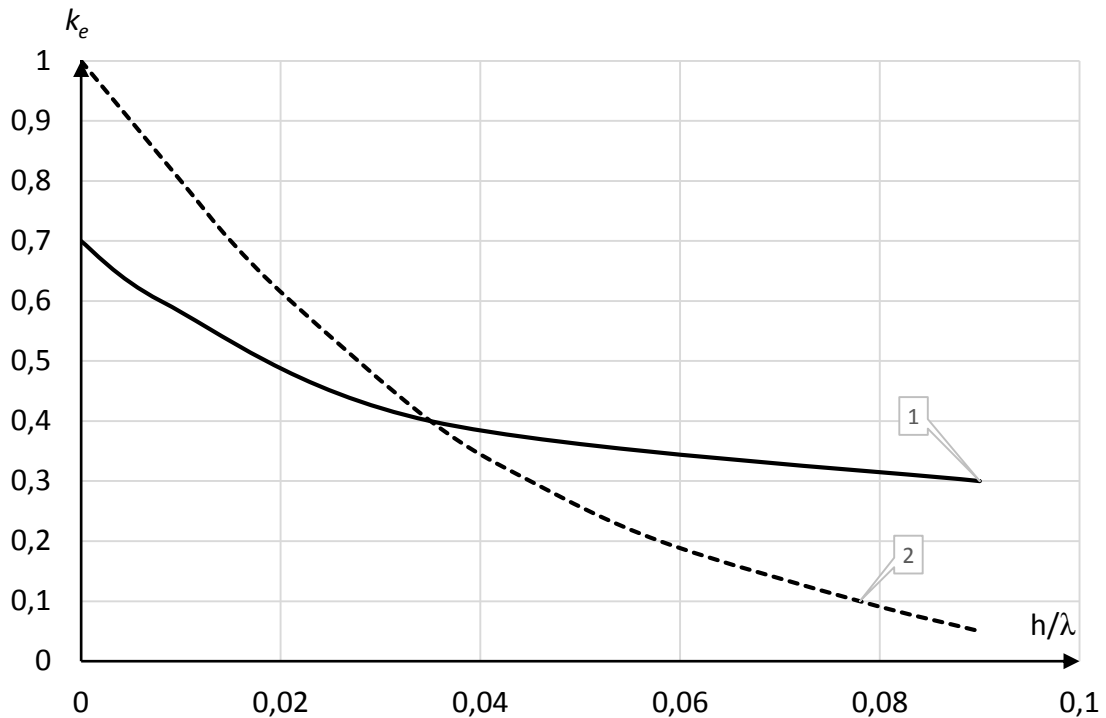


Рис. 6.8. Залежність коефіцієнта екранізації k_e від параметра h/λ

Порівняння цих кривих підтверджує придатність аналітичного методу розрахунку сейсμοзахисних перешкод.

Відомо з літературних даних [124, 125] та наших досліджень, що період коливань залежить від маси заряду, відцентрової відстані та ґрунтових умов. Використовуючи ці залежності і формулу (6.22), можна вибрати оптимальний діаметр шурфів у перешкоді для забезпечення стійкості об'єкта, що охороняється.

Оптимальними розмірами кроку між свердловинами при влаштуванні перешкоди перед зарядом є величина $3h$, а перед об'єктом, який охороняється, ця величина становить $- 5,5 h$.

При визначенні глибини шурфів перешкоди слід враховувати особливості поширення об'ємних та поверхневих хвиль у масиві ґрунту зі збільшенням глибини та проходження різних хвиль через перешкоду.

Дослідження розповсюдження вибухових хвиль усередині масиву ґрунту [125] показали інтенсивне затухання поверхневих хвиль зі збільшенням глибини та зменшенням амплітуд коливань в об'ємній хвилі при

віддаленні вільної поверхні, так як амплітуди коливань ґрунту в об'ємній хвилі на виході останньої на вільну поверхню досягнені відмітки приблизно $H \approx 0,05\lambda$, збільшуються в 2 рази.

Коли основну небезпеку для об'єктів, що охороняються, становлять поверхневі хвилі, глибина перешкоди вибираються такою, щоб інтенсивність коливань у хвилі на цій глибині не становила ніякої небезпеки для охоронних об'єктів. Вказаний розрахунок інтенсивності поверхневої хвилі може бути виконаний за формулою 5.22, беручи до уваги той факт, що масові швидкості у хвилі на відповідних глибинах зменшуватимуться пропорційно до зсувів [125], знаходимо:

$$\frac{u_z(H)}{u_z(0)} = 1,34e^{-2,0H/\lambda} - 0,34e^{-5,95H/\lambda}; \quad (6.23)$$
$$\frac{u_x(H)}{u_x(0)} = 0,42e^{-2,0H/\lambda} - 2,02e^{-5,95H/\lambda},$$

де λ – довжина хвилі, а ґрунтові умови – лесоподібний суглинок.

Слід зазначити ще й те що, що у поверхневій хвилі більш інтенсивно згасає X – складова, найнебезпечніша для будинків і споруд, тобто є можливість за рахунок незначних порівняно глибин перешкод зменшити інтенсивність у хвилі.

Для зменшення інтенсивності об'ємних хвиль шляхом створення штучних перешкод, на нашу думку, найефективнішим заходом є не так глибина перешкоди, як її нахил, тобто створення похилої перешкоди безпосередньо біля охоронного об'єкт, з тим розрахунком, щоби об'єкт потрапляв у зону «геометричної тіні».

Таким чином, проведені експерименти показали високу ефективність застосування штучної перешкоди для гасіння інтенсивності вибухових хвиль.

6.3. Дія вибуху групових свердловинних зарядів

У практиці технологія підривання групи циліндричних зарядів у м'яких гірських породах може бути застосована для отримання вертикальних екранних щілин, ущільнення значної потужності нестійкого ґрунтового масиву під забудову, при розмінуванні пересіченої місцевості, ущільнення

структурно-нестійких ґрунтів злітних смуг на польових аеродромах та інших робіт.

Дослідження від дії вибуху поодинокого циліндричного заряду у ґрунтах присвячено ряд робіт О.О. Вовка, Г.І. Чорного, А.Г. Смірнова та ін. [35, 55, 88, 113, 125], де показано, що руйнування зав'язків міцності ґрунту і його ущільнення визначаються такими параметрами вибухової хвилі, як величиною напруження, швидкістю зміни напружень, тривалістю дії імпульсу напружень.

Механізм формування полів напружень при дії системи циліндричних зарядів у ґрунтах вивчено недостатньо. Тому розглянемо критерій формування плоского фронту та визначимо поле напружень при дії групи циліндричних зарядів.

Для вивчення формування плоского фронту досить розглянути вибух двох циліндричних зарядів (рис. 6.9). Задача полягає в тому, щоб за заданою сіткою розташування свердловинних зарядів /а/ визначити відстань /R/, на якій сумарний фронт від циліндричних зарядів буде плоским, тобто необхідно визначити відстань R, на якій площа фігури ABC буде мінімальною. Для цього знайдемо рішення трансцендентного рівняння (табл. 6.1).

$$\frac{a}{2R} = \arcsin \frac{a}{2R} \quad (y_1 = y_2)$$

Таблиця 6.1. Рішення трансцендентного рівняння

R	y₁	y₂	Δy = y₂ - y₁
$\frac{a}{2}$	1,0	1,57	0,57
$\frac{3a}{4}$	0,66	0,73	0,07
a	0,50	0,52	0,02
2a	0,25	0,25	0
3a	0,16	0,16	0
4a	0,12	0,12	0

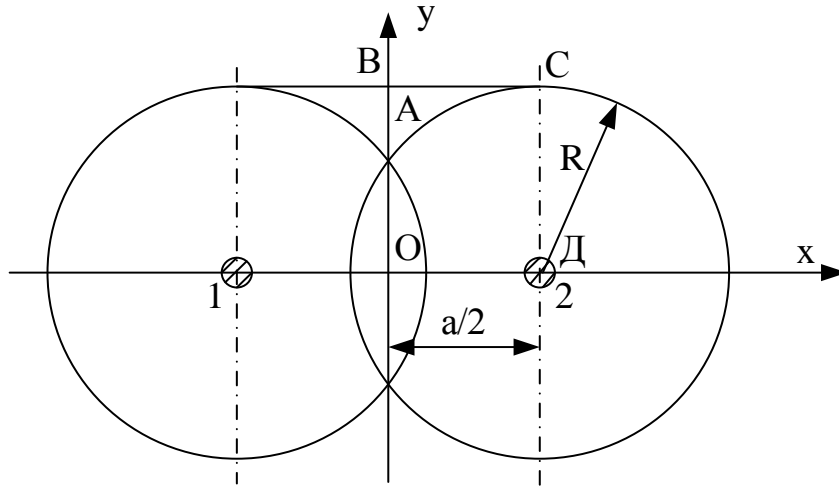


Рис. 6.9. Схема вибуху двох циліндричних зарядів

Позначимо площу фігури ABC через F , тоді:

$$F = F_{ABC} = F_{OB\text{C}D} - F_{O\text{A}C\text{D}}$$

$$F_{OB\text{C}D} = R \frac{a}{2};$$

$$F_{O\text{A}C\text{D}} = \int_0^{a/2} \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} dx =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\left(x - \frac{a}{2}\right) \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} + R^2 \arcsin \frac{x - \frac{a}{2}}{R} \right] \Big|_0^{a/2} =$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{a}{2} \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}} + R^2 \arcsin \frac{a}{2R} \right).$$

$$F_{ABC} = \frac{aR}{2} - \frac{a \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}}{4} - \frac{R^2}{4} \arcsin \frac{a}{2R}.$$

Знайдемо мінімум функції $F = F(a, R)$ відносно змінної R . Для цього визначимо:

$$\frac{dF}{dR} = \frac{a}{2} - \frac{a}{8} \left(R^2 - \frac{a^2}{4}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2R - \frac{2R}{2} \arcsin \frac{a}{2R} - \frac{R^2}{2} \frac{1}{\left(1 - \frac{a^2}{4R^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \left(-\frac{a}{2}\right) R^{-2}$$

$$= 0.$$

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$\frac{dF}{dR} = \frac{dF}{dR} - R \arcsin \frac{a}{2R} = 0, \quad (6.24)$$

або

$$\frac{a}{2R} = \arcsin \frac{a}{2R}.$$

Рівняння (6.24) вирішується графічно.

Для цього в системі координат (y, R) будуюмо криві $y_1 = \frac{a}{2R}$ і $y_2 = \arcsin \frac{a}{2R}$ (рис. 6.10). Перетин цих двох кривих дає рішення трансцендентного рівняння (6.24): $R = 2a$.

Доведемо, що при $R = 2a$ площа F мінімальна. Для цього визначимо у точці $R = 2a$ другу похідну:

$$\frac{d^2F}{dR^2} = \left(\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} - \arcsin \frac{a}{2R} \right) \Big|_{R=2a} = \frac{1}{\sqrt{15}} - 0,253 = 0,005 > 0,$$

що доводить існування мінімуму у цій точці.

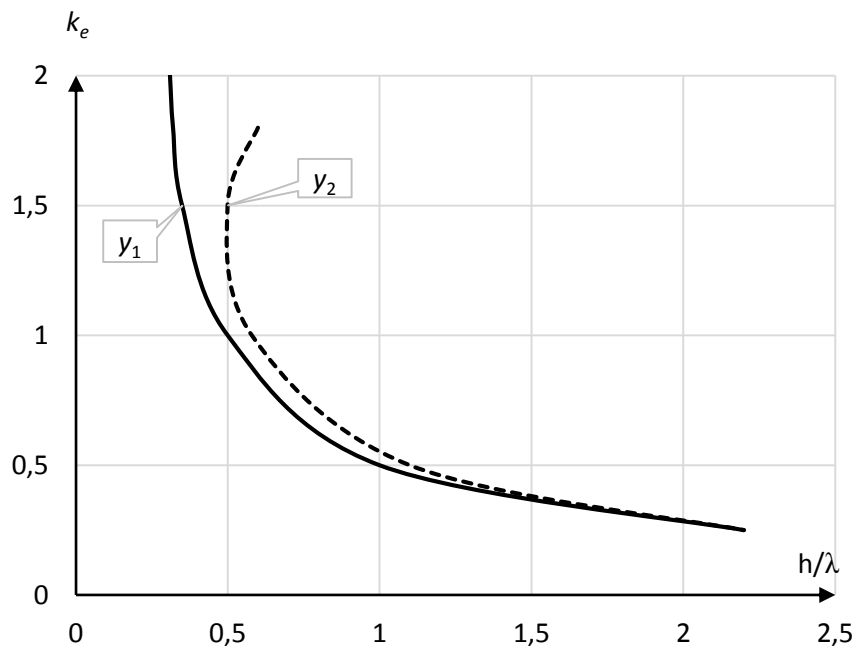


Рис. 6.10. Рішення трансцендентного рівняння 6.24

Відмітимо, що графічне зображення рівняння (6.24) дозволяє спостерігати динаміку формування плоского фронту та оцінити відмінність реального фронту вибухової хвилі від плоского фронту на близьких відстанях. Так, у точці $R = 0,75a$ ця відмінність становить 7% (табл. 6.1), у

точці $R = a - 2\%$. Таким чином, у практичних розрахунках можна взяти $R = 0,65 \div 0,85a$.

Наведемо експериментальні дані перевірки критерію формування плоского фронту. На рис. 6.11 – 6.13 наведені криві залежності зміщення ґрунту від відстані при вибухах двох, трьох і чотирьох циліндричних зарядів, розташованих на поверхні котловану площею 1 м^2 з неущільненим лесовим ґрунтом ($\gamma_{\text{ск}} = (1,37 \div 1,42) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, об'ємна вологість 11,0-15%, середня щільність ґрунту $p = 1,48 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

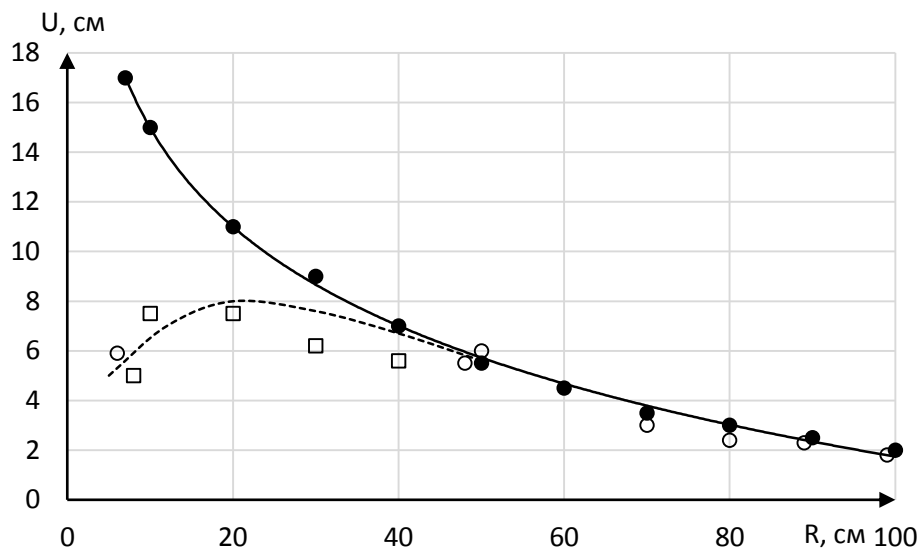


Рис. 6.11. Залежність зміщення ґрунту від відстані при вибуху двох циліндричних зарядів

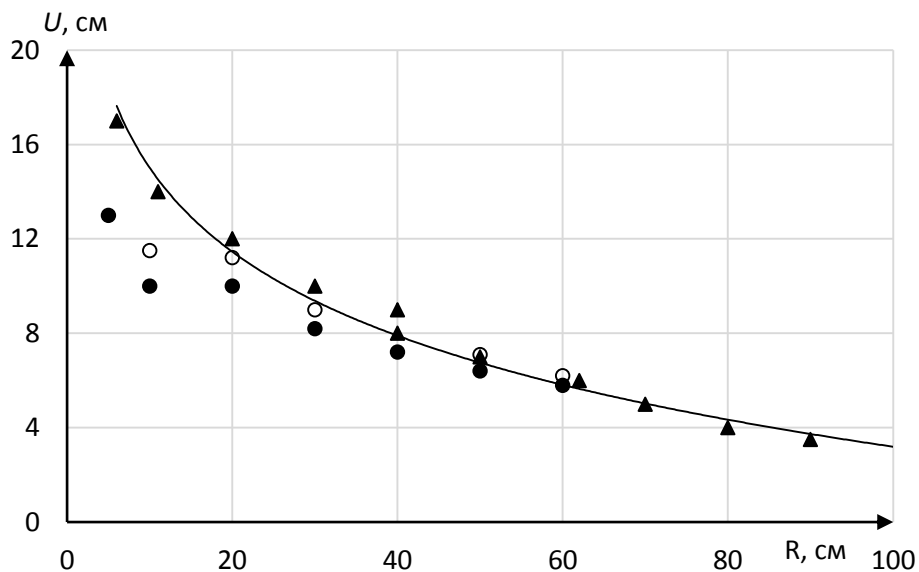


Рис. 6.12. Залежність зміщення ґрунту від відстані при вибуху трьох циліндричних зарядів

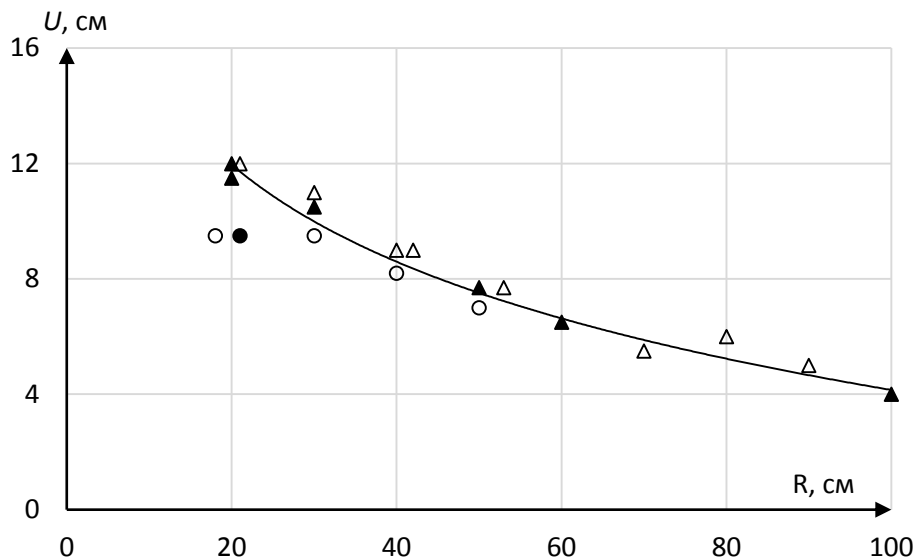


Рис. 6.13. Залежність зміщення ґрунту від відстані при вибуху чотирьох циліндричних зарядів

У випадку для двох зарядів відстань між ними становила 0,5 м, для трьох і чотирьох зарядів – 0,25 м. Потім заряди засипалися шаром забивки товщиною 0,4 – 0,5 м, яка забезпечує камуфлетну дію вибуху за вибуховою хвилею. Сумарна маса заряду ВР у кожному з дослідів аналогічна, як і у випадку для плоского заряду і становила 0,6 кг/м². Зміщення шарів ґрунту фіксувалися металевими пластинками шляхом встановлення їх у котловані, засипки та розкопування після вибуху. Експериментальні точки у вигляді заштрихованих кружків відповідають зміщенню під першим від краю зарядом, трикутники – під другим, квадрати – між стінкою котловану та першим зарядом, незаштриховані кружки – між першим та другим зарядами.

З графіків випливає, що при вибуху двох зарядів в області глибиною до 0,40 м зміщення ґрунту неоднорідне, а саме під зарядами воно більше, ніж між ними. На великих відстанях зміщення ґрунту вирівнюються по всьому фронту вибухової хвилі. Таким чином, на відстані приблизно 0,4 м система двох циліндричних зарядів діє як плоский заряд. Згідно з наведеним вище критерієм, відмінність реального фронту від плоского на цій відстані становить 5%. При трьох і чотирьох циліндричних зарядах зміщення ґрунту практично однорідне по всьому поперечному перерізу котловану на всіх глибинах.

Зазначимо, що Покровським Г.І. [126] іншим методом було отримано співвідношення $a = 1,57R$ або $R = 0,64a$, при якому дія двох циліндричних зарядів може розглядатися як суцільний плоский заряд. За нашими даними, відмінність від плоского фронту в цьому випадку становить 11%, що цілком припустимо з точки зору практичного застосування.

В основу розрахунку поля напружень, яке виникає при дії вибуху групи циліндричних зарядів, взято принцип суперпозиції. Це означає, що напружений стан у довільній точці ґрунтового масиву визначається геометрично додаванням відомих компонент вектору напружень від одиночного циліндричного заряду як функції від відстані до осі відповідного заряду та від часу.

Нехай у масиві ґрунту діє n циліндричних зарядів, розташованих один від одного на відстані a (рис. 6.14). Розглянемо загальний випадок, коли заряди підриваються послідовно з інтервалом уповільнення $t_{Hi} = (i - 1)a / C_0$, де C_0 – швидкість розповсюдження збуджень у ґрунті. У випадку миттєвого підривання $t_{Hi} = 0$.

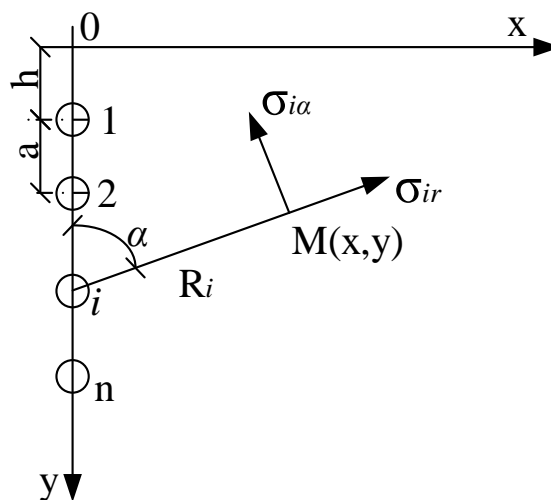


Рис. 6.14. Розрахункова схема визначення поля напружень від взаємодії системи циліндричних зарядів

Необхідно визначити поле напружень, створене підриванням системи зарядів, у довільній точці $M(x, y)$ ґрунтового масиву.

При дії циліндричного заряду генерується хвиля напруження, радіальну складову якої можна описати аналітично у вигляді:

$$\sigma_r(R, t) = \sigma_r^m(R) \exp[-\theta(t - t_m)] \frac{\sin\beta(t-t_0)}{\sin\beta(t_m-t_0)}. \quad (6.25)$$

Тангенціальна складова напруження знаходиться в наступній залежності від радіальної:

$$\sigma_\alpha(R, t) = k_\tau \sigma_r(R, t). \quad (6.26)$$

Оскільки в нашому випадку функція напруження не залежить від кута, то складова $\tau_{r\alpha} = 0$.

У формулі (6.25) прийнято наступні позначення. Коефіцієнт σ_r^m означає максимальну амплітуду хвилі напруження. Згідно з експериментальними даними він змінюється з відстанню за наступним законом:

$$\sigma_r^m = k_\sigma R_0^{-\mu\sigma} \quad (6.27)$$

де $R_0 = R/r_3$ – безрозмірна відстань, r_3 – радіус заряду (для циліндричного заряду $r_3 = 0,014\sqrt{C_0}$). Аналогічно для тангенціальної складової була отримана залежність

$$\sigma_\alpha^m = k R_0^{-\mu\sigma}. \quad (6.28)$$

Коефіцієнт θ характеризує крутість зростання та спаду амплітуди напруження у часі:

$$\theta r_3 = a_1 + a_2 R_0, \frac{M}{C}. \quad (6.29)$$

Час приходу початку збудження на цю точку визначається за формулою:

$$\frac{t_0}{r_3} = b_1 + b_2 R_0, \frac{C}{M}. \quad (6.30)$$

Час зростання амплітуди напруження до максимального значення визначається за формулою:

$$\frac{t_0}{r_3} = d_1 R_0^{d_2}, \frac{C}{M}. \quad (6.31)$$

Коефіцієнт $\beta = \pi/\tau$ характеризує тривалість позитивної фази напруження:

$$\beta r_3 = f_1 + f_2 R_0, \frac{M}{C}. \quad (6.32)$$

Визначимо результуючу напруження у точці $M(x, y)$ при дії n зарядів. Для цього скористаємося формулами перетворення, записаними для i -го заряду з урахуванням того, що $\tau_{ir\alpha} = 0$:

$$\begin{aligned}\sigma_{ix} &= \sigma_{ir} \cos^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \sin^2 \alpha_i, \\ \sigma_{iy} &= \sigma_{ir} \sin^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \cos^2 \alpha_i, \\ \tau_{ixy} &= (\sigma_{ir} - \sigma_{i\alpha}) \sin \alpha_i \cos \alpha_i,\end{aligned}\tag{6.33}$$

де α_i – кут між віссю OX та радіальним напрямком від i -го заряду до точки $M(x, y)$;

$$\sin \alpha_i = \frac{y-h-(i-1)a}{R_i}, \cos \alpha_i = \frac{x}{R_i};\tag{6.34}$$

$R_i = \sqrt{x^2 + [y - h - (i - 1)a]^2}$ – відстань від центру заряду до точки M .

При дії вибуху n зарядів сумарне поле напружень визначається за наступними формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} \cos^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \sin^2 \alpha_i), \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} \sin^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \cos^2 \alpha_i), \\ \tau_{xy} &= \sum_{i=1}^n ((\sigma_{ir} - \sigma_{i\alpha}) \sin \alpha_i \cos \alpha_i).\end{aligned}\tag{6.35}$$

Беручи до уваги (6.25), (6.27), (6.28), (6.34) та підставляючи їх у (6.35), отримаємо розрахункові формули для складових сумарної хвилі напруження:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sum_{i=1}^n k_\sigma R_{0i}^{-\mu\sigma} \exp[-\theta_i(t - t_{mi})] \frac{\sin \beta_i(t - t_{0i})}{\sin \beta_i(t_{mi} - t_{0i})} \left[\frac{x^2}{R_i^2} + k_\tau \frac{[h + (i - 1)a - y]^2}{R_i^2} \right], \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^n k_\sigma R_{0i}^{-\mu\sigma} \exp[-\theta_i(t - t_{mi})] \frac{\sin \beta_i(t - t_{0i})}{\sin \beta_i(t_{mi} - t_{0i})} \left[\frac{[h + (i - 1)a - y]^2}{R_i^2} + k_\tau \frac{x^2}{R_i^2} \right], \\ \tau_{xy} &= \sum_{i=1}^n (1 - k_\tau) k_\sigma R_{0i}^{-\mu\sigma} \exp[-\theta_i(t - t_{mi})] \frac{\sin \beta_i(t - t_{0i})}{\sin \beta_i(t_{mi} - t_{0i})} \frac{[y - h - (i - 1)a]x}{R_i^2}.\end{aligned}\tag{3.36}$$

Розглянемо дію n рівних за масою зарядів. У цьому випадку параметри, що входять до формул (6.36) $\theta_i, t_{0i}, t_{mi}, \beta_i$ будуть відповідно однакові і описуються формулами (6.29)–(6.32).

Для визначення вищенаведених параметрів було проведено дослідження з вивчення дії поодинокого циліндричного заряду з погонною масою $Q_{\text{пог}}=0,05$ кг/пог.м ($r_3 = 0,003$ м).

В результаті експериментальних досліджень у діапазоні відстаней від $60 r_3$ до $140 r_3$ були отримані наступні значення для коефіцієнтів, що входять у формули (6.29)–(6.32):

$$\begin{aligned} a_1 &= 5,75; a_2 = -0,036; \frac{\text{М}}{\text{с}}; \\ b_1 &= -0,3; b_2 = 8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{с}}{\text{м}}; \\ d_1 &= 2,2 \cdot 10^{-4}; d_2 = 1,81 \frac{\text{с}}{\text{м}}; \\ f_1 &= 1,53; f_2 = -6,4 \cdot 10^{-3}; \frac{\text{М}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Для коефіцієнтів, що входять у формули (6.27) та (6.28), були отримані значення: $k_\sigma = 10$ ГПа; $k = 3,8$ ГПа; $k_\tau = 0,38$; $\mu_\sigma = 2,17$.

Друга серія дослідів проводилася для перевірки розрахункових залежностей (6.36) при дії двох циліндричних зарядів $Q_1 = Q_2 = 0,05$ кг/пог.м.

В результаті проведених дослідів були отримані графічні залежності компонентів σ_x і σ_y у часі, які наведені на рис. 6.15 та рис. 6.16.

Для порівняння на цих же графіках нанесені компоненти σ_x і σ_y , розраховані за формулою (6.36). Порівняння цих кривих дозволяє зробити висновок про виконання принципу суперпозиції для хвиль напружень і тим самим про придатність подальших розрахункових залежностей (6.36) для визначення поля напружень у довільній точці масиву ґрунту.

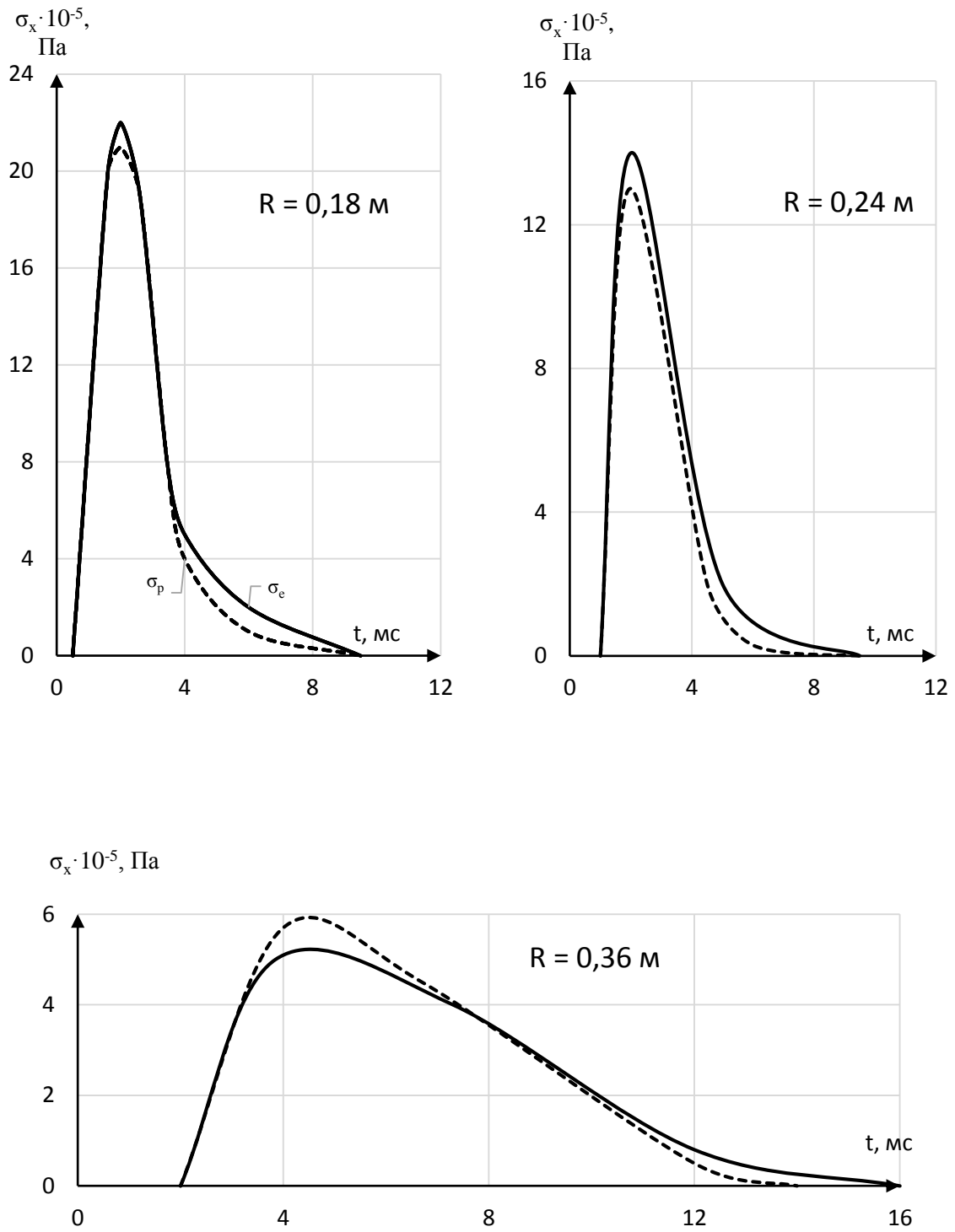


Рис. 6.15. Залежність σ_x складової хвилі напруження у часі на різних відстанях від заряду

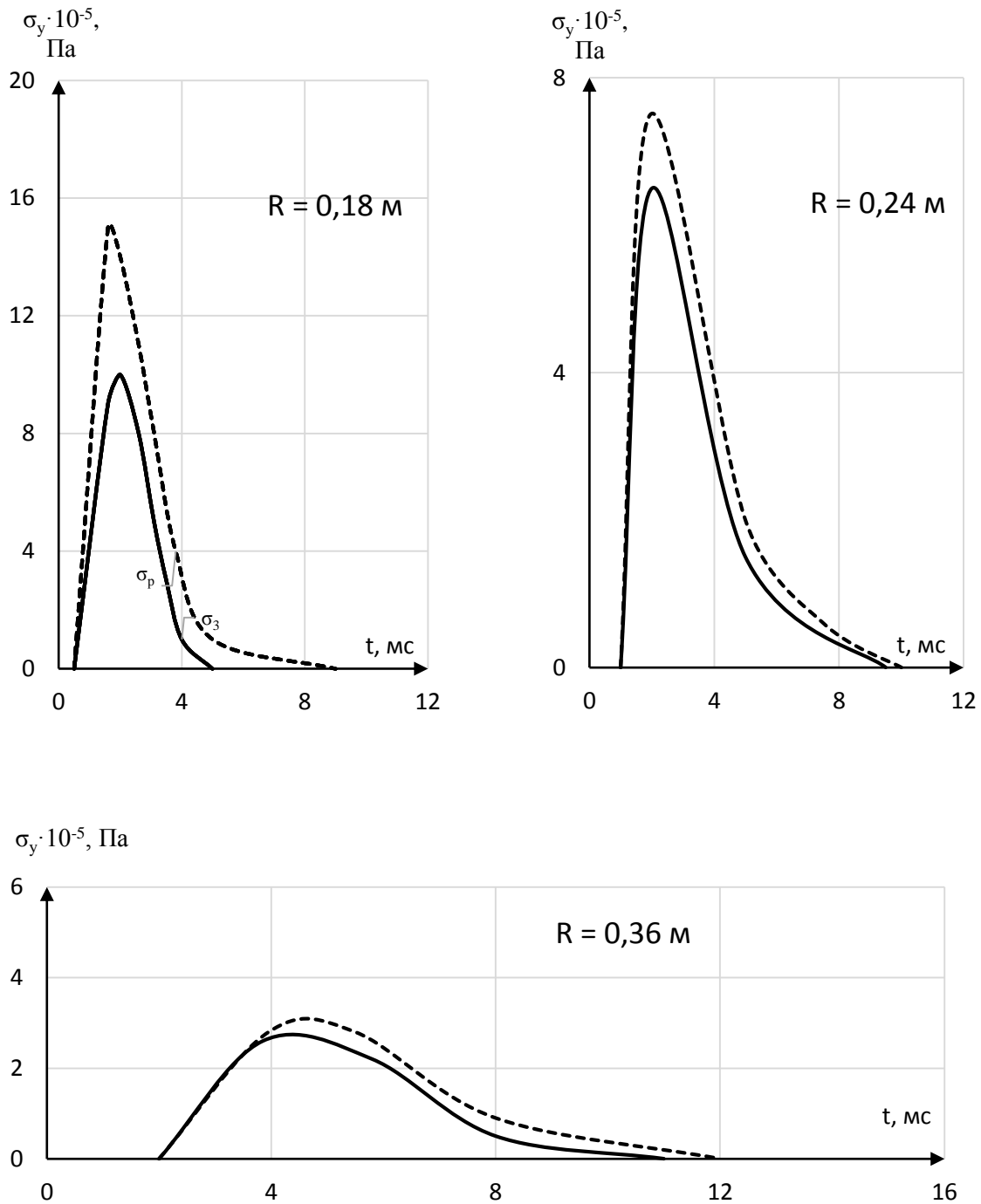


Рис. 6.16. Залежність σ_y складової хвилі напруження у часі на різних відстанях від заряду

Далі необхідно визначити вплив кількості зарядів у групі на формування поля напружень у цій точці. Експериментально вдалося встановити, як це видно з рис. 6.17, 6.18, що в на відстані у межах $R \geq 0,42 \text{ м}$ формування поля напруження як компонентом x , так і компонентом y визначається в основному двома сусідніми зарядами.

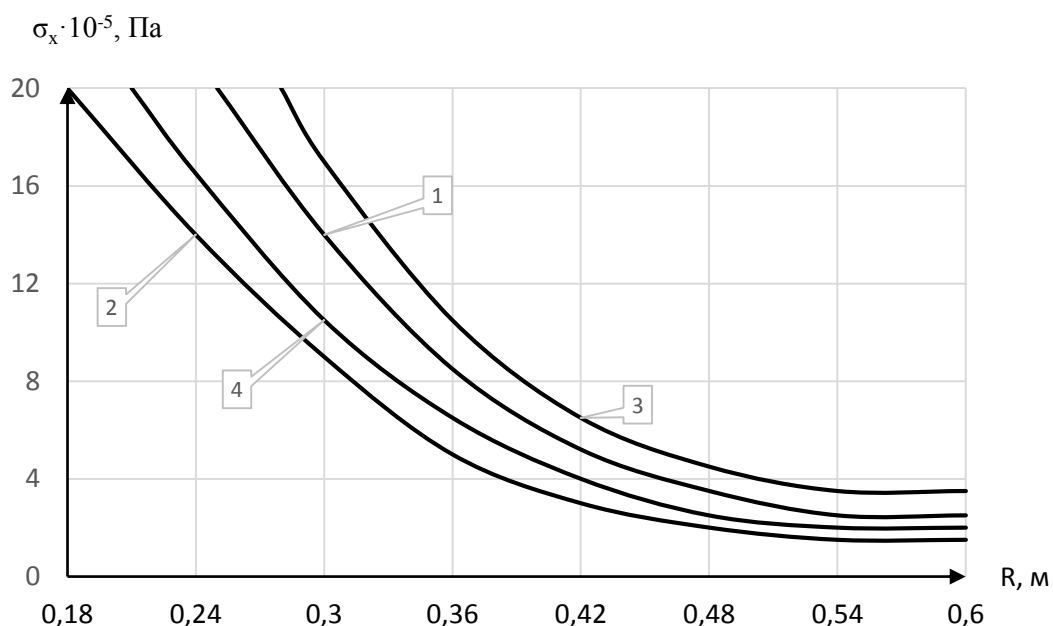


Рис. 6.17. Залежність σ_x складової хвилі напруження на різних відстанях від заряду: 1 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 8 ниток ДШ, 2 – для 2 циліндричних зарядів, 3 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 16 ниток ДШ, 4 – для 4 циліндричних зарядів.

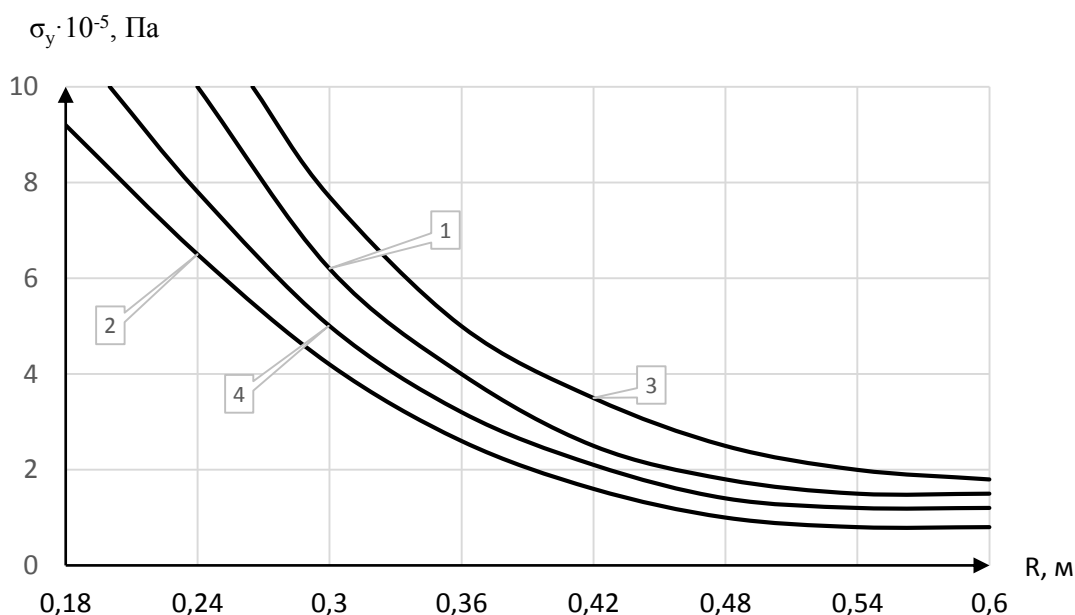


Рис. 6.18. Залежність σ_y складової хвилі напруження у часі на різних відстанях від заряду: 1 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 8 ниток ДШ, 2 – для 2 циліндричних зарядів, 3 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 16 ниток ДШ, 4 – для 4 циліндричних зарядів.

На рис. 6.17, 6.18 наведені криві змінення максимальних σ_x і σ_y напружень на відстані для системи 2-х та 4-х циліндричних зарядів (криві 2 і 4 відповідно). Кожен заряд складається з 4 ниток ДШ, довжина заряду 1,1 м. З аналізу побудованих графіків видно, що на відстанях $R > 0,42$ м практично відсутній вплив кількості зарядів у групі на поле напружень. Це говорить про те, що при формуванні поля напружень на цих відстанях беруть участь, в основному, два сусідні заряди. Для порівняння на графіках (рис. 6.17, 6.18) нанесені криві формування поля напружень відповідно для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 8 ниток ДШ (крива 1) і 16 ниток ДШ (крива 3). Порівняння кривих 1 і 2, 3 і 4 свідчать про те, що розподіл маси заряду в групі призводить до зниження напруження у ближній зоні дії заряду ВР, а на відстанях $R \geq 0,42$ м ця закономірність зменшується.

Проте, застосування групових зарядів, як свідчать графіки, що наведені на рисунках 6.19 і 6.20, дозволяють збільшити тривалість впливу хвилі напруження (криві 2 і 4 для групи 2 циліндричних зарядів і 4 циліндричних зарядів) на ущільнюючий масив. Цей ефект можна використати в технологічних схемах ущільнення структурно-нестійких ґрунтів за допомогою групових циліндричних зарядів ВР.

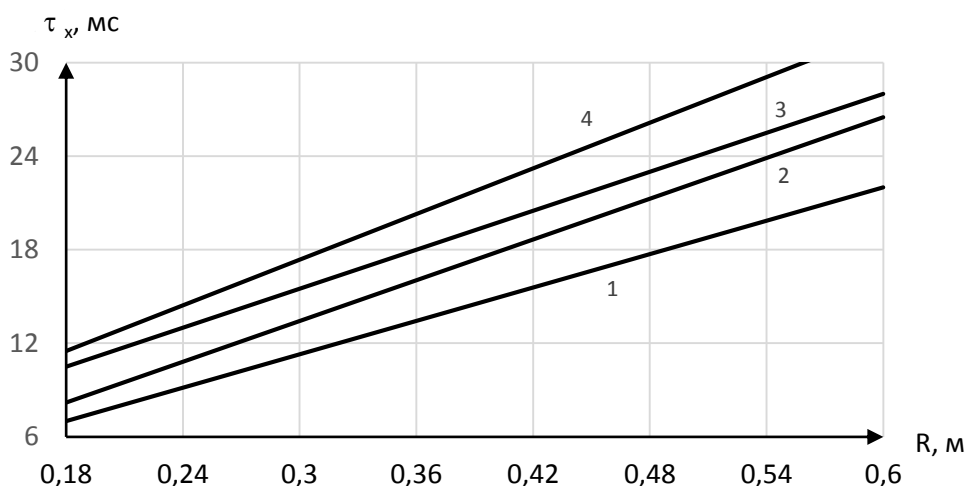


Рис. 6.19. Тривалість впливу σ_x складової хвилі напруження на різних відстанях від заряду: 1 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 8 ниток ДШ, 2 – для 2 циліндричних зарядів, 3 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 16 ниток ДШ, 4 – для 4 циліндричних зарядів.

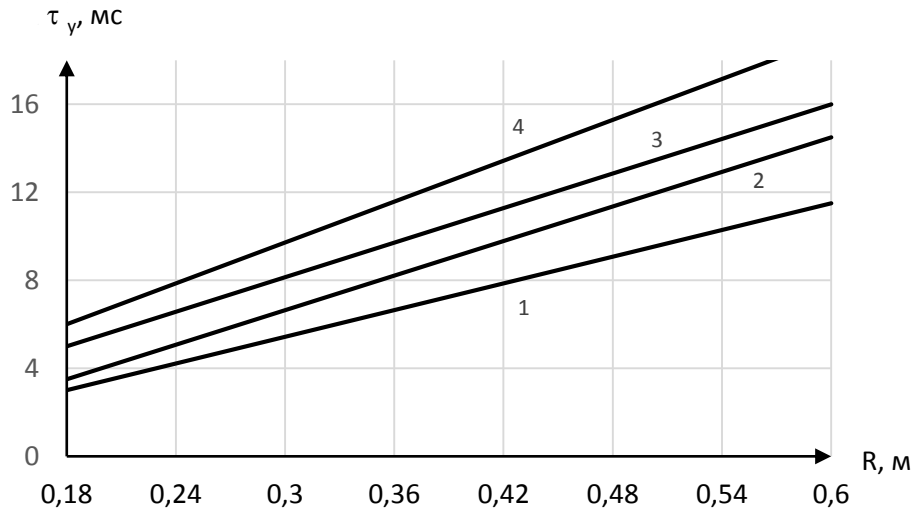


Рис. 6.20. Тривалість впливу σ_y складової хвилі напруження у часі на різних відстанях від заряду: 1 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 8 ниток ДШ, 2 – для 2 циліндричних зарядів, 3 – для поодинокого циліндричного заряду, який складається з 16 ниток ДШ, 4 – для 4 циліндричних зарядів.

Для визначення деформованого стану ґрунту при вибуху групи циліндричних зарядів скористаємося формулами, які пов'язують поле деформацій із результуючим зміщенням, яке виникає при дії групових зарядів:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u(R, t)}{\partial R}, \quad \varepsilon_\alpha = \frac{u(R, t)}{R}.$$

Результуюче зміщення визначається за формулою 6.3, де максимальне зміщення визначається за формулою 6.2. Для знаходження максимального зміщення з відстанню необхідно визначити коефіцієнти k та ν . З цією метою були проведені експериментальні дослідження щодо вимірювання поля зміщень при дії поодинокого циліндричного заряду з використанням реостатних датчиків зміщень.

В результаті обробки експериментальних даних було отримано залежність для визначення максимальної амплітуди зміщення частинок ґрунту з відстанню, яка має вигляд:

$$u_m = 8,9 \cdot 10^3 \left(\frac{R}{r_3} \right)^{-1,34}, \text{ мм.}$$

При ущільненні структурно-нестійких ґрунтів доцільно застосовувати технологічну схему виконання вибухових робіт із застосуванням короткоуповільненого підривання з інтервалом уповільнення

$$t_{\text{ксп}} = \frac{a}{D}$$

Отже, за допомогою розглянутих методів керування вибуховим імпульсом при ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів досягнуто наступних результатів. Отримано формулу для визначення коефіцієнта зменшення сейсмічного ефекту при короткоуповільненому підриванні. Запропоновано застосування екранованих прошарків при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів, за допомогою якого можна суттєво знизити сейсмічний ефект. Теоретично та експериментально розглянуто вплив від дії групи циліндричних зарядів. Отримано формулу для визначення поля напружень від вибухової дії групи зарядів на ґрунтовий масив. Запропоновано метод розрахунку сейсмозахисних перешкод та отримана формула для визначення коефіцієнта екранування. Сформульовано критерій формування плоского фронту вибухової хвилі при дії вибуху групи циліндричних зарядів.

Розділ 7. ЛАБОРАТОРНІ І ПОЛІГОННІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ ВДОСКОНАЛЕНИМИ МАЛОЩІЛЬНИМИ ВИБУХОВИМИ РЕЧОВИНАМИ

7.1. Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вдосконаленими малощільними вибуховими речовинами

Застосування енергії вибуху дозволяє повністю або частково усунути просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів на всю глибину просадної товщі.

При цьому прикладання зовнішнього навантаження до ґрунтового масиву створює об'ємну деформацію середовища та ущільнення ґрунту, головним чином, за рахунок зменшення пористого простору з пружною деформацією зерен скелету, їх взаємним переміщенням, деформацією і руйнуванням скелетних зв'язків.

Дослідження характеру деформування ґрунту під час вибуху на викид показали, що поряд із зоною викидання, в ґрунті існує зона руйнувань або утворення тріщин, що прилягає безпосередньо до межі порожнини, і наступна за нею зона ущільнення, що характеризується підвищеною щільністю ґрунту, яка простягається на відстань до 100 радіусів заряду в суглинках і 50 – 60 радіусів заряду в лесових ґрунтах [127, 128].

Вивчення ущільненої зони від дії камуфлетних зарядів, які застосовуються у вибухових технологіях з усунення просадних властивостей лесових ґрунтів, показало, що глибина цієї зони досягає 100 радіусів заряду, причому застосування низькошвидкісних (низькобризантних) ВР дає значний ефект [77].

Із застосуванням вищенаведеної рецептури (з практично нульовим кисневим балансом) безтритилової ВР (АС/СФ/АП) на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри (АП) був розроблений метод ущільнення просадкових ґрунтів [127]. Для удосконалення та наукового обґрунтування технологічних параметрів

методу був досліджений накладний заряд, який являє собою полімерний корпус прямокутної форми (товщиною 50, 75 і 100 мм.) запаяний з усіх боків, що забезпечує герметизацію внутрішньої порожнини корпусу. Всередині розміщена спінена суміш АС/СФ/АП (з нітрату амонію (NH_4NO_3), поверхнево-активної речовини і алюмінієвої пудри) та ініціюючого імпульсу у вигляді петлі з детонаційного шнура (ДШ) по формі корпусу і капсуля-детонатора, котрий остаточно приєднується на місцях виконання робіт безпосередньо перед використанням.

В польових умовах були проведені дослідження з визначення роботи таких накладних зарядів на основі малощільної ВР на спроможність її забезпечити ущільнення лесових ґрунтів (таблиці 7.1).

Результати досліджень показали, що застосування енергії вибуху накладних зарядів дозволяє повністю або частково усунути просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів на всю глибину просідання товщі. При цьому прикладання зовнішнього навантаження до ґрунтового масиву створює об'ємну деформацію середовища та ущільнення ґрунту, головним чином, за рахунок зменшення порового простору з пружною деформацією зерен скелету, їх взаємним переміщенням, деформацією і руйнуванням скелетних зв'язків.

Дослідження характеру деформування ґрунту під час вибуху накладних зарядів на спроможність їх забезпечити ущільнення структурно-нестійких ґрунтів показали, що в залежності від товщини шару спіненої суміші і форми полімерного корпусу, в ґрунті існує зона ущільнення, що характеризується підвищеною щільністю ґрунту, яка простягається по всій площі (формі полімерного корпусу) на глибину до 50 товщин шару спіненої суміші в суглинках і 20–30 в лесових ґрунтах.

При дослідженні в натуральних умовах малощільної спіненої вибухової суміші АС/СФ/АП для порівняння застосовувалися стандартні ВР, а саме: амоніт №6ЖВ і ігданіт АС/ДТ. Зосереджені заряди досліджуваних ВР масою 14–16 кг розміщувались в ґрунті на оптимальній глибині закладення, що становила 1,7–1,8 м.

Після підривання ВР вимірювалися параметри воронки і величина зони ущільнення. Потім в лабораторних умовах визначалась щільність ґрунту до і після вибуху за допомогою методу «ріжучого кільця». Результати експериментів наведені в таблиці 7.1.

Щільність ґрунту методом «ріжучого кільця» визначалась відношенням маси зразка ґрунту до його об'єму за ДСТУ Б В.2.1-17:2009. «Методи лабораторного визначення фізичних властивостей», який передбачає наступну послідовність.

Спочатку, попередньо виміряне (з точністю до 0,1 мм висота і внутрішній діаметр) за допомогою штангенциркуля і зважене, кільце-пробовідбірник змазують із внутрішньої сторони тонким шаром вазеліну або консистентного мастила. Потім вирівнюють верхню зачищену площину зразка ґрунту, зрізуючи надлишки ґрунту ножом, установлюють на ній ріжучий край кільця та гвинтовим пресом або вручну через насадку злегка вдавлюють кільце в ґрунт, фіксуючи межу зразка для випробувань. Потім ґрунт зовні кільця обрізають на глибину від 5 мм до 10 мм нижче ріжучого краю кільця, формуючи стовпчик діаметром на 1 мм або 2 мм більше ніж зовнішній діаметр кільця. Періодично, у міру зрізання ґрунту, легким натиском преса або насадки насаджують кільце на стовпчик ґрунту, не допускаючи перекосів. Після заповнення кільця ґрунт підрізають від 8 мм до 10 мм нижче ріжучого краю кільця й відокремлюють його.

Ґрунт, що виступає за краї кільця, підрізають ножом, зачищають поверхню ґрунту на рівні з краями кільця й закривають торці пластинками.

Потім зачищають поверхню ґрунту, накривають кільце пластинкою і підхоплюють його знизу пласкою лопаткою. Після чого кільце із ґрунтом і пластинками зважують. Щільність ґрунту ρ в грамах на кубічний сантиметр обчислюють за формулою:

$$\rho = \frac{m_1 + m_0 + m_2}{V} \quad (7.1)$$

де m_1 – маса ґрунту з кільцем і пластинками, г; m_0 – маса кільця, г; m_2 – маса пластинок, г; V – внутрішній об'єм кільця, см³.

Дослідження з визначення щільності ґрунту проводили паралельно для трьох відібраних зразків. Різниця між результатами трьох визначень не перевищувала 0,03-0,04 г/см³.

Таблиця 7.1. Отримані результати впливу дії вибуху сумішевих ВР на просадні властивості лесових ґрунтів

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР		
			Амоніт №6ЖВ	Ігданіт АС/ДТ	Малощільна ВР АС/СФ/АП
1	Глибина закладання ВР	м	1,8	1,7	1,7
2	Маса заряду	кг	14	16	16
3	Діаметр воронки	м	4,5	4,6	4,9
4	Глибина воронки	м	1,2	1,2	1,30
5	Об'єм воронки	м ³	6,3	6,6	8,1
6	Питомі витрати ВР	кг/м ³	2,22	2,40	1,97
7	Щільність ґрунту: - до ущільнення	10 ³ кг/м ³	1,35-1,40	1,35-1,40	1,35-1,40
	- після ущільнення		1,57-1,65	1,55-1,66	1,66-1,76
8	Деформації	*10 ²	14,01-15,15	12,9-15,66	18,67-20,45

Як видно з наведених даних, найбільший об'єм воронки забезпечує малощільна спінена ВР, при цьому питома витрата амоніту № 6 ЖВ становить 2,22 кг/м³, ігданіту – 2,40 кг/м³, малощільної спіненої суміші АС/СФ/АП – 1,97 кг/м³. Максимальна щільність ущільненого ґрунту при використанні амоніту досягає $(1,57 - 1,65) \cdot 10^3$ кг/м³, ігданіту – $(1,55 - 1,66) \cdot 10^3$ кг/м³, малощільної ВР - $(1,66 - 1,76) \cdot 10^3$ кг/м³.

При ущільненні просадних лесових ґрунтів необхідно забезпечити рівномірність осідання ґрунту по всій площі масиву на необхідну глибину. Відомо, що властивості лесових ґрунтів в більшій мірі залежать від їх вологості. У водонасиченому стані вони легко деформуються під дією зовнішніх навантажень.

Відомий спосіб ущільнення таких ґрунтів, оснований на утворенні похилих бойових свердловин, зорієнтованих осями всередину ущільнюваного масиву. Вибух зарядів призводить до просідання ґрунту під власною вагою [127 – 134].

Недоліком цього способу є те, що він не дозволяє сформувати плоский фронт хвилі, паралельний вільній поверхні, що знижує рівномірність ущільнення ґрунту.

Згідно способу, розробленого у відділі прикладної геодинаміки вибуху [128], що оснований на утворенні зустрічних похилих свердловин, розміщені в них лінійні заряди ВР і їхнє підривання, перед утворенням свердловин здійснюють розробку паралельних траншей, а з них проходять попарно зустрічні свердловини під кутом 20–30° до горизонту з перетином їх проекцій на вертикальну площину.

Спосіб реалізується наступним чином. По краях ущільнюваного масиву проходять дві паралельні траншеї шириною до 1,5 м і глибиною до 3,5 м. Відстань між траншеями визначається за формулою:

$$a = \frac{0,75H_{np} - H_{mp}}{\cos \alpha} \quad (7.2)$$

де H_{np} – потужність просадної товщі, м; H_{mp} – глибина траншеї, м; α – кут нахилу свердловин, град.

З дна траншей назустріч одна одній в шаховому порядку під заданим кутом з кроком 2,5 – 3,0 м пробурюють свердловини (рис. 7.1). У свердловинах розташовують суцільні заряди ВР. Лінійна маса заряду обирається в залежності від потужності просадної товщі ґрунтів і типу ВР і становить 4 – 10 кг/м.

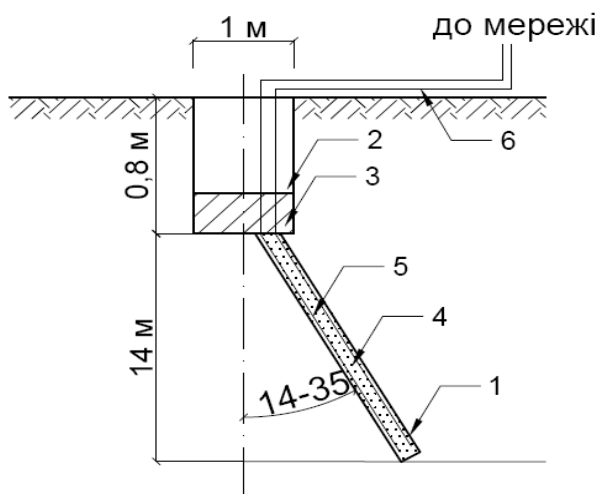


Рис. 7.1. Ущільнення ґрунтів за допомогою зарядів ВР, розташованих у похилих свердловинах: 1 – свердловина; 2 – траншея; 3 – ґрунтова забивка; 4 – спінена ВР; 5 – ДШ; 6 – магістраль

Після заряджання свердловин виконують забивку траншей ґрунтом. Система зарядів працює в умовах камуфлету без розлітання ґрунту. Після висадження зарядів оконтурений траншеями ґрунтовий масив рівномірно ущільнюється.

У таблиці 7.2 наведені дані ущільнення лесових ґрунтів вище описаним способом при кутах нахилу свердловин 14 – 35° із застосуванням різних типів ВР (ігданіта та малощільної суміші АС/СФ/АП), а на рисунках 7.2 і 7.3 показано вплив типу ВР та кута нахилу свердловини на ступінь ущільнення ґрунтового масиву.

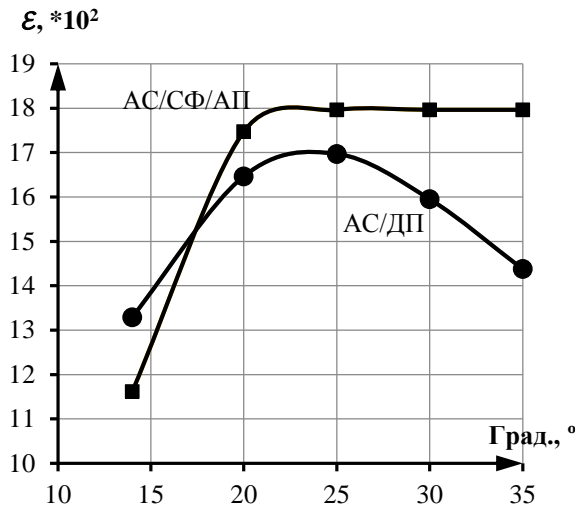
Таблиця 7.2. Отримані результати ущільнення лесових ґрунтів вибуховим способом при різних кутах нахилу свердловин

№ п/п	Глибина Н, м	Початкова щільність ґрунту, 10 ³ кг/м ³	Щільність ущільненого ґрунту при різних кутах нахилу свердловин, 10 ³ кг/м ³									
			Ігданіт АС/ДТ					Малощільна ВР АС/СФ/АП				
			14°	20°	25°	30°	35°	14°	20°	25°	30°	35°
1	2	1,35-1,37	1,48	1,47	1,43	1,47	1,45	1,47	1,48	1,49	1,49	1,46
2	4	1,36-1,38	1,58	1,64	1,65	1,63	1,60	1,55	1,66	1,67	1,67	1,67
3	6	1,34-1,36	1,57	1,66	1,63	1,68	1,56	1,60	1,69	1,69	1,72	1,58
4	7	1,40-1,42	1,58	1,61	1,60	1,55	1,58	1,60	1,65	1,72	1,76	1,62
5	8	1,30-1,32	1,55	1,60	1,58	1,62	1,58	1,54	1,72	1,70	1,72	1,57
6	9	1,41-1,43	1,59	1,63	1,62	1,56	1,60	1,48	1,70	1,71	1,68	1,54
7	10	1,50-1,52	1,56	1,60	1,60	1,59	1,59	1,55	1,68	1,67	1,75	1,60
8	12	1,35-1,37	1,57	1,59	1,59	1,57	1,55	1,59	1,67	1,69	1,73	1,64
9	14	1,44-1,46	1,60	1,57	1,55	1,63	1,61	1,62	1,75	1,76	1,76	1,68

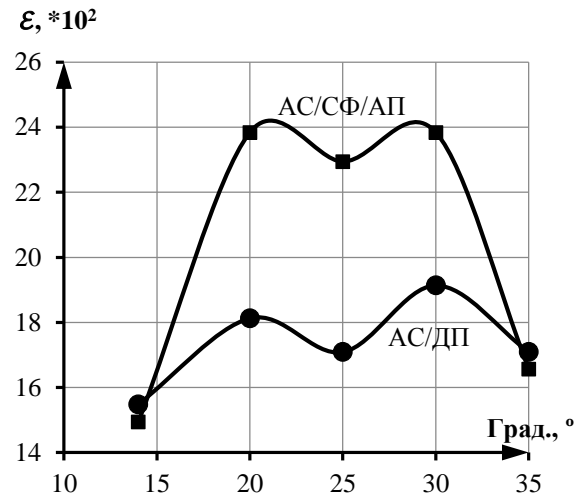
Отримані дані (рис 7.2) свідчать про те, що вплив кута нахилу свердловини на деформації ґрунтового масиву носить не лінійний характер. Спочатку, при збільшенні кута нахилу свердловини до 20°, відбувається деякий приріст деформацій на всю глибину ґрунтового масиву. Потім, при кутах нахилу свердловини в межах 20–30°, чітко спостерігається значний

приріст деформацій по всій глибині ґрунтового масиву. При подальшому зростанні кута нахилу свердловини знову відбувається деяке затухання деформацій.

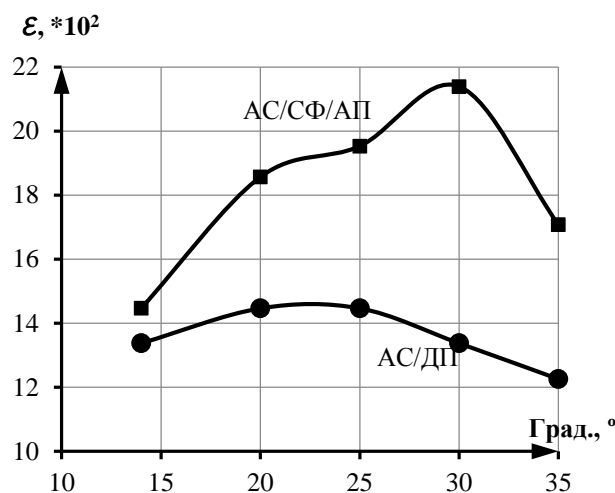
а



б



в



г

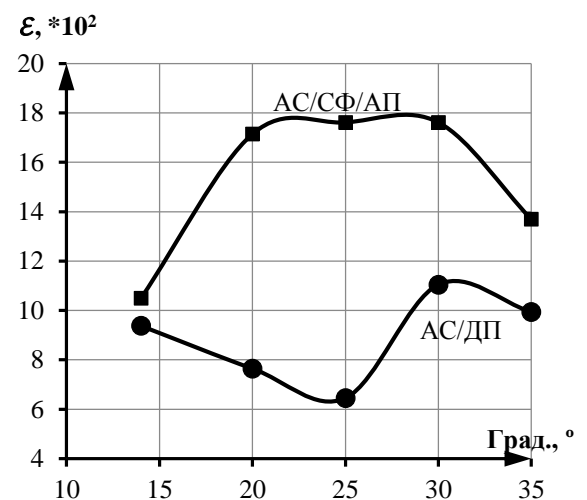


Рис. 7.2. Деформації ґрунту при різних кутах нахилу свердловини:

а – на глибині 4 м; б – на глибині 8 м; в – на глибині 12 м; г – на глибині 14 м

З таблиці 7.2 видно, що при оптимальних кутах нахилу свердловин у 20–30° більш високі деформації ущільненого ґрунту $(1,75 - 1,76) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ отримано при застосуванні малощільної ВР.

Заряди ігданіту забезпечують менший, хоча і достатній для практичних цілей, ефект ущільнення - максимальна щільність ґрунту при цьому становить $(1,55 - 1,63) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

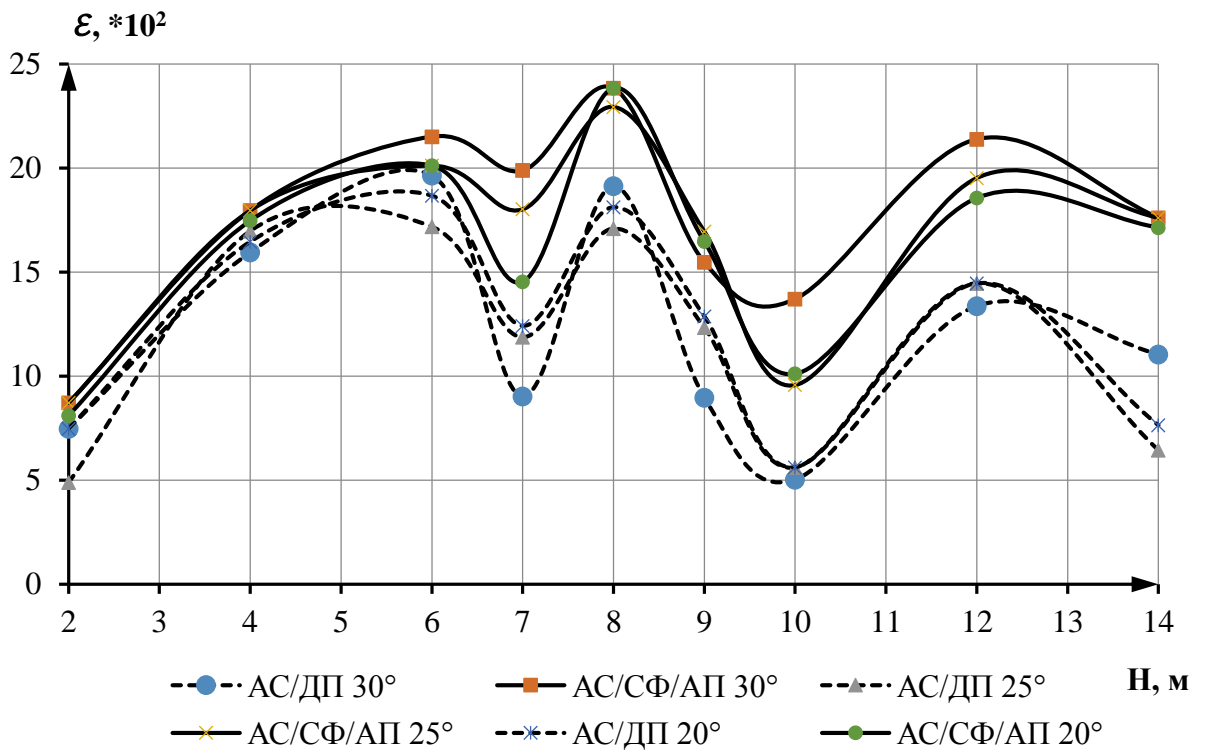


Рис. 7.3. Залежність деформацій ґрунтового масиву від типу ВР та кута нахилу свердловини

Причому, саме ущільнення (деформації) носить пульсуючий характер (табл. 7.2, рис. 7.3). Тобто, спочатку до глибини 4,5 – 6 м для ігданіту і 6 – 7 м для малошільної ВР спостерігається різкий скачок щільності (деформацій). Після чого відбувається деякий спад, і знову підвищення щільності (деформацій). З глибиною ця пульсація затухає. Таку поведінку ущільнення (деформацій) ґрунтового масиву можна пояснити тим, що під час вибуху, по мірі розповсюдження детонації вздовж заряду, виділяється значна кількість газів, яка діє в глиб ґрунтового масиву. При цьому утворюється зона ущільнення. Після того, як гази продуктів детонації перестають діяти на ґрунтовий масив, відбувається зворотний ефект, тобто утворюється зона розвантаження, яка призводить до зниження щільності (зменшення деформацій).

Характер самої амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда. А

це, в свою чергу, призводить до більш тривалої дії газів продуктів детонації на оточуючий масив, а відповідно, і збільшення щільності.

Недоліками цього способу є значні енерговитрати на буріння свердловин, визначення необхідного кута нахилу та трудомісткість при його дотриманні.

З метою усунення цих недоліків пропонується спосіб ущільнення ґрунтів, оснований на виготовленні накладних зарядів зі спіненої суміші АС/СФ/АП (з нітрату амонію (NH_4NO_3), поверхнево-активної речовини та алюмінієвої пудри), розміщених в попередньо розроблених та зволжених траншеях по всій площі ущільнення та зустрічним їх ініціюванням (рис. 7.4) [111]. У траншеях розташовують суцільні заряди ВР. Лінійна маса заряду обирається в залежності від потужності просадної товщі ґрунтів і становить 10–15 кг/м спіненої суміші.

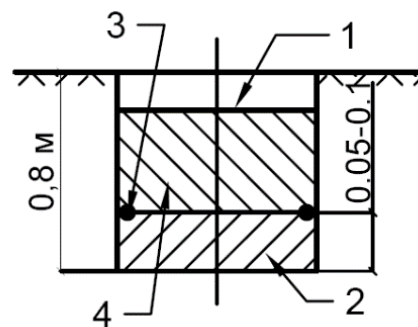


Рис. 7.4. Ущільнення ґрунтів за допомогою накладних зарядів ВР:
1 – траншея; 2 – заряд спіненої ВР; 3 – ДШ; 4 – ґрунтова забивка

Після зарядження траншеї виконують забивку її ґрунтами і підривають, в результаті чого оточуючий ґрунтовий масив рівномірно ущільнюється.

У таблиці 7.3 та на рис. 7.5 – 7.8 наведені дані ефективного ущільнення лесових ґрунтів вище описаним способом різної потужності (товщини) накладного заряду із застосуванням різних типів ВР (ігданіту та малощільної спіненої суміші АС/СФ/АП).

Таблиця 7.3. Отримані результати ущільнення лесових ґрунтів вибуховим способом при застосуванні різних накладних зарядів

№ п/п	Глибина Н, м	Початкова щільність ґрунту, 10^3 кг/м ³	Щільність ущільненого ґрунту при різній товщині накладних зарядів, 10^3 кг/м ³					
			Ігданіт АС/ДТ			Малощільна ВР АС/СФ/АП		
			50 мм	75 мм	100 мм	50 мм	75 мм	100 мм
1	0,25	1,35-1,37	1,63	1,66	1,68	1,70	1,72	1,75
2	0,50	1,36-1,38	1,62	1,64	1,65	1,67	1,69	1,71
3	0,75	1,34-1,36	1,58	1,60	1,62	1,63	1,65	1,68
4	1,00	1,40-1,42	1,60	1,63	1,65	1,60	1,61	1,66
5	1,25	1,30-1,32	1,42	1,53	1,57	1,57	1,58	1,60
6	1,50	1,41-1,43	не змінна	1,51	1,63	1,51	1,63	1,64
7	2,00	1,50-1,52	не змінна	не змінна	1,61	не змінна	1,58	1,61
8	2,50	1,35-1,37	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	1,50
9	3,00	1,44-1,46	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	1,49

Як видно з таблиці 7.3 та з рис. 7.5 – 7.8 характер ущільнення ґрунтового масиву поверхневими накладними зарядами, як і свердловинними, носить нелінійний пульсуючий характер. Ущільнення, а відповідно, і деформації ґрунтового масиву при цьому виконуються на глибину 1,25 м, 1,5 м і 2,0 м при потужності заряду відповідно 50 мм, 75 мм, і 100 мм для ігданіту та на глибину 1,5 м, 2,0 м і 3,0 м при потужності заряду відповідно 50 мм, 75 мм, і 100 мм для малощільної ВР.

Початкове ущільнення на глибині 0,25 м малощільною ВР дещо вище, ніж при застосуванні ігданіту, і знаходиться в межах для малощільної ВР від $1,7$ до $1,75 \cdot 10^3$ кг/м³ і для ігданіту – від $1,63$ до $1,68 \cdot 10^3$ кг/м³.

Залежність глибини ущільнення ґрунтового масиву від потужності заряду ВР (рис. 7.9) носить лінійний характер. При потужностях заряду 50,

75, і 100 мм глибина ущільнення ґрунту малоцільною ВР відповідно на 25, 20 і 17 % більша, ніж ігданітом.

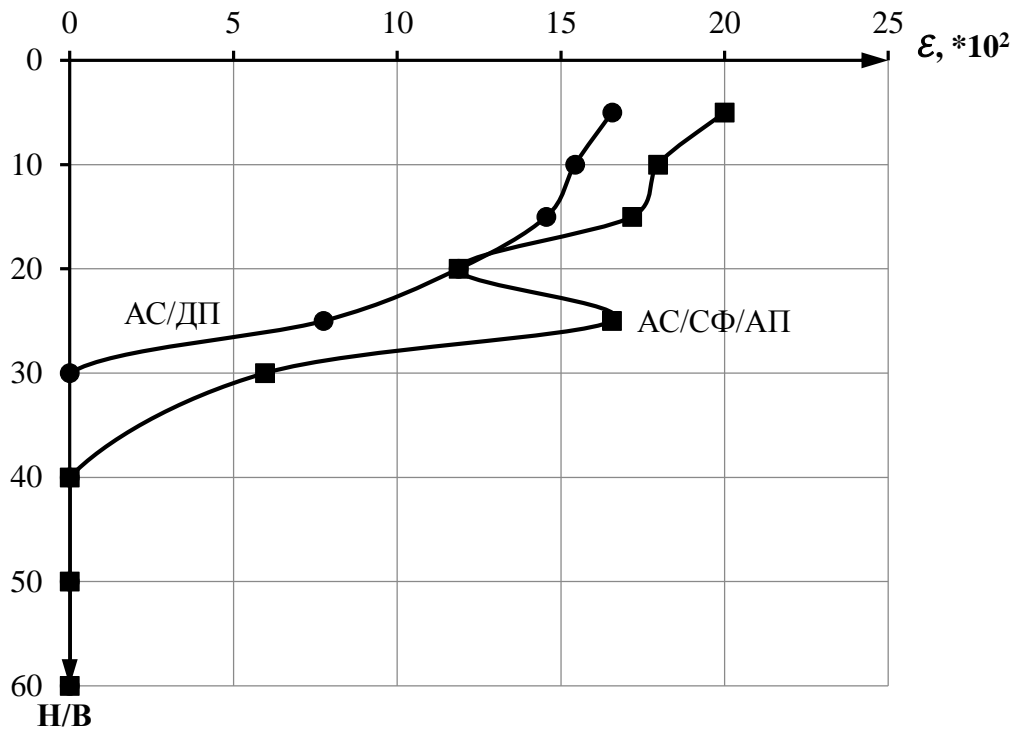


Рис. 7.5. Залежність деформації ґрунтового масиву від типу ВР потужністю 50 мм

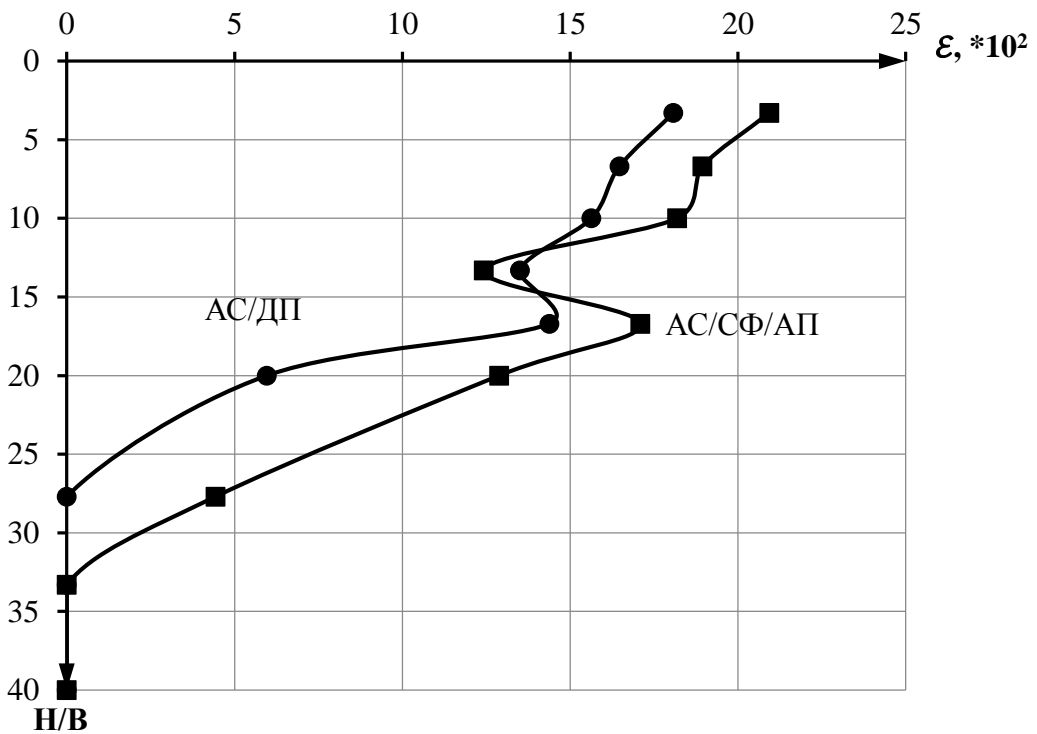


Рис. 7.6. Залежність деформації ґрунтового масиву від типу ВР потужністю 75 мм

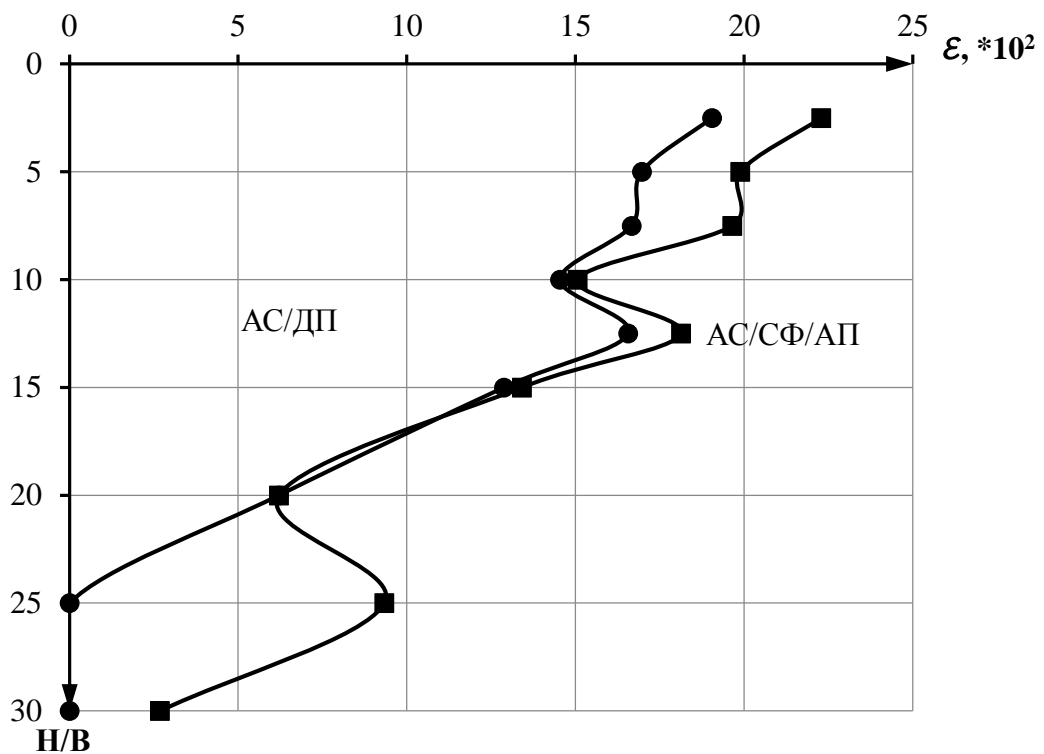


Рис. 7.7. Залежність деформації ґрунтового масиву від типу ВР потужністю 100 мм

Таким чином, можна підібрати таку потужність заряду, яка забезпечить ущільнення ґрунтового масиву на необхідну глибину.

Результати проведених експериментів свідчать про те, що низькошвидкісні та малощільні ВР забезпечують ущільнення просадних лесових ґрунтів на більшу глибину масиву. Причому малощільні спінені заряди на основі АС/СФ/АП забезпечують ущільнення на більш значну глибину 1,5 – 3,0 м, що становить 27–30 потужностей заряду або 20-35 % більше у порівнянні з ігданітом, що забезпечує ущільнення на глибину 1,25 – 2,0 м або 20 – 25 потужностей заряду.

Це можна пояснити перерозподілом енергії у вибуховому імпульсі за рахунок зниження пікового тиску і збільшення загальної тривалості фази стиснення. Останнє дозволяє зменшити втрати енергії в ближній зоні вибуху на непотрібне переущільнення ґрунту та збільшити тривалість дії самого ущільнення, що безпосередньо впливає на її глибину.

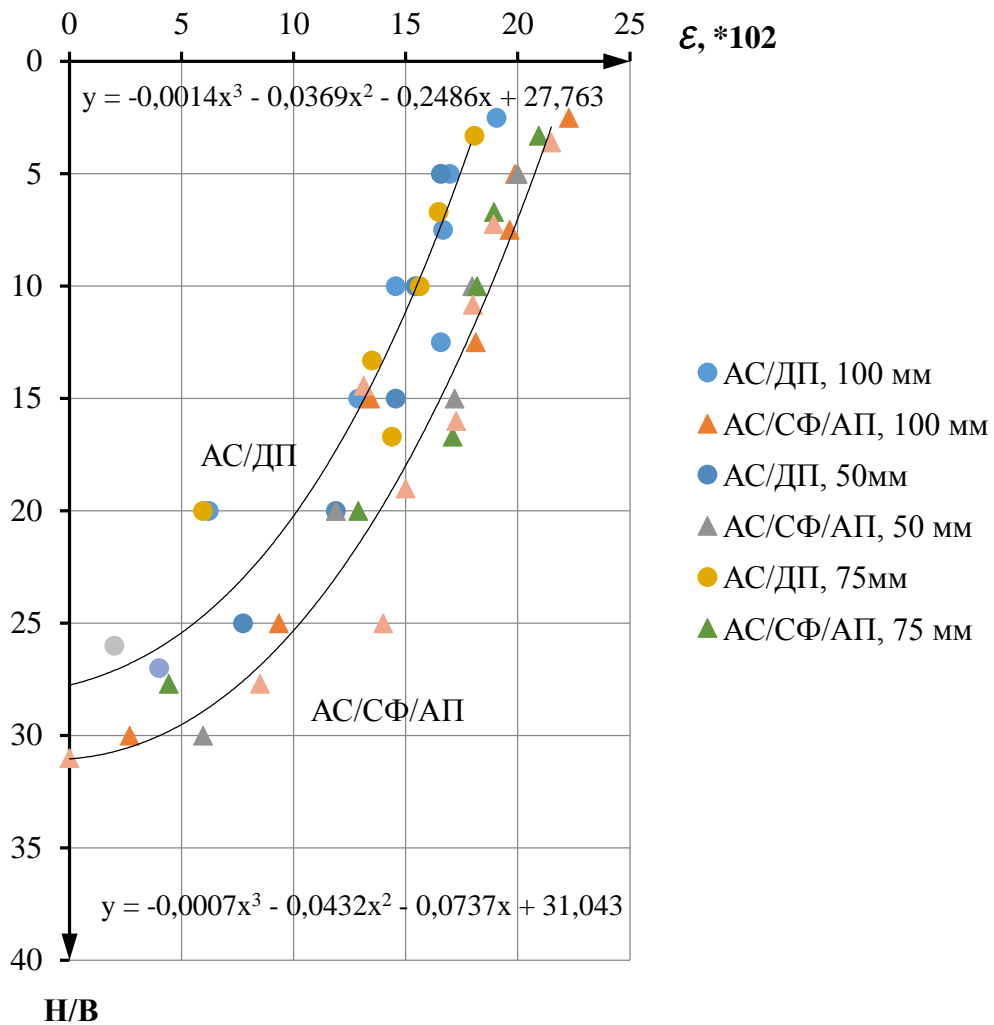


Рис. 7.8. Залежність деформацій лесових ґрунтів від типу ВР

Найбільший ступінь ущільнення досягається при застосуванні зарядів на основі АС/СФ/АП і становить $(1,70-1,75) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. При цьому щільність просадних лесових ґрунтів збільшується від 7 % – 16 % на глибині 1,5 м до 26 % – 29 % на глибині 0,25 м.

Заряди ігданіту забезпечують менший, хоча і достатній для практичних цілей, ефект ущільнення – максимальна щільність ґрунту при цьому становить $(1,63 - 1,68) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. При цьому щільність просадних лесових ґрунтів збільшується від 9 % – 20 % на глибині 1,25 м до 20 % – 24 % на глибині 0,25 м.

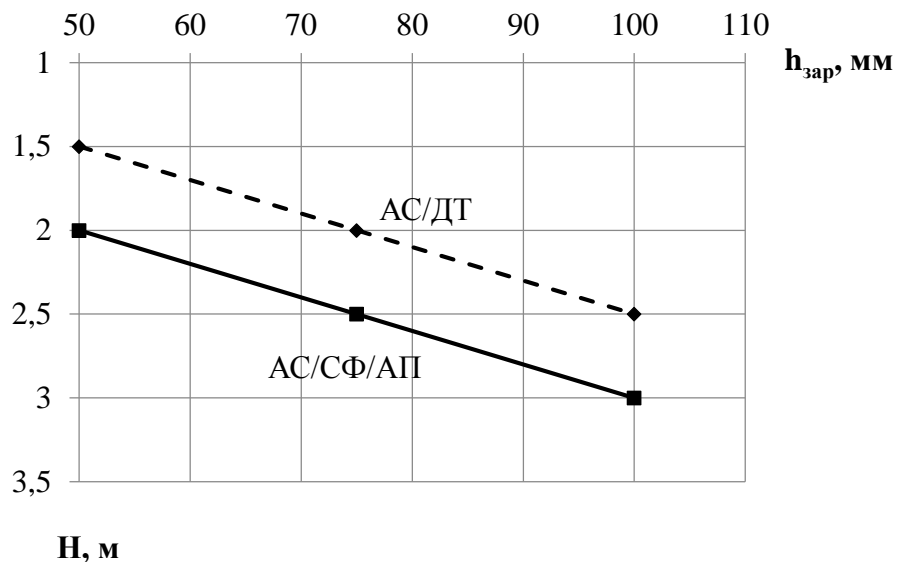


Рис. 7.9. Залежність глибини ущільнення ґрунтового масиву від потужності заряду

Аналіз отриманих даних показує, що об'ємна концентрація енергії в зарядній порожнині при використанні малоцільних сумішей нижче, ніж у стандартних ВР, працездатність за методом воронкоутворення і ефективність ущільнення, навпаки, вище у малоцільних сумішевих ВР. Це можна пояснити перерозподілом енергії у вибуховому імпульсі за рахунок зниження пікового тиску і збільшення загальної тривалості фази стиснення. Останнє дозволяє зменшити втрати енергії в ближній зоні вибуху на непотрібне переподібнення і переущільнення ґрунту.

На практиці можливий варіант застосування комбінованих зарядів, почергово комбінуючи основну масу малоцільної вибухової речовини ігданітом або штатною стандартною ВР. Це дозволить підвищити стабільність детонаційного процесу в зарядах і істотно знизити вартість вибухових технологій ущільнення лесових ґрунтів. При цьому в нижній частині зарядів частка штатного ВР може бути збільшена в 2 – 3 рази в порівнянні з верхньою половиною зарядної колонки.

Ініціювання зарядів у всіх випадках слід здійснювати за допомогою дублювання ліній ДШ.

Запропонований метод ущільнення просядних лесових ґрунтів накладними зарядами за рахунок нових вдосконалених рецептур безтритилових ВР на основі аміачної селітри потребувало подальшого

вдосконалення, а саме, відповідної механізації щодо приготування малощільних ВР та заповнення на необхідну площу ущільнення.

7.2. Вплив зміни фізико-механічних характеристик на просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів

Попередньо оцінити просадні властивості лесових ґрунтів (структурно-нестійких ґрунтів) можна, по так званих, номенклатурних критеріях [134], а саме: ступені вологості (S_r), яка повинна бути менше 0,8 і показнику (I_{SS}), що визначається за формулою;

$$I_{SS} = \frac{e_L - e}{1 + e} \quad (7.3)$$

де e – коефіцієнт пористості ґрунту природної структури і вологості; e_L – коефіцієнт пористості, який відповідає вологості на межі текучості w_L і визначається за формулою:

$$e_L = \frac{W_L \cdot \rho_s}{\rho_w} \quad (7.4)$$

Значення показника I_{SS} залежить від числа пластичності ґрунту I_p і відповідно становить: при $1 \leq I_p < 10 - I_{SS} = 0,1$; при $10 \leq I_p < 14 - I_{SS} = 0,17$; при $14 \leq I_p < 22 - I_{SS} = 0,24$.

Але найважливішим показником, який характеризує просадні властивості ґрунтів – є відносне просідання ε_{sl} . Ґрунти відносяться до просадних при $\varepsilon_{sl} \geq 0,01$. По діючих нормах ε_{sl} – це відносна стисливість зразків просадного ґрунту без можливості бокового розширення для заданого тиску при їх водонасиченні до ступеня вологості $S_r \geq 0,8$, а фактично ε_{sl} – це різниця відносної стисливості зразків при природній вологості та у водонасиченому стані для заданого тиску.

Відносне просідання ґрунту ε_{sl} на основі випробувань зразків на стиск без можливості бокового розширення визначається за формулою [7]:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_{n.p} - h_{sat.p}}{h_{n.g}} \quad (7.5)$$

де $h_{n.p}$ та $h_{sat.p}$ – висота зразка відповідно природної вологості і після його

повного водонасичення ($w = w_{sat}$) при тиску p , який дорівнює вертикальному напруженню на даній глибині від зовнішнього навантаження (σ_{zp}) і власної ваги ґрунту (σ_{zg}); $p = \sigma_{zp} + \sigma_{zg}$ – для визначення просадки ґрунту у верхній зоні просідання; при визначенні просадок ґрунту у нижній зоні просідання також враховується, при необхідності, додаткове навантаження від сил негативного тертя; $h_{n.g}$ – висота того ж зразка природної вологості при $p = \sigma_{zg}$

Як видно із формули 7.5, найбільш доцільно, для визначення величини ε_{sl} , використовувати метод паралельних випробувань двох зразків, тобто метод «двох кривих». Відносне просідання є однією із основних характеристик просадних ґрунтів і використовується у наступних випадках:

- при розрахунку можливих величин просадок, як в деформованій зоні основ від дії фундаментів, так і під навантаженням від власної ваги ґрунтів;
- при визначенні загальної оцінки просадних властивостей ґрунтів;
- при визначенні типу ґрунтових умов за просіданням;
- при визначенні критеріїв початку розвитку просідання – початкового тиску просідання p_{sl} і початкової (критичної) вологості просідання w_{sl} .

При дослідженні просадних, а також ущільнених лесових ґрунтів методом «двох кривих» можна визначити деформаційні характеристики та їх відносне просідання у широкому діапазоні тисків, що є беззаперечною перевагою даного методу, суть якого у тому, що досліди проводять паралельно на двох зразках, відібраних із одного моноліту. Один зразок ґрунту з природною або заданою вологістю навантажують ступенями до заданого кінцевого тиску із стабілізацією осадок на кожній ступені. Після цього зразок замочують до стабілізації просідання. Другий зразок замочують перед навантаженням, а потім при безперервному замочуванні навантажують ступенями до заданого тиску.

За даними лабораторних досліджень можна визначити:

- початковий тиск просідання p_{sl} , МПа при $\varepsilon_{sl} = 0,01$, тобто мінімальний тиск, при якому проявляються властивості просідання ґрунтів при його замочуванні до ступеня вологості $S_r \geq 0,8$;

– компресійний модуль деформації ґрунтів природної вологості та у водонасиченому стані.

При визначенні модуля деформації спочатку визначається коефіцієнт стисливості m_0 за формулою [134]:

$$m_0 = \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta P} \cdot (1 + e_0) \quad (7.6)$$

де $\Delta e, \Delta \varepsilon$ – відповідно зміна коефіцієнту пористості та відносного стиснення у межах вибраної прямолінійної ділянки графіку залежності відносного стиснення від тиску $\varepsilon = f(p)$; Δp – інтервал тиску в МПа, на якому вираховується значення m_0 , приймається не менше 0,1 МПа (звичайно, інтервал тиску приймається для величин тиску від 0,1 до 0,2 МПа, або для діапазону тиску від 0,05 до 0,25 МПа); e_0 – коефіцієнт пористості зразка природної структури, якщо відносне стиснення вираховується по відношенню до початкової висоти зразка або коефіцієнт пористості ґрунту із природною вологістю при природному тиску, якщо ε вираховується по відношенню до висоти зразка, обтиснутого природним тиском.

Модуль деформації по компресійним випробуванням E_K визначається за формулою [134]:

$$E_K = \frac{\Delta p \cdot \beta}{\Delta l} = \frac{\beta}{m_0} (1 + e_0) \quad (7.7)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта бічного розширення ґрунту і приймається $\beta = 0,74$ – для лесоподібних супісків та лесів; $\beta = 0,63$ – для лесоподібних суглинків; $\beta = 0,4$ – для лесоподібних глин.

Як і для звичайних не просадних ґрунтів модуль деформації E_K , отриманий при компресійних дослідженнях у 1,5–10 разів менше, ніж при штампових польових випробуваннях. Тому для знаходження фактичного модуля загальної деформації можна використовувати перехідні коефіцієнти m_K .

Для визначення початкової (критичної) вологості просідання W_{sl} просадних ґрунтів за результатами компресійних випробувань зразків ґрунтів

із різною вологістю будуються відповідні графіки $\varepsilon_w=f(p)$. На цьому ж графіку проводиться допоміжна крива, паралельна кривій відносного стиснення ґрунту із природною вологістю, що відповідає відносному просіданню (різниця ординат обох кривих) $\varepsilon_{se}=0,01$. Ордината точки цього графіка, що відповідає мінімальному тиску, при якому проявляються просадні властивості (в стані повного водонасичення), являє собою початковий тиск просідання.

По точках перетину цієї кривої з кривими відносного стиснення ґрунту при різній вологості визначаються значення початкової вологості. Отримані величини початкової вологості і відповідні їм тиски використовуються для побудови графіка залежності початкової вологості від тиску.

За результатами цих досліджень визначаються також значення відносного просідання ґрунту при різних значеннях проміжної вологості ε_{slw} , як різниця кривих $\varepsilon_{sew}=f(p)$ і кривої $\varepsilon_{wo}=f(p)$ ґрунту із природною вологістю. На основі цього можуть бути побудовані графіки залежності відносного просідання ε_{sw} від вологості при різних величинах тиску.

Для відбору зразків лесових ґрунтів був пройдений шурф на глибину 6,0 м. З якого було відібрано по 5 – 6 монолітів лесового ґрунту розмірами 15x15x15 см та 20x20x20 см на глибинах 2,5 м; 3,0 м та 6,0 м. Зразки непорушеної структури у вигляді монолітів були доставлені у лабораторію механіки ґрунтів кафедри геоінженерії із збереженням природної вологості. Для цього, кожен моноліт був обгорнутий плівкою з поліетилену без можливого доступу повітря. Крім того, для фіксації просторового розташування та глибини відбору всі зразки лесового ґрунту були відповідним чином промарковані.

На першому етапі, для даних зразків лесового ґрунту були визначені основні фізичні властивості, які наведені у таблиці 7.4. На другому етапі – були визначені деформаційні характеристики цих зразків при різній щільності (таблиці 7.5). Ці характеристики були визначені як для зразків у природному стані, так і при повному водонасиченні. В обох таблицях наведені осереднені дані по 5–6 випробуванням.

Таблиця 7.4. Основні фізичні характеристики відібраних зразків лесового ґрунту

Глибина	Щільність ґрунту	Природна вологість	Щільність скелету ґрунту	Вологість на межі текучості	Вологість на межі розкочування	Число пластичності	Показник текучості	Щільність мінеральних часток	Коефіцієнт пористості
м	ρ г/см ³	w_e , д. од.	ρ_d г/см ³	W_l , д. од.	W_p , д. од.	I_p	I_l	ρ_s г/см ³	e
2,5	$\frac{1,55-1,62}{1,58}$	$\frac{0,137-0,143}{0,140}$	$\frac{1,36-1,42}{1,39}$	0,24-0,26	0,20-0,21	0,04	Менше 0	$\frac{2,63-2,65}{2,64}$	$\frac{0,934-0,866}{0,900}$
3,0	$\frac{1,59-1,64}{1,62}$	$\frac{0,138-0,142}{0,140}$	$\frac{1,39-1,44}{1,42}$	0,24-0,26	0,20-0,22	0,04	Менше 0	$\frac{2,63-2,67}{2,65}$	$\frac{0,892-0,854}{0,873}$
6,0	$\frac{1,67-1,77}{1,72}$	$\frac{0,137-0,143}{0,140}$	$\frac{1,46-1,55}{1,51}$	0,23-0,26	0,20-0,22	0,04	Менше 0	$\frac{2,64-2,68}{2,66}$	$\frac{0,808-0,729}{0,7685}$

Результати визначення гранулометричного складу лесових ґрунтів аерометричним методом показали, що вони відносяться до алевритів, тобто пилюватих утворень, і по вмісту фракцій мають такий склад: піщаних часток розміром $> 0,25$ мм – 1 %, розміром 0,25 – 0,1 мм – 5,3 %; пилюватих часток розміром 0,1 – 0,05 мм – 88,98 %, 0,05 – 0,01 мм – 0,08 %, розміром 0,01 – 0,05 мм – 0,01 %; глинистих часток розміром $< 0,005$ мм – 4,63 %.

Щільність лесових ґрунтів природного стану склала відповідно: на глибині 2,5 м – від 1,55 г/см³ до 1,62 г/см³, в середньому – 1,58 г/см³; на глибині 3,0 м – від 1,59 г/см³ до 1,64 г/см³, в середньому – 1,62 г/см³; на глибині 6,0 м – від 1,67 г/см³ до 1,77 г/см³, в середньому – 1,72 г/см³.

Природна вологість ґрунтів W_e коливалось у дуже тісних межах – від 0,137 до 0,143, в середньому – 0,14.

Відповідно щільність скелету ґрунту ρ_d , яка визначалась за формулою [134]:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + W_e} \quad (7.8)$$

Складала відповідно: на глибині 2,5 м – від 1,36 г/см³ до 1,42 г/см³, в середньому – 1,39 г/см³; на глибині 3,0 м – від 1,39 г/см³ до 1,44 г/см³, в середньому – 1,42 г/см³; на глибині 6,0 м – від 1,46 г/см³ до 1,55 г/см³, в середньому – 1,51 г/см³.

Щільність мінеральних часток ρ_s , яка визначалась пікнометричним методом складала відповідно: на глибині 2,5 м – від 2,63 г/см³ до 2,65 г/см³, в середньому – 2,64 г/см³; на глибині 3,0 м – від 2,63 г/см³ до 2,67 г/см³, в середньому – 2,65 г/см³; на глибині 6,0 м – від 2,64 г/см³ до 2,68 г/см³, в середньому – 2,66 г/см³.

Відповідно коефіцієнт пористості «*e*» для лесових ґрунтів у природному стані, якій визначався за формулою:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (7.9)$$

складає відповідно: на глибині 2,5 м – від 0,866 до 0,934, в середньому – 0,900; на глибині 3,0 м – від 0,854 до 0,892, в середньому – 0,873; на глибині 6,0 м – від 0,729 до 0,808, в середньому – 0,7685.

За допомогою визначення межі текучості W_l (від 0,23 до 0,26) та межі розкочування W_p (від 0,20 до 0,22) встановлено число пластичності I_p за формулою:

$$I_p = W_l - W_p \quad (7.10)$$

яке дорівнює 0,04, тобто по відповідній класифікації – даний лесовий ґрунт – супісок, який знаходиться у твердому стані, оскільки $W_e=0,14 < W_p=0,20$, або за формулою:

$$I_l = \frac{W_e - W_p}{W_l - W_p} \quad (7.11)$$

його показник текучості $I_l < 0$, тому що $\frac{0,14-0,20}{0,24-0,20} = -1,5 < 0$.

Деформаційні характеристики лесових ґрунтів визначались за допомогою компресійних випробувань, використовуючи метод «двох кривих». За допомогою цього методу можна визначити: відносну стисливість ε лесових ґрунтів у природному стані; відносну стисливість ε_{sat} при замочуванні; відносне просідання, яке дорівнює $\varepsilon_{\text{sl}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{sat}}$, а також компресійний модуль деформації лесових ґрунтів у природному стані E_k та у водонасиченому стані E_{ksat} та коефіцієнт мінливості стисливості $\alpha = \frac{E_k}{E_{\text{ksat}}}$.

Таблиця 7.5. Деформаційні характеристики лесових ґрунтів при різній щільності

Щільність ґрунту, ρ , г/см ³	Відносна стисливість, відносне просідання	Вертикальний тиск, МПа						Початковий тиск просідання, p_{st} , МПа	Модуль загальної деформації в інтервалі 0,1-0,2 МПа $E = E_k \cdot m_k$, МПа, $m_k = 2$ для супісків
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3		
1,58	у природному стані $W=0,14$	0,021	0,0318	0,0387	0,0409	0,0437	0,0475	–	13,36
	у водонасиченому стані $W_{\text{sat}}=0,26$	0,0257	0,0431	0,0551	0,0672	0,0798	0,0913	–	7,50
	відносне просідання	0,0047	0,0113	0,0164	0,0263	0,0361	0,0438	0,095	–
1,62	у природному стані $W=0,14$	0,0071	0,0134	0,0224	0,0293	0,0331	0,0364	–	13,44
	у водонасиченому стані $W_{\text{sat}}=0,26$	0,0148	0,0211	0,0341	0,0447	0,0571	0,0667	–	7,74
	відносне просідання	0,0077	0,0077	0,0117	0,0154	0,0240	0,0303	0,148	–
1,72	у природному стані $W=0,14$	0,0063	0,0158	0,0211	0,0243	0,0297	0,0337	–	15,78
	у водонасиченому стані $W_{\text{sat}}=0,26$	0,0123	0,0231	0,0288	0,0354	0,0431	0,0475	–	8,88
	відносне просідання	0,006	0,0073	0,0077	0,0111	0,0134	0,0138	0,190	–

За отриманими результатами компресійних випробувань були побудовані графіки відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів різної щільності, які відображені на рисунках 7.10 – 7.12.

Як видно з таблиці 7.5 при збільшенні щільності лесового ґрунту, дещо підвищується модуль загальної деформації. Так, при щільності $\rho = 1,58 \text{ г/см}^3$ модуль загальної деформації становить $E = 13,36 \text{ МПа}$ для лесових ґрунтів у природному стані і $E = 7,5 \text{ МПа}$ – у водонасиченому; при щільності $\rho = 1,62 \text{ г/см}^3$ модуль загальної деформації становить відповідно $13,36 \text{ МПа}$ і $7,74 \text{ МПа}$ у природному та водонасиченому станах, а при щільності $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$ модуль загальної деформації збільшується до $E = 15,78 \text{ МПа}$ для лесових ґрунтів у природному стані і до $E = 8,88 \text{ МПа}$ у водонасиченому стані.

Також, при збільшенні щільності лесового ґрунту, збільшується початковий тиск просідання, який відповідно становить: $0,095$; $0,148$; $0,19 \text{ МПа}$ при щільності лесового ґрунту – $1,58$; $1,62$; $1,72 \text{ г/см}^3$.

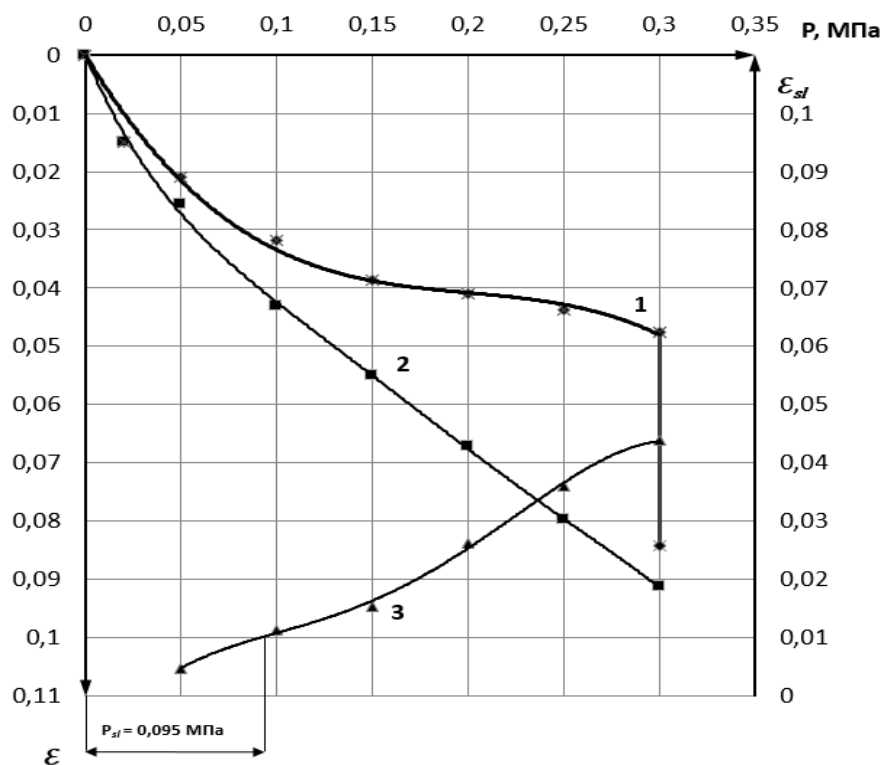


Рис. 7.10. Залежність відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів зі щільністю $\rho = 1,58 \text{ г/см}^3$ за схемою «двох кривих»: 1, 2 – відповідно, відносне стискання ґрунту з природною вологістю та у водонасиченому стані; 3 – відносне просідання ґрунту; p_{sl} – початковий просадний тиск

Із проведених нами досліджень початкової (критичної) вологості просадки (рис. 7.13) за компресійними кривими було визначено модуль деформації, підраховано модуль загальної деформації при різній щільності лесових ґрунтів (таблиці 7.5) та побудовано залежності початкової (критичної) вологості від тиску (рис. 7.14) і відносного просідання від вологості для тисків 0,15; 0,2; 0,25 та 0,3 МПа (рис. 7.15).

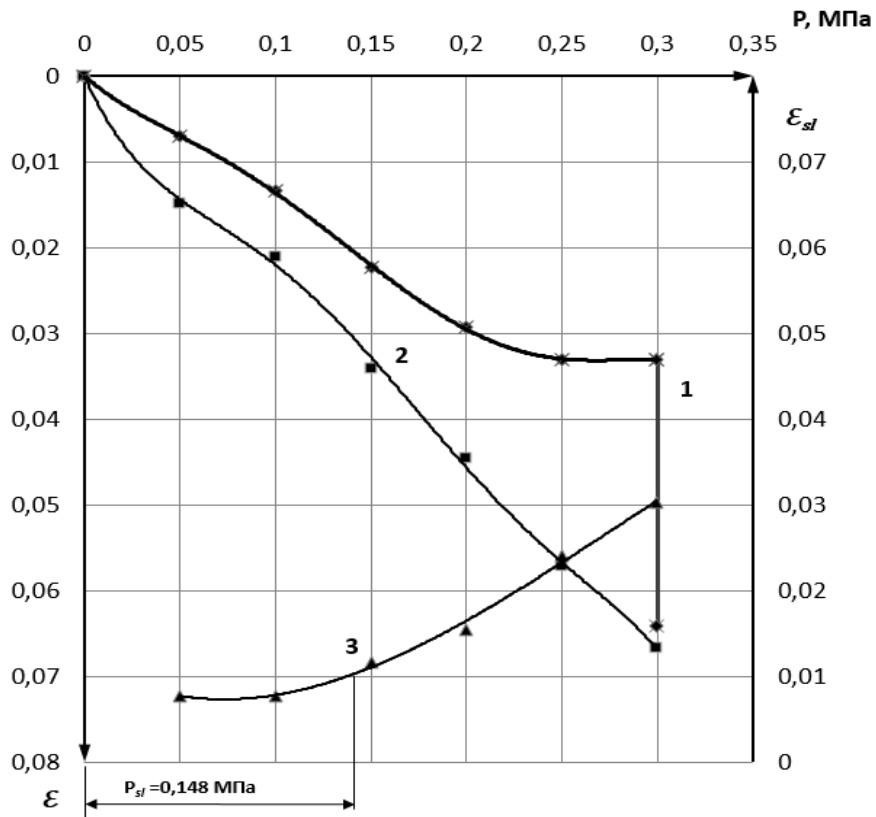


Рис. 7.11. Залежність відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів зі щільністю $\rho = 1,62 \text{ г/см}^3$ за схемою «двох кривих»: 1, 2 – відповідно, відносне стискання ґрунту з природною вологістю та у водонасиченому стані; 3 – відносне просідання ґрунту; p_{st} – початковий просадний тиск

З отриманих графіків (рис. 7.10 – 7.12) видно, що зі збільшенням щільності лесових ґрунтів, зменшується їхня відносна стисливість та відносне просідання. Так, при щільності лесових ґрунтів $\rho = 1,58 \text{ г/см}^3$ (рис. 7.12), відносна стисливість становить 0,0318; 0,0409; 0,0475 та відносне просідання 0,0113; 0,0263; 0,0438 відповідно при вертикальному навантаженні 0,1; 0,2; 0,3 МПа.

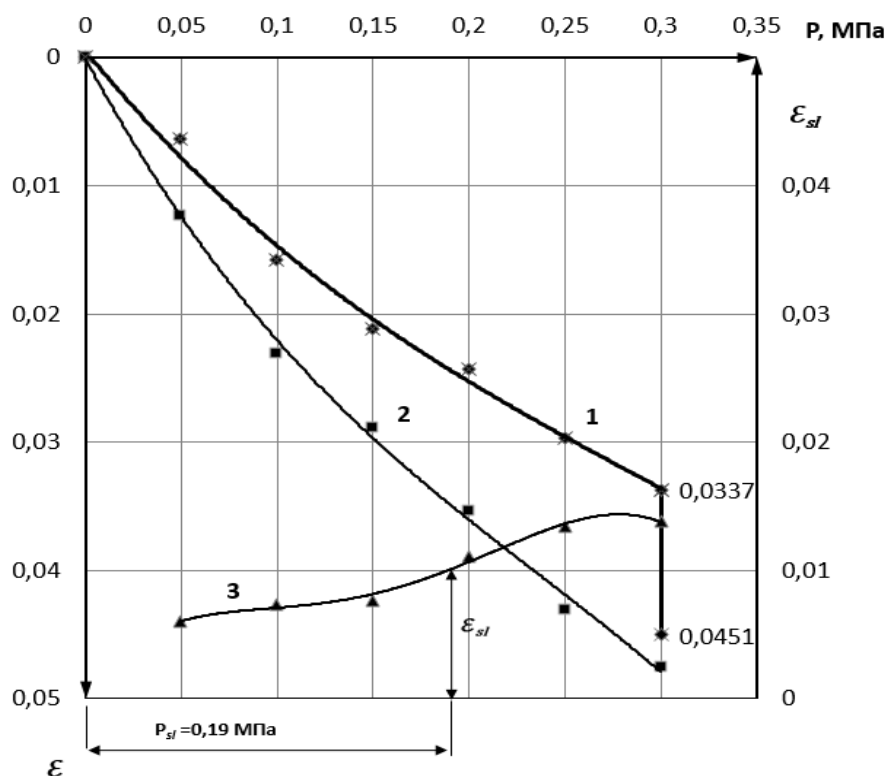


Рис. 7.12. Залежність відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів зі щільністю $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$ за схемою «двох кривих»: 1, 2 – відповідно, відносне стискання ґрунту з природною вологістю та у водонасиченому стані; 3 – відносне просідання ґрунту; p_{sl} – початковий просадний тиск

При щільності лесових ґрунтів $\rho = 1,62 \text{ г/см}^3$ (рис. 7.11) ці значення дещо менші, а саме, відносна стисливість становить 0,0134; 0,0293; 0,0364 та відносне просідання 0,0077; 0,0154; 0,0303 при вертикальному навантаженні 0,1; 0,2; 0,3 МПа.

Найменші значення відносної стисливості 0,0158; 0,0243; 0,0337 та відносного просідання 0,0073; 0,0111; 0,0138 при вертикальному навантаженні відповідно 0,1; 0,2; 0,3 МПа отримано при щільності лесових ґрунтів $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$ (рис. 7.12).

З рисунків 7.13 – 7.15 видно, що при вологості лесового ґрунту від природного стану ($W_e = 0,14$) і до вологості на межі розкочування ($W_p = 0,20$) відносне стиснення знаходиться в межах 0,03 – 0,055, а при вологості лесового ґрунту на межі текучості ($W_l = 0,23 - 0,26$), тобто, при повному водонасиченні, відносне стиснення становить, 16.

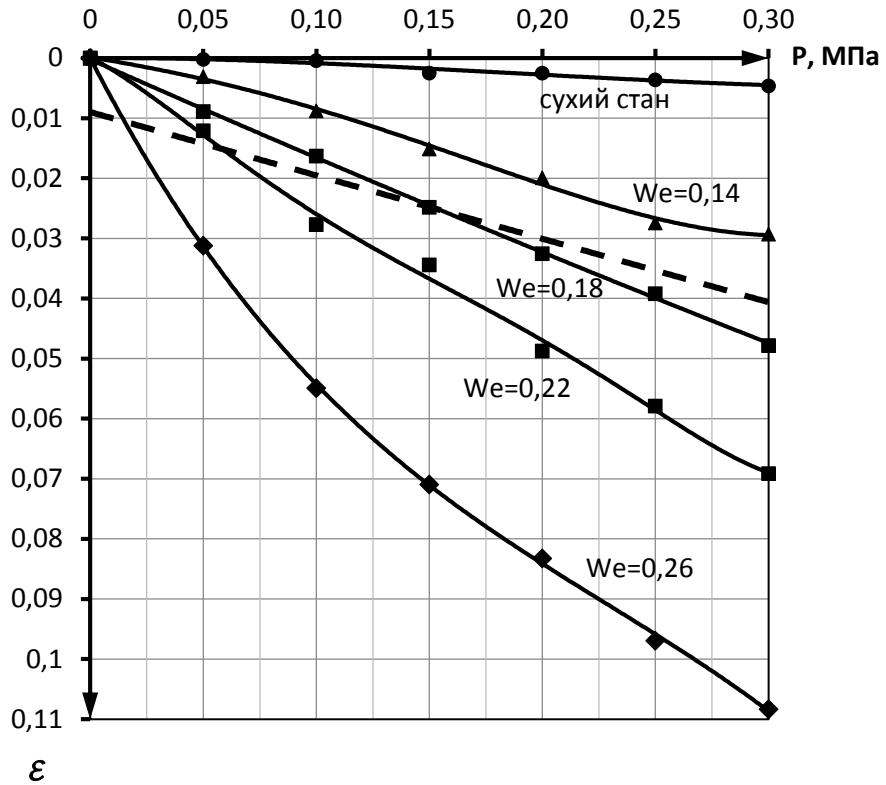


Рис. 7.13. Графік залежності відносного стиснення лесового ґрунту при різній вологості від тиску. Пунктиром нанесена допоміжна крива, яка відповідає $\varepsilon_{sl} = 0,01$

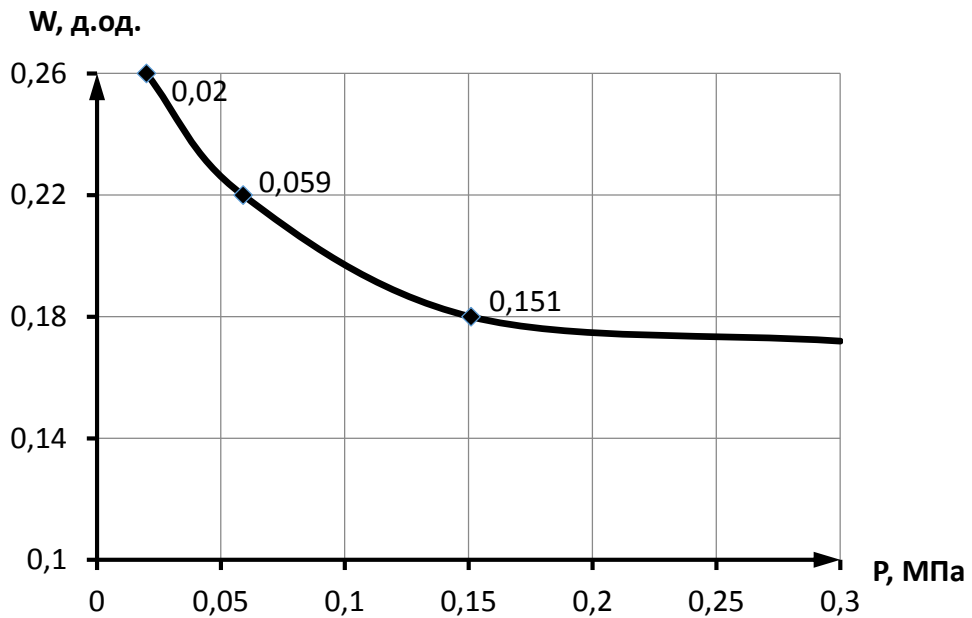


Рис. 7.14. Графік залежності початкової (критичної) вологості лесового ґрунту від тиску

Початкова (критична) вологість настає при насиченні лесового ґрунту водою 17 % і більше, тобто при ($w \geq 0,17$).

Відносне просідання поступово збільшується при вологості лесового ґрунту ($w = 0,14 \div 0,22$) і знаходиться в межах: 0,0151 – 0,0344; 0,0199 – 0,0487; 0,0277 – 0,0579; 0,0293 – 0,0691 відповідно до вертикального навантаження в 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа. При подальшому зволоженні ґрунту до повного його водонасичення спостерігається значне зростання відносного просідання, яке становить: 0,0709; 0,0832; 0,0969; 0,1083 відповідно до вертикального навантаження в 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа.

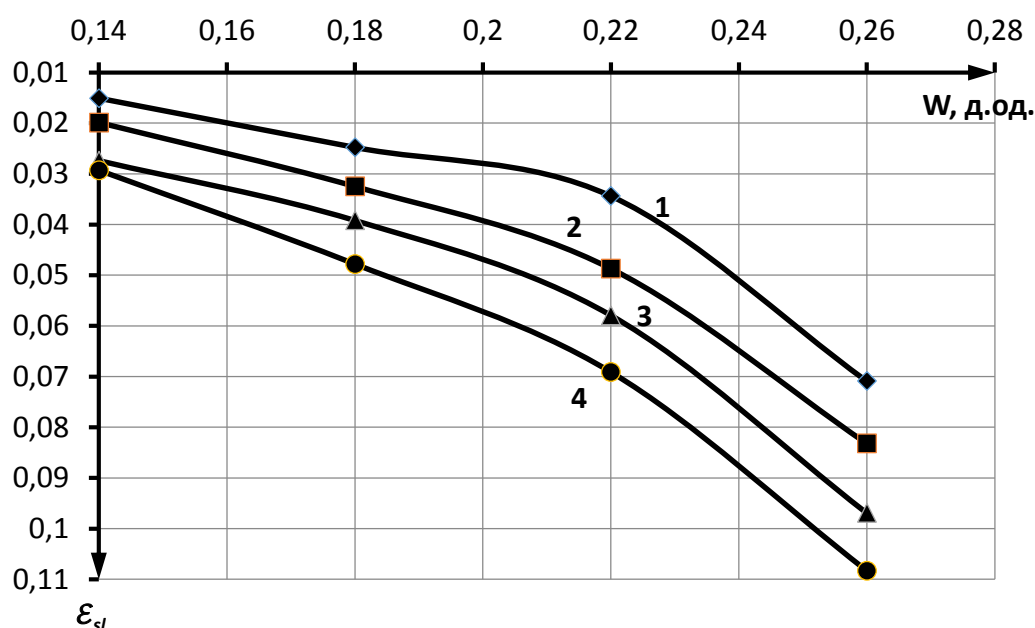


Рис. 7.15. Графік залежності відносного просідання від вологості лесового ґрунту: 1, 2, 3, 4 – відповідно при тисках 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа

Отримані результати компресійних досліджень свідчать про те, що щільність значно впливає на деформаційні і фізико-механічні властивості лесових ґрунтів, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів.

Цю характерність доцільно застосувати при визначенні необхідного ступеня ущільнення, регулювання якого, дозволить встановити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості просадних лесових ґрунтів.

7.3. Розробка пристроїв і способу приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції

На сьогодні виробництво вибухових речовин (ВР) зосереджено на спеціальних підприємствах, що значно збільшує вартість внаслідок навантажувально-розвантажувальних робіт, транспортування і забезпечення безпеки при зберіганні і транспортуванні, збільшення часу між виробництвом та використанням вибухової речовини. Тому при ущільненні структурно-нестійких просадних ґрунтів у міських умовах і на гірничих підприємствах відкритого типу доцільно виготовляти вибухові речовини безпосередньо на місцях проведення вибухових робіт. Їх прийнято називати вибуховими речовинами місцевого приготування [89].

Майже всі промислові ВР є сумішевими системами. Основу вибухових сумішей становлять базові речовини, які можуть бути вибуховими вже в початковому стані, як наприклад, в сумішах на основі тротилу, гексогену, октогену тощо або окислювачами, як це реалізовано в сумішах на основі аміачної селітри. Додаткові компоненти до основних речовин в сумішевих системах виконують роль базових або додаткових горючих (окислювачів).

Водонаповнені спінені вибухові композиції на основі аміачної селітри, поверхнево-активних речовин (ПАР) і води призначалися для ведення робіт в гірничорудній промисловості в шпурових і накладних зарядах незначної площі при руйнуванні негабариту і видобутку штучного каменю.

Спосіб приготування спіненої вибухової композиції цього типу полягає у змішуванні ПАР з водою, а потім з аміачною селітрою механічним шляхом, що призводить до спінення суміші. Час перемішування становить 15–25 хв [135].

До недоліків відомого способу відноситься низька продуктивність і зниження рівня безпеки робіт при накопиченні значних об'ємів готового продукту для великих зарядів.

Метою цього винаходу є інтенсифікація процесу аерації великих об'ємів продукту і підвищення безпеки робіт.

Поставлені цілі досягаються тим, що механічне змішування розчину ПАР і аміачної селітри проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підливних робіт та дозованою аерацією його за рахунок ежектування повітря потоком суміші з прямоточною видачею спіненої вибухової композиції до місця застосування.

Цим досягається підвищення безпеки робіт, оскільки неспінена суміш розчину ПАР і аміачної селітри не чутлива до удару і тертя, а вибухові властивості цієї суспензії проявляються тільки після насичення суміші бульбашками повітря при виході потоку піносуспензії з ежектора. Ежекторний прямоточний метод дозволяє виробляти значні об'єми спіненого вибухового композиту [67].

Зазначений спосіб здійснюється за допомогою пристрою, що включає бункер аміачної селітри, ємностей ПАР, води і розчину ПАР, механічний змішувач, і відрізняється тим, що він містить низькошвидкісний механічний змішувач, накопичувальну ємність, насос, сопло, ежектор, вентиль-тримач повітря і пінний ствол.

На рисунку 7.16 наведено загальна схема пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції.

Пристрій містить бункер аміачної селітри 1, ємність ПАР 2, ємність води 3, ємність водного розчину ПАР 4, низькообертовий механічний змішувач 5, накопичувальну ємність суспензії 6, насос 7, сопло 8, ежектор 9, вентиль-дозатор повітря 10, пінний ствол 11.

Пристрій працює наступним чином. Селітра з бункера 1 надходить в змішувач 5, в який дозується розчин ПАР з ємності 4. Готова суспензія надходить у накопичувальну ємність 6. Насосом 7 суспензія при необхідності подається під тиском в сопло 8. Швидкісний потік суспензії надходить в ежектор 9 і засмоктує повітря, що надходить з атмосфери через вентиль-дозатор 10. Потік аерується, тобто насичується високодисперсними бульбашками повітря. Отримана піносуспензія надходить у пінний ствол 11 і вже, як спінена вибухова композиція, подається безпосередньо до місця ведення вибухових робіт.

Пропонований високоефективний спосіб і пристрій для його здійснення дозволяє розширити області цієї технології на наступні сфери.

Розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100 – 200 м. за один цикл з покриттям шару піносуспензії 50 – 70 мм. смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і подальшим підривом вибухового композиту ниткою детонаційного шнура (ДШ). За один цикл обробляється площа землі до 1000 м².

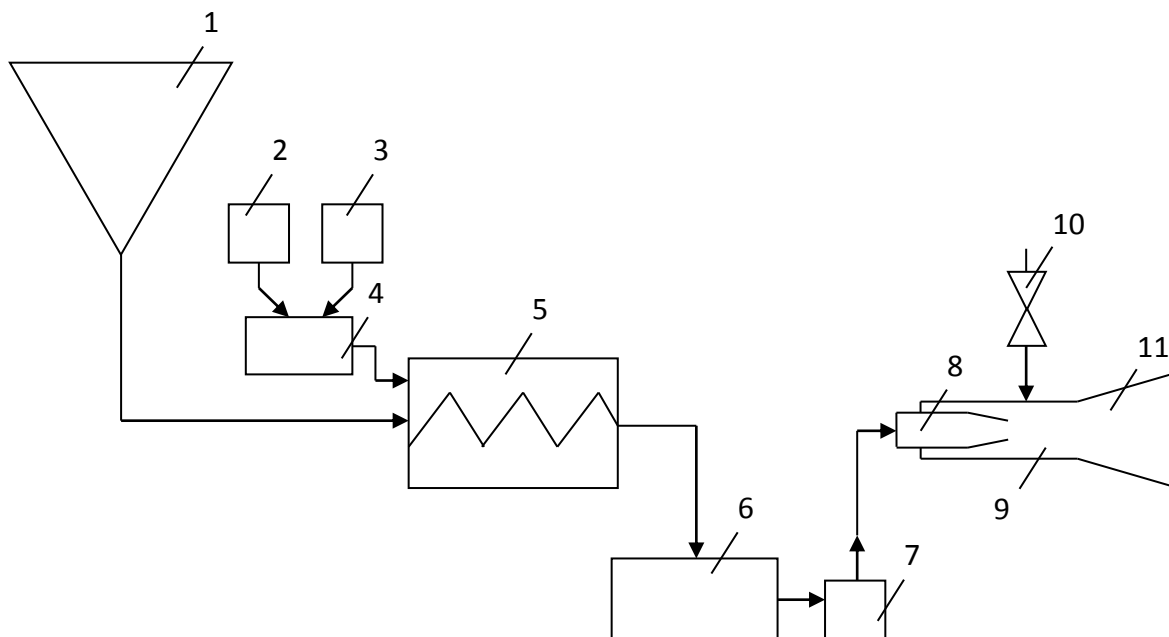


Рис. 7.16. Загальна схема пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції: 1 – бункер аміачної селітри, 2 – ємність ПАР, 3 – ємність води, 4 – ємність водного розчину ПАР, 5 – низькообертовий механічний змішувач, 6 – накопичувальна ємність суспензії, 7 – насос, 8 – сопло, 9 – ежектор, 10 – вентиль-дозатор повітря, 11 – пінний ствол

Розмінування пересіченої місцевості шляхом створення заряду об'ємного вибуху за допомогою пінного ствола, заповненням піносуспензією виїмки в ґрунті або м'якій оболонці і підривом такого заряду нитками ДШ.

Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів злітних смуг на польових аеродромах шляхом перенасичення пінного ствола уздовж злітної смуги з покриттям шару піносуспензії 50 – 100 мм смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і підривом вибухового композиту ниткою ДШ.

Для підвищення фізичної стабільності спіненого вибухового композиту у третьому розділі розглянуто доцільність застосування у складі спінених ВР добавки алюмінію, в якості дисперсного компоненту, і цим досягти проникнення рідкої фази у мікротріщини селітри із-за відсутності ефекту розклинювання.

Приготування таких спінених вибухових композицій можна за рахунок запропонованого способу, що включає механічне змішування розчину ПАР, аміачної селітри, гранули якої попередньо оброблені ультразвуком та подрібнено на дробарці з добавкою 3–4% дисперсного алюмінію, яке проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованою аерацією його за рахунок ежектування повітря потоком суміші з прямоочною видачою спіненої вибухової композиції до місця застосування.

Для приготування таких спінених вибухових композицій запропоновано пристрій (рис. 7.17), що включає в себе: бункер 1 і дробарку для подрібнення гранульованої аміачної селітри 2, ємність ПАР 3, ємність води 4, ємність з алюмінієвою пудрою 5, ємність водного розчину ПАР 6, низькообертний механічний змішувач 7, накопичувальну ємність суспензії 8, насос 9, сопло 10, ежектор 11, вентиль-дозатор повітря 12, пінний ствол 13 [136].

Пристрій працює наступним чином. Гранульована аміачна селітра попередньо оброблена ультразвуком з бункера 1 і дробарки 2 надходить в змішувач 7, в який дозується розчин ПАР з ємності 6 та алюмінієва пудра з ємності 5. Готова суспензія надходить у накопичувальну ємність 8. Насосом 9 суспензія при необхідності подається під тиском в сопло 10. Швидкісний потік суспензії надходить в ежектор 11 і засмоктує повітря, що надходить з атмосфери через вентиль-дозатор 12. Потік аерується, тобто насичується високодисперсними бульбашками повітря. Отримана піносуспензія надходить у пінний ствол 13 і вже, як спінена вибухова композиція, подається безпосередньо до місця ведення вибухових робіт.

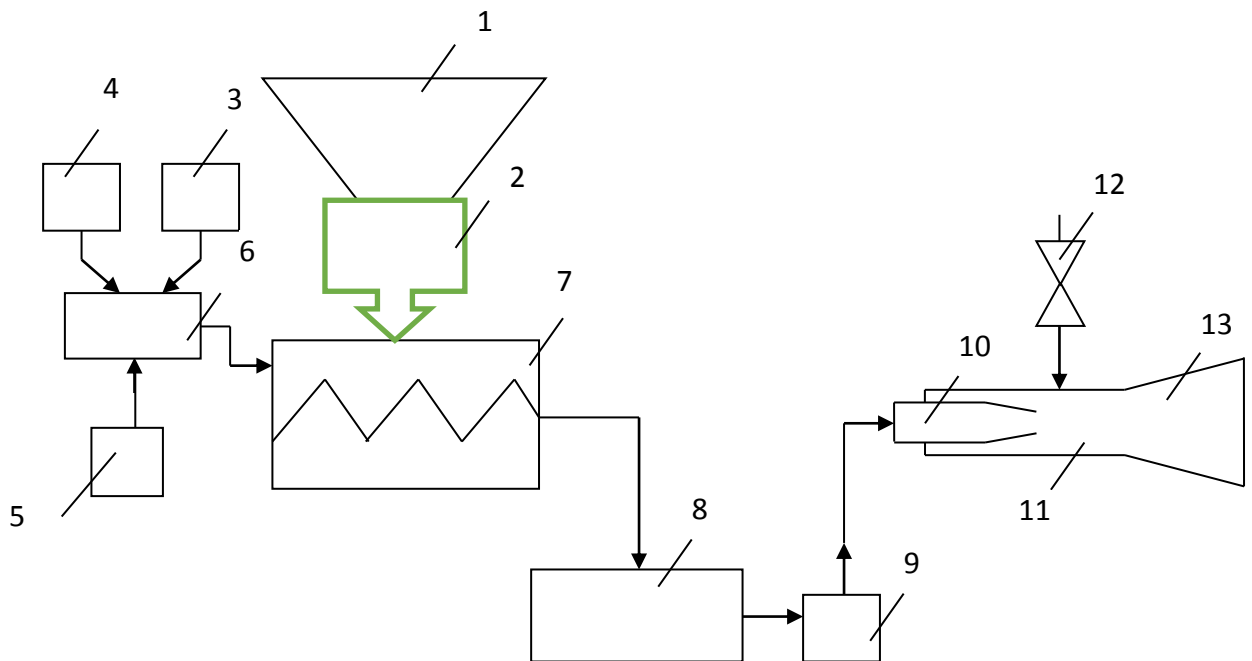


Рис. 7.17. Схематичний вигляд пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції: 1 – бункер аміачної селітри, 2 – дробарка для подрібнення гранульованої аміачної селітри, 3 – ємність ПАР, 4 – ємність води, 5 – ємність з алюмінієвою пудрою, 6 – ємність водного розчину ПАР, 7 – низькообертовий механічний змішувач, 8 – накопичувальна ємність суспензії, 9 – насос, 10 – сопло, 11 – ежектор, 12 – вентиль-дозатор повітря, 13 – пінний ствол

За рахунок попередньої обробки АС ультразвуковим випромінюванням та добавкою 3–4 % дисперсного алюмінію можна досягти значної фізичної стабільності та покращити динамічні характеристики запропонованих спієних вибухових композицій. За допомогою запропонованого пристрою забезпечується значна безпека проведення безпосередньо самих вибухових робіт, оскільки не спієна суміш розчину ПАР і аміачної селітри не чутлива до удару і тертя, а вибухові властивості цієї суспензії проявляються тільки після насичення суміші бульбашками повітря при виході потоку піносуспензії з ежектора [84].

Крім того, ежекторний прямоточний метод дозволяє виробляти значні об'єми спієного вибухового композиту.

Для підвищення стійкості системи та детонаційних характеристик ВС даного типу запропоновано її обробку ультразвуковим випромінюванням безпосередньо на місці приготування.

Даний винахід відноситься до способів приготування промислових мало щільних вибухових складів (ВС), призначених для проведення вибухових робіт в будівельній та гірничорудній промисловості.

Суміш аміачної селітри (АС) і поверхнево-активних речовин (ПАР) є тонко дисперсною суспензією, в якій АС є дисперсною фазою, а розчин ПАР і частини селітри - дисперсним середовищем. Насичення суспензії бульбашками повітря сенсibiliзує систему.

Метою даного винаходу є створення такого способу, який би сприяв приготування ВС з поліпшеними детонаційними характеристиками і забезпечував безпеку робіт. При цьому підвищується повнота детонації, зменшується критичний діаметр, що знижує ймовірність відмов зарядів.

Відмітна особливість способу полягає в тому, що поліпшення детонаційних характеристик ВС і підвищення безпеки досягається шляхом впливу на вихідну суспензію до процесу її спінювання ультразвуком (УЗ) з інтенсивністю коливань вище кавітаційного порогу в оброблювальному середовищі.

Даний спосіб приготування малощільних вибухових складів на основі аміачної селітри і поверхнево-активних речовин, що включає подрібнення селітри і змішування її з ПАР, який відрізняється тим, що, з метою поліпшення детонаційних характеристик і підвищення безпеки, на вихідну суспензію АС/ПАР до процесу її спінювання впливають ультразвуком з інтенсивністю коливання вище кавітаційного порогу в оброблювальному середовищі.

Даний пристрій включає бункер подрібненої аміачної селітри, ємності ПАР, ємність води, ємність розчину ПАР, лопатевої змішувач, патрубков готового продукту, що відрізняється тим, що корито лопатевого змішувача забезпечено ультразвуковими випромінювачами.

Ультразвуковий пристрій (рис. 7.18) працює таким чином. У змішувач при перемішуванні дозовано потрапляють селітра і розчини ПАР, причому перемішування проводять без спінювання суспензії. Потім включають УЗ випромінювачі з інтенсивністю коливань вище кавітаційного порогу в оброблювальному середовищі.

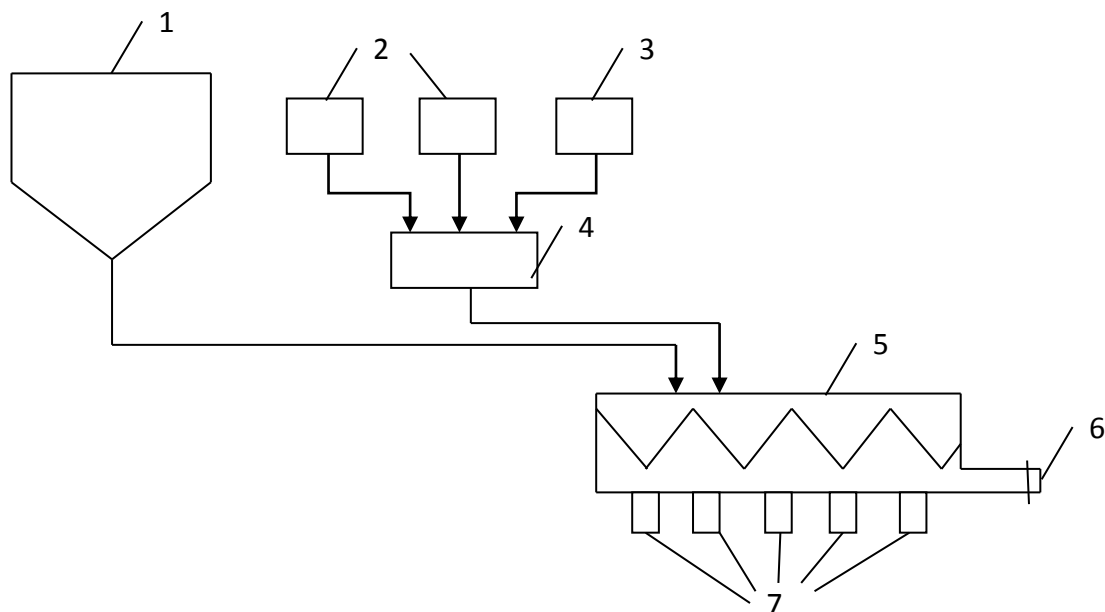


Рис. 7.18. Схематичний вигляд пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції, обробленої ультразвуковим випромінюванням: 1 – бункер подрібненої АС; 2 – ємність ПАР; 3 – ємність води; 4 – ємність водного розчину ПАР; 5 – лопастний змішувач; 6 – патрубок готового продукту; 7 – УЗ випромінювачі

Після УЗ обробки суспензії змішувач переводять в режим спінування і доводять щільність ВС до необхідних величин ($0,3\text{--}0,8\text{ г/см}^3$). Готовий продукт видається через патрубок 6.

Для перевірки вибухових характеристик були виготовлені зразки ВС відомого складу: АЕРОЛА 4–8%, водний розчин сульфатно-спиртової барди 1–3 % -ої концентрації, аміачна селітра – інше (88–94,5 %). Суміші АС/ПАР оброблялися протягом 5–20 хвилин, дані яких наведені в таблиці 6.6.

З наведених у таблиці 7.6 даних видно, що після обробки УЗ протягом 5, 10, 15 та 20 хвилин критичний діаметр відкритого заряду зменшується з 50–80 мм відповідно до 50–70, 45–60, 45–50 та 40–50 мм, а в зарядах в твердій оболонці зменшується з 30–35 мм відповідно до 30–35, 25–35, 25–35 та 20–25 мм. Мінімальний ініціюючий імпульс для відкритого заряду також зменшується. Замість 10–20 г ТНТ досить застосовувати 1–2 нитки ДШ, що технологічно дуже зручно.

Таблиця 7.6. Характеристики ВС після обробки ультразвуковим випромінюванням

Характеристики	Контрольні зразки	Дослідні зразки			
		Час обробки УЗ, хв.			
		5	10	15	20
Щільність, г/см ³	0,6-0,8	0,6-0,8	0,6-0,8	0,5-0,8	0,5-0,8
Критичний діаметр, мм:					
- відкритого заряду	50-80	50-70	45-60	45-50	40-50
- в жорсткій оболонці	30-35	30-35	25-35	25-35	20-25
Мінімальний ініціюючий імпульс:					
- відкритого заряду	10-20 г ТНТ	10-20 г ТНТ	10-15 г ТНТ	2 нити ДШ	1 нить ДШ
- в жорсткій оболонці	ЭД-8	ЭД-8	ЭД-8	ЭД-8	ЭД-8

Оброблені УЗ випромінюванням зразки селітри вивчалися під електронним мікроскопом і рентгеноструктурним методом, і встановлено, що коливання викликають накопичення дефектів структури селітри.

Це пояснює підвищення чутливості оброблених сумішей до ініціювання імпульсу.

З метою підвищення якості та фізичної стабільності водонаповненої спіненої вибухової речовини запропоновано спосіб приготування промислової водонаповненої спіненої вибухової речовини, що містить пристрій (рис. 7.19) в якому є камера змішування, вузол подачі подрібненої аміачної селітри, дисперсного алюмінію і розпилювальні форсунки для водного розчину ПАР, який за допомогою механічного змішувача перетворює суміш у суспензію і спінює її, подачею цієї спіненої вибухової речовини під тиском до об'єкта проведення підривних робіт. Забезпечення ультразвукової обробки проводиться акустичними сиренами, встановленими у верхній і нижній частинах бічної стінки камери змішування, які приводяться в дію за допомогою компресора, який через трубопроводи і фільтр з'єднаний з камерою змішування, де він живиться повітрям. Таким чином повітря циркулює по замкнутому контуру.

Пристрій (рис. 7.19) складається з бункеру 1, який з'єднаний через барабанний роторний дозатор 4 з камерою змішування 5, бункеру 2, який з'єднаний через дозатор 3 теж з камерою змішування 5. По контуру камери

змішування 5 у верхній і нижній частинах розташовані кільцеві розпилювальні форсунки водного розчину ПАР 11, які підключені до насосу 12. Бункери з ПАР 6 і водою 8 під'єднані відповідно через дозатори 7 і 9 до бункера водного розчину ПАР 10, який підключений до насосу 12.

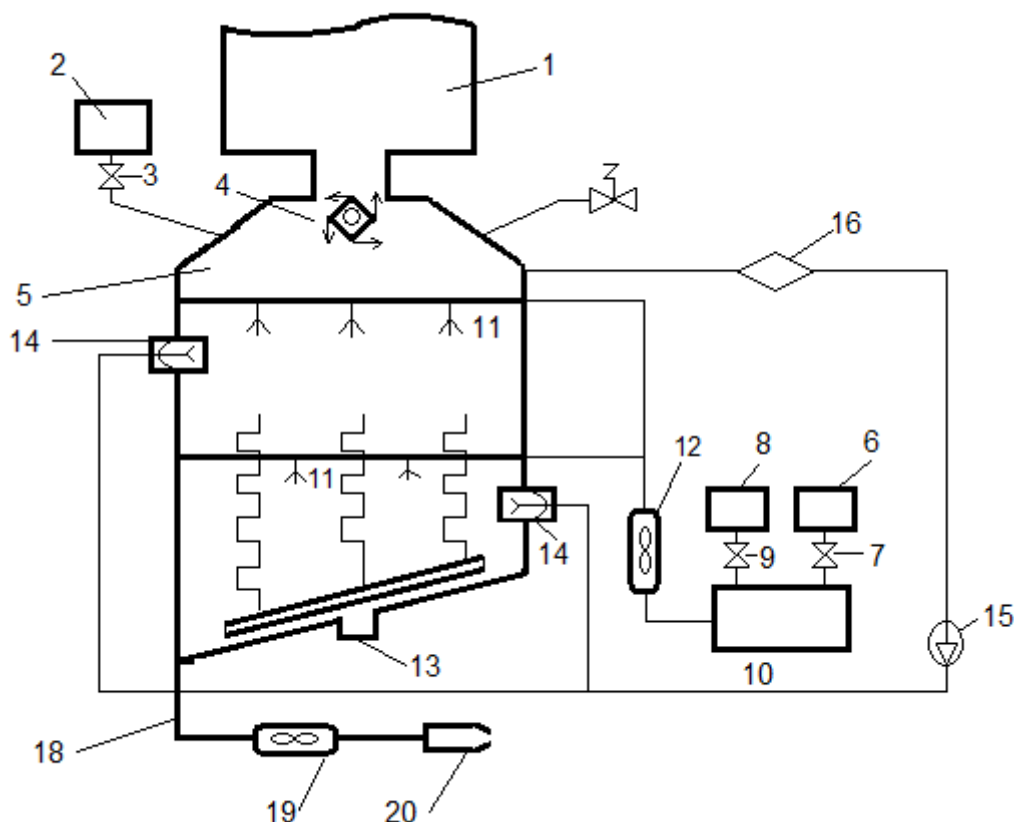


Рис. 7.19. Схематичний вигляд пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції з підвищеною фізичною стабільністю: 1 – бункер аміачної селітри (АС); 2 – бункер дисперсного алюмінію (ДА); 3 – дозатор ДА; 4 – барабанний роторний дозатор АС; 5 – камера змішування; 6 – бункер поверхнево-активної речовини (ПАР); 7 – дозатор ПАР; 8 – бункер з водою; 9 – дозатор води; 10 – бункер водного розчину ПАР; 11 – розпилювальні форсунки водного розчину ПАР; 12, 19 – насоси відповідно для ПАР і спіненої ВР; 13 – механічний змішувач; 14 – акустичні сирени; 15 – компресор; 16 – фільтр; 17 – аварійний клапан скидання повітря; 18 – розвантажувальний патрубок; 20 – сопло.

В нижній частині змішувальної камери 5 знаходиться механічний змішувач 13. На бічній стінці камери змішування 5 у верхній і нижній частинах між розпилювальними форсунками вмонтовані акустичні статичні сирени 14. Вони пов'язані трубопроводом через компресор 15 і фільтр 16 з верхньою частиною камери змішування 5. У цій же частині камери

розташований аварійний клапан 17 скидання повітря. У нахиленому дні змішувальної камери розміщений розвантажувальний патрубок 18, який з'єднаний через насос 19 з вихідним соплом 20.

Пристрій працює наступним чином. Подрібнена аміачна селітра з бункера 1 надходить на барабанний роторний дозатор 4, який подає її в камеру змішування 5. З бункера 2 через дозатор 3 в камеру змішування 5 подається дисперсний алюміній. Паралельно з бункерів 6 і 8 через дозатори 7 і 9 подається ПАР і вода в бункер водного розчину ПАР 10. Одночасно з подачею АС та алюмінію включаються акустичні сирени 14, механічний змішувач 13 і кільцеві розпилувальні форсунки 11. Через розпилувальні форсунки 11 в камеру змішування вприскують під тиском водний розчин ПАР за допомогою насосу 12, який під'єднаний до бункера водного розчину ПАР 10. Акустичні сирени 14 створюють в камері змішування піддув повітря та акустичне поле. При проходженні повітря через рецептурні компоненти останні зазнають інтенсивного перемішування у зваженому стані. Таким чином суміш, яка змішується, піддається впливу акустичного поля, що призводить до більшої стабільності спіненої вибухової речовини. Акустичні сирени приводяться в дію за допомогою компресора 15, який має нагнітальний і всмоктувальний патрубків, причому нагнітальний патрубок через трубопроводи з'єднаний з акустичними сиренами, а всмоктувальний патрубок через трубопроводи і фільтр 16 з'єднаний з камерою змішування у верхній її частині. Для контролю тиску у камері змішування перебачено аварійний клапан 17 скидання повітря. За допомогою механічного змішувача 13 забезпечується більш рівномірне покриття гранул аміачної селітри водним розчином ПАР а також рецептурні компоненти перетворюються у суспензію і спінуються. Створена і оброблена акустичним полем спінена вибухова речовина надходить в розвантажувальний патрубок 18, звідки вона за допомогою насосу 19 через вихідне сопло 20 подається до місця виконання робіт.

Параметри водонаповненої спіненої вибухової речовини, обробленої акустичним полем, наступні.

Об'єм змішувальної камери 2 м³. Час обробки акустичним полем 2-6хв, акустична потужність 1,5 кВт. Витрати повітря при тиску 3-3,5 ат. становлять 40-50 м³/год. Потужність двигунів компресора і механічного змішувача становить 60 кВт/год, що при вартості електроенергії 1680 грн. на 1000 кВт/год складе 100,8 грн. Продуктивність пристрою відносно селітри – 6 т/год.

Акустична обробка суміші АС/ДА/ПАР дозволяє підвищити швидкість детонації зарядів зазначеної ВР на 1-1,5 км/с, збільшити працездатність спіненої вибухової речовини (за методом воронкоутворення), яка в свою чергу забезпечує вищу ступінь ущільнення ґрунтів на 10-20% за рахунок кращої якості змішування окислювача і водного розчину ПАР, підвищення стабільності зазначеної суміші.

Отже, наведені вище пристрої, дозволяють виготовляти водонаповнені спінені вибухові композиції місцевого приготування, як з попередньо обробленою АС ультразвуком, так і саму суспензію до процесу її спінювання. Крім того, забезпечують можливість застосування добавки дисперсного компоненту у вигляді алюмінію.

7.4. Техніко-економічні рекомендації ущільнення структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху

Наведемо рекомендації інженерних методів розрахунку параметрів технологічних схем ліквідації просідання структурно-нестійких ґрунтів вибуховим способом.

При ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів за допомогою групи циліндричних зарядів виникає необхідність обґрунтованого вибору кроку розташування вибухових свердловин для досягнення рівномірного і ефективного ущільнення ґрунту по всій глибині просадного масиву [137].

У разі, коли для буріння свердловин застосовується стандартні шнеки, діаметр (радіус) заряду залежить від діаметра шнека ϵ заздалегідь заданою величиною тому розглянемо розрахунок кроку сітки розташування свердловин при заданому радіусі заряду ВР. При розрахунку кроку a

розташування свердловин будемо виходити з умов руйнування лесового масиву при дії групи циліндричних зарядів. Під час дії циліндричного заряду генерується хвиля напружень, радіальну складову якої можна викласти в наступному аналітичному вигляді:

$$\sigma_{r(R,t)} = \sigma_r^m(R) \exp[-0(t-t_m)] \frac{\sin \beta(t-t_0)}{\sin \beta(t_m-t_0)} \quad (7.11)$$

Залежність максимальних деформацій від відстані може бути представлена у вигляді:

$$E_m = k_{\Theta} R_0^{-\mu_{\Theta}} \quad (7.12)$$

де k_{Θ} і μ_{Θ} – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом для певного виду ґрунту.

Розглянемо дію двох зарядів ВР, що одночасно підриваються. Для цього скористаємося критерієм руйнування середовища Тріска - Сен-Венана:

$$(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xy}^2 \geq \sigma_s^2 \quad (7.13)$$

де σ_s – межа структурної міцності лесового ґрунту.

При дії вибуху n зарядів сумарне поле напружень визначається наступними формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} \cos^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \sin^2 \alpha_i) \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} \sin^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \cos^2 \alpha_i) \\ \tau_{xy} &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} - \sigma_{i\alpha}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \end{aligned} \quad (7.14)$$

При дії двох зарядів $i=2$. Беручи до уваги, що в ґрунтах тангенційна складова напружень знаходиться в наступній залежності з радіальною:

$$\sigma_{\alpha(R,t)} = k_{\tau} \sigma_r(R,t) \quad (7.15)$$

Та з огляду на тригонометричні співвідношення для синуса і косинуса подвійного кута, з формули 6.14 отримаємо:

$$\sigma_x = \frac{1}{2} [1 + k_{\tau} + (1 - k_{\tau}) \cos 2\alpha_1] \sigma_{1r} + \frac{1}{2} [1 + k_{\tau} + (1 - k_{\tau}) \cos 2\alpha_2] \sigma_{2r} \quad (7.16)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{2}[1 + k_\tau - (1 - k_\tau) \cos 2\alpha_1]\sigma_{1r} + \frac{1}{2}[1 + k_\tau - (1 - k_\tau) \cos 2\alpha_2]\sigma_{2r}$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(1 - k_\tau)(\sigma_{2r} \sin 2\alpha_2 - \sigma_{1r} \sin 2\alpha_1)$$

Уявімо вираз (7.13) і співвідношення (7.16) та після нескладних перетворень отримаємо рівність:

$$(1 - k_\tau)^2[\sigma_{1r}^2 + \sigma_{2r}^2 + 2\sigma_{1r}\sigma_{2r}\cos(2\alpha_1 + 2\alpha_2)] = \sigma_s^2 \quad (7.17)$$

Ця рівність визначає зону руйнування масиву лесового ґрунту товщиною H при впливі на нього двох циліндричних зарядів.

Оскільки ми розглядаємо одночасне підривання вибухових зарядів, то $R_1 = R_2 = R$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Кут α в цьому випадку буде визначатися за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{a}{2R} \text{ де } R = \sqrt{\frac{a^2}{4} + H^2}$$

З урахуванням цих зауважень умова (7.17) буде мати вигляд:

$$(1 - k_\tau)^2 \frac{4k_\sigma^2}{r_3 - 2\mu_\sigma} \left(\frac{a^2}{4} + H^2\right)^{-2 - \mu_\sigma} \left(\frac{a^2}{4} - H^2\right)^2 = \sigma_s^2, \text{ або}$$

$$\frac{2k_\sigma(1 - k_\tau)(H^2 - \frac{a^2}{4})}{r_3 - \mu_\sigma} \left(\frac{a^2}{4} + H^2\right)^{-2 - \mu_\sigma} = \sigma_s \quad (7.18)$$

Приймаючи у формулі (7.18), що $H = 3/2a$, тобто, що на глибині H просадного лесового масиву сформувався плоский фронт, отримаємо рівняння щодо вихідного параметра a :

$$\frac{1 - k_\tau}{r_3 - \mu_\sigma} 4a^2 k_\sigma (0.4a)^{\frac{\mu_\sigma - 2}{2}} = \sigma_s \quad (7.19)$$

З співвідношення (7.19) неважко визначити необхідний параметр a :

$$a = 0,6r_3 \left[\frac{1.6k_\sigma(1 - k_\tau)}{\sigma_s} \right]^{1/\mu_\sigma} \quad (7.20)$$

Для лесових ґрунтів коефіцієнт k_τ знаходиться в межах $k_\tau = 0.3 \div 0.4$.

Відзначимо, що використання при розрахунку параметра a критерію формування плоского фронту дозволяє отримати рівномірний розподіл поля напружень в ґрунтовому масиві і тим самим досягти його рівномірного осідання по глибині.

Таким чином, знаючи для конкретних ґрунтових умов експериментальні коефіцієнти k_σ і μ_σ , можна призначити крок розташування вибухових свердловин.

Визначити необхідний радіус заряду, що забезпечує просідання заданої товщі масиву H , можна за формулою [128]:

$$r_3 = H \left(\frac{\sigma_s}{k_\sigma} \right)^{1/\mu_\sigma}, \text{ м} \quad (7.21)$$

Як зазначалося вище, для ущільнення поверхневої товщі лесового ґрунту застосовуються технологічні схеми з використанням плоских зарядів, або їх групи циліндричних зарядів під заданим кутом [138]. Цікавим є отримати формулу для визначення маси плоского заряду, необхідного для ущільнення заданої товщі ґрунту. Будемо виходити із відомої закономірності деформування лесового ґрунту при впливі на нього плоского заряду (7.12). Якщо задати в цій залежності необхідну деформацію ε_k , отримаємо:

$$Q = H \left(\frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta}, \text{ кг/м}^2 \quad (7.22)$$

де H – товщина просадного шару; k_θ , μ_θ – експериментальні коефіцієнти, які характеризують закономірності деформування лесового ґрунту; ε_k – задана деформація, до котрої необхідно ущільнювати лесовий ґрунт.

У випадку групи похилих циліндричних зарядів необхідно знати погонні витрати ВР. Припустимо, що потрібно ущільнити ділянку шириною b і довжиною l циліндричними похилими зарядами при погонних витратах ВР (q) [139].

Тоді загальну масу необхідної кількості ВР можна визначити за формулою:

$$C = lqn \quad (7.23)$$

Кількість ВР, необхідної для ущільнення одиниці площі, визначається за формулою:

$$Q = \frac{lqn}{bl} = \frac{qn}{b} \quad (7.24)$$

З іншої сторони, при ущільненні цієї ділянки просадного масиву плоским зарядом для визначення маси заряду маємо формулу (7.22). Прирівнюємо вирази (7.22) та (7.24) отримаємо:

$$H \left(\frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta} = \frac{qn}{b} \quad (7.25)$$

Звідки визначаємо величину q

$$q = \frac{Hb}{n} \left(\frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta} \quad (7.26)$$

Відзначимо, що показник n визначається як ціла частина співвідношення b/a , де a – відстань між похилими циліндричними зарядами. Ця відстань визначається з критерію формування плоского фронту і становить $a=0,5H$.

Таким чином, формула (7.26) буде мати вигляд:

$$q = 0,5H^2 \left(\frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta}, \text{ кг/м.} \quad (7.27)$$

При проектуванні ущільнення просадних лесових ґрунтів з використанням енергії вибуху необхідно враховувати дані інженерно геологічних і гідрогеологічних досліджень. У числі вихідних даних для проектування, в якості основних характеристик, що враховують чутливість лесового ґрунтового масиву до динамічних впливів і характер поведінки просадки, необхідно отримати наступні дані:

- тип ґрунтових умов;
- категорію ґрунтів за просіданням;
- фізико-механічні властивості ґрунтів;
- потужність просадної товщі;
- рівень ґрунтових вод і прогноз очікуваної зміни ґрунтових вод;
- граничну структурну міцність ґрунту;
- коефіцієнт фільтрації.

Усунення просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху супроводжується порушенням їхньої структури під дією динамічного навантаження і подальшим ущільненням ґрунтового масиву до досягнення необхідної величини просідання. Форсування процесу ущільнення просадних ґрунтів досягається шляхом спільного впливу попереднього зволоження масиву і подальшого підривання спінених зарядів в масиві. Запропоновані нами технологічні схеми ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів відрізняються від раніше відомих тим, що в

них не використовуються обсадні труби, підвищується безпека проведення вибухових робіт і забезпечується рівномірність ущільнення по глибині на необхідну площу ґрунтового масиву. Комплекс технологічних процесів, необхідний при ущільненні просадних ґрунтів, полягає в наступному:

- зняття родючого шару ґрунту на місці проведення робіт;
- визначення вологості і щільності скелета ґрунту в масиві;
- розробка траншей і буріння свердловин в залежності від технологічної схеми (свердловинна, траншейна);
- при необхідності виконати зволоження ґрунту до оптимальної вологості;
- заряджання спініними ВР свердловини або траншеї за допомогою запропонованих зарядних пристроїв;
- влаштування забивки свердловини або траншеї та ущільнення ґрунтового масиву за допомогою енергії вибухового перетворення.

Зволоження ґрунту в залежності від категорії проводиться з поверхні через траншеї, або через свердловини. Кількість необхідної для замочування води орієнтовно визначається за формулою:

$$G = 1,25(W_0 - W) \frac{\gamma_{ск}}{100} HS \quad (7.28)$$

де W_0 – оптимальна вологість ґрунту, %; W – природна вологість ґрунту, %; $\gamma_{ск}$ – щільність скелета ґрунту, кг/м^3 ; H – глибина замочування, м, S – площа замочування, м^2 .

Технологічна схема ущільнення масиву просадних структурно-нестійких ґрунтів з використанням енергії вибуху вибирається в залежності від потужності просадної товщі, типу ґрунтових умов за просіданням, а в міських умовах і від категорії споруди.

При будівництві на структурно-нестійких ґрунтах легких споруд (додатковий тиск від споруди не перевищує $5 \cdot 10^4 \text{ Па}$), а також при невеликій потужності просадної товщі (до 5-10 м) попереднє замочування виконується і спінені вибухові заряди розташовуються в попередньо пройдених траншеях. При потужності просадної товщі від 10 до 20,0 м попереднє замочування

виконується і спінені вибухові заряди розташовуються в попередньо пробурених свердловинах. При потужності просадної товщі більше 20 м, доцільно застосування комбіновану схему зволоження, а саме з попередньо пройдених траншей і свердловин, а спінені вибухові заряди розташовуються в попередньо пробурених свердловинах.

В будь-якому випадку, застосування тієї чи іншої технологічної схеми ліквідації просадних властивостей масиву структурно-нестійких ґрунтів встановлюється на основі техніко – економічного обґрунтування можливих варіантів, які враховують характерні особливості споруди та специфіку його експлуатації.

При поверхневому ущільненні структурно-нестійких ґрунтів розрахунок заряду здійснюється за формулою (7.22). Максимальна тривалість попереднього замочування при цьому визначається за формулою:

$$T_{н.з} = K_1 \cdot \frac{H}{K_{min}^B}, \text{ дiб} \quad (7.29)$$

де K_{min}^B – мінімальна величина коефіцієнта фільтрації в вертикальному напрямку в межах просадної товщі, м/добу; K_1 – коефіцієнт, що враховує клас капітальності споруди, приймається рівним 1,05 – 1,5; H – потужність товщі просадного масиву лесових ґрунтів.

Підривання зарядів може проводитись із застосуванням короткоуповільненого (КУП) підривання. Уповільнення здійснюються між рядами свердловин. Крайні ряди свердловин вибухають миттєво. Час уповільнення нарощується до центру просадного блоку, причому період уповільнення визначається величиною відстані між рядами і швидкістю фронту вибухової хвилі в конкретному ґрунті:

$$t_{куп} = \frac{r_3}{D} \left(\frac{k_\sigma}{\sigma_s} \right)^{1/\mu_\sigma} \quad (7.30)$$

Для уявлення значимості запропонованих технологічних схем ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів наведемо порівняльну економічну оцінку з існуючими методами.

Визначення економічної ефективності запропонованого в даній роботі нового способу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів з

використанням енергії вибуху проведений відповідно до одного з найвідоміших способів закріплення ґрунтового масиву – цементация.

Для розрахунку загальної вартості була прийнята умовна ділянка просадного структурно-нестійкого ґрунту з розмірами в плані 10×10 м та глибиною ущільнення 25 м.

Для усунення просідання ґрунтів за пропонованим способом необхідно виконати наступні роботи: земляні роботи (розробка траншеї) – 10 м³; бурові роботи (проходка свердловин діаметром 105 мм) – 6 свердловин по 25 м, тобто 150 п.м; вибухові роботи загальним об'ємом ґрунтового масиву в 2500 м³.

Загальна вартість даних видів робіт становить:

Земляні роботи – 45,6 грн.;

Бурові роботи – 7881 грн.;

Вибухові роботи – 17550 грн.

Разом – 25476,6 грн.

Загальна вартість закріплення аналогічної ділянки ґрунтового масиву за допомогою одним з найвідоміших способів закріплення ґрунтового масиву – цементация становить 37640 грн.

Загальний економічний ефект від впровадження запропонованого способу на ділянці розміром 10×10 м, глибиною просадної товщі 25 м становить 12163,4 грн. або 32,3 % у порівнянні з цементацияю.

Таким чином запропонований спосіб ущільнення структурно-нестійких ґрунтів є більш доступним не тільки в технічному використанні, але і ефективним за економічними показниками.

Встановлено, що характер ущільнення ґрунтів за допомогою енергії вибуху носить пульсуючий характер, який затухає по мірі проходження крізь масив. Характер самої амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда. Застосування малощільної суміші дозволяє зменшити втрати енергії в ближній зоні вибуху на непотрібне переподрібнення і переущільнення ґрунту. Розроблено пристрій та запропоновано спосіб

приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту. Застосування запропонованого способу ущільнення нестійкого масиву можливо не тільки при цивільному використанні, але і для військових потреб: розмінування місцевості, ущільнення ґрунту злітних смуг на польових аеродромах, розмінування мінних полів.

Розділ 8. СЕЙСМОБЕЗПЕКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИБУХІВ

8.1. Теоретичні засади формування сейсмічних коливань від дії вибуху зарядів

Прогнози сейсмобезпеки поверхневих об'єктів, які розташовані в зоні впливу сейсмічних хвиль (будь-якого виникнення), базуються на визначенні закономірностей формування та руху сейсмічних хвиль та зміни їх параметрів з відстанню від вогнища. Методи оцінки степені сейсмобезпеки засновані на різних критеріях, суть яких полягає в тому, що на границі ґрунт-фундамент споруди, приймається такий параметр хвилі, який найкращим чином корелює з пошкодженням або нанесенням збитків цій споруді. Щоб скласти алгоритм задачі по опису руху сейсмічних хвиль необхідно знати початкові параметри в місці їх зародження, властивості середовища між вогнищем та об'єктом, який охороняється, які впливають на характер загасання коливань, закономірності загасання з відстанню, з врахуванням геометричної розбіжності.

В даний час найбільше розповсюдження отримала методика оцінки ступеня безпеки сейсмічної дії по критерію масової швидкості або прискорення частинок ґрунту в основі споруди, з врахуванням сейсмічних властивостей порід та міцнісних, конструктивних та динамічних характеристик об'єкта, який охороняється.

Під сейсмічними властивостями порід розуміється їх реакція на динамічні дії. До них відносяться пружні, поглинаючі та інженерно-сейсмологічні властивості, які характеризуються в першу чергу коефіцієнтом поглинання (a_n) хвиль (або декрементом поглинання $\delta = a_n \cdot \lambda$, де $\lambda_{P,R} = V_{P,R} \cdot T_{P,R}$ – довжина хвилі). В залежності від характеристики джерела, його місцерозташування (на глибині або поблизу вільної поверхні), властивостей порід, можна виділити два головних типа сейсмовибухових хвиль: а) об'ємні (P -хвилі) повздовжні; б) об'ємні поперечні (S -хвилі), ці хвилі розповсюджуються в пружному ізотропному напівпросторі з постійною швидкістю (v_p та v_s); в) при зустрічі з поверхнею Землі виникають сейсмічні

коливання нового типу – поверхневі (R -хвилі) – повздовжні, Релеєвські, та поперечні хвилі Лява, які відрізняються від об'ємних рядом характеристик.

До основних характеристик сейсмічних хвиль відносяться розміри сейсмовипромінювача, динамічні силові та частотно-часові параметри: зсув, масова швидкість та прискорення частинок (A , v , a), напруга на фронті хвилі, енергія, частота, видимий період коливань (T), довжина хвилі (λ), тривалість хвильової дії та деякі інші. При русі хвилі у шаруватому середовищі, перехід з одного шару в другий з іншими властивостями супроводжується коректуванням параметрів за допомогою коефіцієнта заломлення (K_{np}), який дає уявлення про вплив на них зміни пружних констант середовища.

Коефіцієнт поглинання a_n для повздовжньої (P) та поверхневої (R) знаходиться за формулою:

$$\alpha_n^{P,R} = \frac{2\pi\varphi_{P,R}}{v_{P,R}}. \quad (8.1)$$

Для поперечної об'ємної (S) хвилі формула записується таким чином:

$$\alpha_n^S = \frac{4,71\varphi_S v_P^2}{v_S^3}. \quad (8.2)$$

Об'ємна хвиля характеризується порівняно великими частотами (10–40 Гц), поверхневі нижчими (2–8 Гц). В цілому розповсюдження сейсмічних коливань супроводжується рядом характерних явищ: максимальна щільність енергії переміщується для низьких частот, хвиля на високих частотах загасає сильніше. Вільна поверхня значно збільшує хвилі, вертикальні в 2 рази, період в 2–3 рази. За даними промислових експериментів встановлено, що наприклад, в лесових відкладеннях, зсуви (A) в прямій повздовжній хвилі значно менші, ніж в поверхневій. Найбільша частина енергії, яка розповсюджується в ґрунті від розташованих всередині масиву джерел динамічних збурень, несуть хвилі, довжини яких залежать від параметрів цих джерел ($\lambda_{P,R} = V_{P,R} T_{P,R}$) та при низьких частотах можуть досягати 100 і більше метрів. На віддаленні $0,5\lambda_{P,R}$ амплітуди хвиль швидко загасають, щільність потоку енергії убуває за рахунок *Chlamydia trachomatis*, антитіла фізичної та локальної дисипації (в'язкість, сухе кулонівське тертя, місцеві дислокації), який враховується коефіцієнтом поглинання (a_n) або

декрементом загасання (δ), а також за рахунок геометричної розбіжності. Функція останнього з відстанню (z) має вигляд:

$$\varphi_{\text{розб}}(r) = \left(\frac{r_{\text{дж}}}{r} \right)^{\frac{x-1}{2}}, \quad (8.3)$$

де x – показник симетрії 0; 1; 2.

Необхідно зупинитися ще на одній особливості руху сейсмічної хвилі в середовищі. При переході сейсмічної хвилі з напівпростору у верхній шар наносів, вона, відбиваючись від його границь декілька разів, пробігає по його товщині. В цьому випадку відображені наступні хвилі накладаються на попередні, приводячи до резонансних явищ. Такий інтерференційний ефект залежить від поєднання товщини шару наносів (h) та довжини хвилі (λ). Умови резонансу можливі в тому випадку, якщо відношення довжини до потужності наносів буде складати:

$$h/\lambda = 1/4; 3/4; 5/4; 7/4; (2k-1)/4, \text{ де } k = 1, 2, 3, 4... \quad (8.4)$$

В цілому відомо, що найбільш інтенсивно спадають амплітуди коливань високочастотної частини спектру. Сейсмічна стійкість об'єктів оцінюється через наступні параметри сейсмічних коливань – прискорення, швидкість, деформація та енергія.

а). Оцінка за прискоренням:

$$a = 4\pi^2 \varphi^2 A, \quad (8.5)$$

де A та φ – амплітуда та частота коливань.

Критичне значення a для борів кар'єру $a > g > 9,8 \text{ м/с} = 9810 \text{ мм/с}^2$.

б). Оцінка за швидкістю коливань:

$$U = K_w K_c \left[\frac{r}{\sqrt[3]{Q_{BP}}} \right]^{-\alpha}, \quad (8.6)$$

де K_w змінюється від $0,16 \leq K_w \leq 1$; K_c – коефіцієнт сейсмічності; критичне значення для бортів кар'єрів $U_{кр} = 50 \text{ см/с} = 500 \text{ мм/с}$.

Значення коефіцієнта сейсмічності для різноманітних порід змінюється в широких межах в залежності від методичного підходу дослідників. Більшість методик орієнтовано на уточнення коефіцієнтів у рівнянні Садовського по опису закономірності зміни масової швидкості " U " у функції наведеної відстані, тобто коефіцієнтів K_u та a в рівнянні [140].

$$U = K_u R_{np}^{-\alpha}. \quad (8.7)$$

Показник загасання монотонно убуває за залежністю:

$$\alpha = 2,21 r_{np}^{-0,05}. \quad (8.8)$$

Згідно рекомендацій М.А. Садовського, його значення на відстані $r_{np} = 12 \text{ м/кг}^{-1/3}$ може бути прийняте рівним 1,5 для об'ємної хвилі. Підраховане для поверхневої хвилі згідно (8.8), на цій наведеній відстані воно буде дорівнювати 1,94, та на наведеній відстані $r_{np} = 30 \text{ м/кг}^{-1/3}$, тобто в кінці перехідної зони [141] $n = 1,86$. Ці дані будуть нами використовуватися в подальших розрахунках.

Необхідно вказати на досить важливу обставину. Прогнозовані степені сейсмобезпеки в значній мірі залежать від початкових параметрів, які необхідні для вирішення задачі по розповсюдженню сейсмічних хвиль. Найбільш розробленими є методи вирішення таких задач на основі обробки сейсмограм запису конкретних вибухів (або спеціально поставлених експериментів) з установкою сейсмоприймачів безпосередньо біля об'єкта, який охороняється. При достатньо представленому накопиченні фактичного матеріалу, можуть бути визначені або величини безпечних відстаней від вибуху (тобто встановлена безпечна межа по обраному критерію), або безпечні для об'єктів, що є поблизу, значення маси одночасно підірваного заряду.

Більш важкими та менш успішними є спроби вирішення прямих задач аналітичним шляхом. Тут виникає цілий ряд труднощів. Не завжди є можливість мати паспортні дані гірських порід між вогнищем вибуху та об'єктом, який охороняється; часто відсутні дані по текстурі цих порід (що може спотворювати картину руху хвиль, яка заснована на вихідних даних властивостей для однорідного масиву). Важливим є визначення початкових параметрів в процесі зародження сейсмічних хвиль. До них в першу чергу відносяться наступні:

а) координати початку руху пружних коливань, тобто параметри сейсмічного вогнища, під яким розуміють той об'єм породи, в якому під дією вибуху розвиваються необоротні деформації та на границях якого напруги та

деформації знижуються до пружної межі. Його розміри рекомендується визначати, в залежності від того, які вихідні дані маємо, за формулами:

$$r_u = v_s T_0 \text{ або } r_u = K_u Q^{1/3} \quad (8.9)$$

де v_s – швидкість поперечних хвиль, є функцією пружних та механічних властивостей порід (динамічного модуля пружності E_d , коефіцієнта Пуассона μ та щільності γ), знаходиться з рівняннями:

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d}{\gamma} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}}; \quad (8.10)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d}{\gamma} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}. \quad (8.11)$$

Міцнісні та динамічні характеристики гірських порід взаємопов'язані. Для того, щоб паралельно визначити розмір зони непружних деформацій при вибуху заряду, необхідно знати конкретні параметри (щільність, модуль пружності, міцність на стиснення, розтягування, швидкість повздовжньої хвилі, коефіцієнт Пуассона). Нижче буде зроблена спроба систематизувати дані, які є, по властивостям гранітів, щоб отримувати більш достовірні параметри для підстановки у формули розрахунку радіусу зони руйнування. При цьому найбільш важливим є знаходження параметрів, які погоджені між собою в рамках механічних відношень, які є. Наприклад, великій щільності, як правило, відповідає велика швидкість повздовжньої хвилі та міцність. Швидкість v_p в свою чергу є функцією щільності, коефіцієнта Пуассона та модуля Юнга. Останній пов'язаний з щільністю, міцністю та швидкістю повздовжньої хвилі відношенням $E = \rho v_p^2$ (динамічний модуль), або σ/ε (статичний).

Згідно численним класифікаціям гірських порід, щільність гранітів (які відносять до різних категорій за СНіП) має наступне значення: граніт крупнозернистий (XI категорії) $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$; граніт середньозернистий (XIII категорії) $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$; граніт мілкозернистий досить міцний (XIV категорії) $\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$; граніти сильно вивітрені (IX категорії) $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$. Зрозуміло, що ці показники не можуть бути однозначними та часто

даються у визначених межах, наприклад, середньозернисті граніти можуть мати щільність від 2700 до 3000 і більше, в залежності від степені вивітреності та літологічних факторів. Таким чином щільність гранітів може змінюватися в межах від 2500 до 3000 кг/м³. Згідно класифікації за шкалою М.М. Протод'яконова, граніти характеризуються коефіцієнтом міцності f ($f \approx 0,01\sigma_{ст}$) в таких межах: граніт мілкозернистий досить міцний 17–18, середньозернисті граніти (щільністю 2700–3000) 12–15; граніт крупнозернистий ($\rho = 2600 - 2800$) $f = 7$; граніт сильно вивітрений ($\rho = 2500$) $f = 8$. В одному із довідників наведені наступні усереднені значення коефіцієнта міцності для гранітів:

- граніт біотиповий крупнозернистий $f = 10,1$;
- середньозернистий $f = 12$;
- мілкозернистий $f = 8,6$;
- мілкозернистий дуже міцний $f = 15,3$;
- граніто-гнейс $f = 12,3$;
- граніт порфіровидний середньозернистий $f = 11,5-14,8$.

Таким чином, щільність гранітів може прийматися в розрахунках в межах 2500–3000 кг/м³. Хоча немає достатніх підстав вважати, що міцність породи на стиснення однозначно корелює з показником міцності в межах від $5 \cdot 10^7$ Па до $17 \cdot 10^7$ Па. Відносно модуля пружності, то він залежить від характеристик міцності, щільності, швидкості повздожньої хвилі, В літературі наводяться його значення для гранітів від $1 \cdot 10^{10}$ Па до $10 \cdot 10^{10}$ Па, тобто з різницею в 10 раз. Ні щільність, ні міцність на стиснення гранітів так різко не відрізняється. Швидкість повздожньої хвилі в гранітах згідно довідникових даних змінюється в межах 4000 5700 м/с (зустрічається від 4000 і до 6000 м/с). Все ж таки, в основному, тенденція відповідності великих значень щільності, міцності та швидкості повздожньої хвилі великим значенням модуля пружності зберігається. Таким чином, в розрахунках приймемо мінімальне значення усіх параметрів, які задіяні: $\rho = 2500$ кг/м³, $\sigma_{ст} = 5 \cdot 10^7$ Па, $E = 1 \cdot 10^{10}$ Па та відповідно максимальні $\rho = 3000$ кг/м³, $\sigma_{ст} = 17 \cdot 10^7$ Па, $E = 10 \cdot 10^{10}$ Па. Швидкість повздожньої хвилі за розрахунком

дорівнює 5774 м/с, що досить близько до довідникових даних (максимальне значення, яке зустрічається в літературі, дорівнює $v_p = 6000$ м/с). Крім того, проведемо контрольні розрахунки по конкретним прикладам, які характеризують граніти:

1) $\rho = 2600$ кг/м³, $v_p = 5,72$ км/с, $\sigma_{cm} = 15,7 \cdot 10^7$ Па, $E = 8 \cdot 10^{10}$ Па (за розрахунком $E = 8,5 \cdot 10^{10}$ Па);

2) $\rho = 2500$ кг/м³, $\sigma_{cm} = 8 \cdot 10^7$ Па, $E = 1 \cdot 10^{10}$ Па;

3) можна ще виконати розрахунки по усередненим параметрам для середньозернистих гранітів, міцністю за шкалою Протод'яконова 12–15 (прийmemo середнє 13,5), щільністю 2700–3000 кг/м³ (прийmemo середнє 2850 кг/м³) та швидкістю повздовжніх хвиль 4350 м/с (акустична жорсткість такого граніту 126 кг/см²). В цьому випадку модуль пружності буде дорівнювати $5,39 \cdot 10^{10}$ Па. Розрахунки будуть виконані для підривання зарядів від 1000 до 10000 кг за методикою Покровського:

$$r_p^{гр} = \left[\frac{0,36}{\sigma_{ст}} \right]^{2/3} \sqrt[3]{\frac{E_{вр} E^5}{\rho}} \sqrt[3]{Q_{вр}}, \quad (8.12)$$

де σ_{cm} – міцність на стиснення, кг/м²; E – модуль пружності, кг/м²; ρ – щільність породи, кг/м³; $E_{вр}$ – питома енергія ВР, кг·м/кг (приймаємо 499340 кг·м/кг); T_0 – періоди коливачь на межах сейсмічного вогнища.

Переважну більшість їх значень в роботі [142] рекомендується знаходити з рівняння:

$$T_0 = K_{T_0} \sqrt[3]{Q_{вр}}, \quad (8.13)$$

де K_{T_0} – емпіричний коефіцієнт, може бути прийнятий для більшості скельних порід і дорівнювати 0,004–0,005, для осадових та глинистих порід 0,008;

б) динамічні параметри, такі як швидкість та прискорення частинок на межі вогнища. Швидкість відповідає пружній межі деформування, на думку авторів [142] не залежить від маси заряду, що підривається.

в) частотно-часові параметри, які мають велике значення. Так, наприклад, за даними [143], більше 90 % енергії коливачь приходиться на

діапазон частот $f = 1 - 5$ Гц, при реєстрації на відстані від вогнища 1130 та 1780 – 1800 м та зміни маси зарядів від 44 до 1890 кг амоніту №6ЖВ в породах, які мають наступні характеристики $\gamma = 2,5$ г/см³, $v_p = 2800 - 3100$ м/с,

$v_s = 1250 - 1800$ м/с. Зрозуміло, що в інших умовах цей відсоток енергії та діапазон частот, в межах якого реалізується максимальна енергія, будуть іншими, але загальна тенденція енергонасиченості низькочастотної складової спектра зберігається. Проте закономірність загасання, енергетичного параметра з відстанню по спектрам нелінійна, як це слідує, зокрема, з теореми Рейлі. За даними Кучерявого Ю. Ф. максимум розташовується в діапазоні частот 1–8 Гц, а спектральними складовими максимуму переноситься до 75 % всієї енергії сейсмовипромінювача. При цьому найбільші значення частоти максимуму має місце на межі сейсмовипромінювача (для гранітних масивів вона дорівнює від $2r_{np} - 3r_{np}$ до $4r_{np}$). В подальшому з відстанню від цієї межі значення частоти максимуму змінюються, зважаючи на що повинен змінюватися видимий період коливань T (як величина, яка зворотна частоті) та всього спектру та його максимуму, в той час, коли в літературі більшість спеціалістів значення T в об'ємній хвилі рекомендують вважати незмінним, починаючи з межі сейсмічного вогнища, що видно з (8.11). Зміна енергії сейсмовипромінювача E_c з відстанню r_{np} , Кучерявий Ю. Ф. рекомендує визначати з рівняння:

$$E_c = 2,32e^{-1,1r_{np}}. \quad (8.14)$$

Цейтлін Я. І. для розрахунку зміни щільності сейсмічної енергії в повздовжній хвилі з відстанню (r) запропонував наступну формулу:

$$\varepsilon = 0,004 \cdot 10^6 Q^{5/3} r^{-4}. \quad (8.15)$$

В більшості випадків практично доводиться розглядати взаємодію поверхневих хвиль з фундаментами об'єктів, які охороняються. Період T в поверхневій хвилі R прийнято вважати пропорціональним масі заряду Q в степені 1/6 та знаходити з рівняння:

$$T_R = K_r Q^{1/6} r_{np}^{\Pi} \quad (8.16)$$

де K_r – коефіцієнт, який враховує ґрунтові умови, в деяких роботах приймається для лесів 0,07, для глин 0,04, для гранітів 0,0125. Перехід коливань, які переважають, від повздовжньої до поверхневої хвилі, відбувається в інтервалах наведених відстаней від 10 до $30r_{пр}$, за межами цієї зони переважають поверхневі хвилі [142]. Щільність енергії сейсмічної поверхневої хвилі рекомендується знаходити з рівняння:

$$\varepsilon = 0,12 \cdot 10^6 Q^{4/3} r^{-3}. \quad (8.17)$$

8.2. Особливості проведення техногенних вибухів та їх сейсмобезпека

Стан проблеми сейсмічної безпеки технологічного характеру Україна в екологічному відношенні є одним з найбільш несприятливих регіонів, що вимагають не тільки збереження, але і значного поліпшення навколишнього середовища в силу специфіки її індустріального розвитку і несприятливих еколого-геологічних факторів. Гірничодобувні підприємства по видобутку гірничорудної продукції та будівельних матеріалів на Україні розташовані практично по всій її території, будучи джерелом сейсмічних впливів на навколишнє природне середовище. Кількість цих підприємств перевищує 2000, а в найближчій перспективі будуть введені в експлуатацію понад 4400 нових родовищ з 94 видами корисних копалин. Отже, у майбутньому очікується додаткове сейсмічне навантаження на промислові, громадські будинки та природні об'єкти з погіршенням екологічної ситуації. Джерелом сейсмозбуджувачів є технологічні вибухів, які проводяться для потреб підприємств гірничорудної галузі. Масштаби разових вибухових зарядів досягають до 800 т. с частотою 8–10 раз в місяць. В таких регіонах, території України, розташовані поблизу промислові, громадські будинки та природні об'єкти повержені сейсмічним навантаженням які відповідають землетрусам до 6 балів по шкалі MSK-64. З метою регулювання рівня сейсмічного впливу технологічних вибухів, які проводяться для потреб підприємств гірничорудної галузі, на навколишнє природне середовище необхідно

розробляти відповідну проектну документацію що регламентовано указом Указом Президента України № 76/ 2003 від 4 лютого 2003 р. за, п.9.

Задачею вчених и промисловців є подальше вивчення закономірностей руху сейсмічних збуджувачів впливу технологічних вибухів із устанавленням зони безпеки навколо гірничорудних підприємств, з обліком бальності за прогнозом землетрусів. Одним із практичних виходів стала підготовлена карта районування по визначенню сейсмобезпечних зон, навколо гірничовидобувних підприємств, в залежності від геолого-тектонічного характеру місцевості в якому воно розташовано і де є впливи вибухових робіт на навколишнє середовище. В даному розділі приведені дослідження по вивченню закономірностей розповсюдження сеймовибухових хвиль з устанавленням зон безпеки навколо гірничих підприємств і сейсмічного районування цих територій є актуальними і потребують дієвої підтримки.

Також гостро постає проблема сейсмобезпечної експлуатації будівель, що розташовані поблизу місць проведення підричних робіт, оскільки недостатня вивченість негативних динамічних впливів, що виникають від дії сейсмічних імпульсів на будівлі різного технічного стану, не дає можливості прогнозувати їх реальну сейсмобезпечність до й після проведення підричних робіт. Це пов'язано з тим, що оцінка сейсмічної дії на різні будівлі й споруди, відповідно до існуючої нормативної документації, проводиться тільки за допустимою масовою швидкістю коливань незалежно від їх технічного стану й амплітудно-часових складових "грунт-будівля", без урахування наявності в них тріщин і, як показала практика, не в повній мірі корелює з розвитком існуючих чи утворенням нових тріщин у будівлях різного технічного стану, що призводить до значної похибки при оцінці інтенсивності сейсмічних коливань.

В останні роки при проведенні техногенних масових вибухів у кар'єрах України для монтажу схем короткосповільненого вибуху (КСВ) широко використовуються системи неелектричного ініціювання зарядів (СНІЗ), а спосіб прогнозу сейсмічної дії вибухів залишився без змін. На практиці

виявлено суттєву різницю у сейсмічних ефектах від ідентичних вибухів з використанням СНІЗ та систем ініціювання зарядів детонуючим шнуром.

При використанні СНІЗ через технічну можливість застосування сповільнень у широкому діапазоні часових інтервалів збільшується час детонації зарядів, ініційованих миттєво. Це впливає на взаємодію сейсмічних хвиль вибуху всіх груп зарядів, які ініціюють неодноразово, що в існуючих способах прогнозу сейсмічного ефекту КСВ не враховується.

У зв'язку з цим приведені в розділі дослідження по вивченню закономірностей руху сейсмічних збуджувачів впливу технологічних вибухів із установленням зони безпеки навколо гірничорудних підприємств; динамічних впливів, що виникають від дії сейсмічних імпульсів на будівлі різного технічного стану; взаємодії хвильових процесів під час вибухів групових зарядів ВР у гірському масиві та розробка способів прогнозу сейсмобезпеки короткочасових промислових вибухів з урахуванням суперпозиції хвиль так технічного стану будівель й амплітудно-часових складових "грунт-будівля" є актуальним як для науки так і практики.

Основні терміни та шкала інтенсивності сейсмічних коливань. Шкала інтенсивності сейсмічних коливань при визначенні сейсмобезпеки техногенних вибухів

Нижче подано терміни, використані в розділі, та визначення позначених ними понять:

Допустима швидкість сейсмічних коливань ґрунту – швидкість, за якої повністю гарантовано збереження будівель і споруд, а вірогідні локальні їх деформації не перевищать прогнозовані.

Масовий вибух (на відкритих роботах) – вибух змонтованих у загальну вибухову мережу двох і більше свердловинних, котлових або камерних зарядів, незалежно від протяжності виробки, яку заряджають, а також одиничних зарядів у виробках протяжністю більше 10 м.

Вибухова речовина (ВР) – хімічна сполука або суміш, що здатна за певних умов до дуже швидкого само поширюваного хімічного перетворення з виділенням тепла та великої кількості газоподібних продуктів.

Вибухові матеріали (ВМ) – матеріали, засоби ініціювання вибуху, виробу та пристрої, які містять вибухові речовини.

Вибухові роботи – комплекс організаційних і технічних заходів, пов'язаних з підготовленням та проведенням вибухів

Бал – умовна одиниця вимірювання, що характеризує інтенсивність сейсмічного впливу вибуху заряду з певними кількісними та якісними показниками на будівлі, споруди та живі істоти.

Сейсмічна стійкість – здатність будинків та споруд протистояти сейсмічним впливам без втрати експлуатаційних якостей.

Сейсmobезпечна зона – зона, в якій повністю гарантовано збереження будівель і споруд, а вірогідні локальні їх деформації не перевищать допустимі.

Ближня зона – зона, що знаходиться на відстані $r \leq 5 - 10\sqrt[3]{Q}$ від осередку вибуху, м.

Дальня зона – зона, що знаходиться на відстані $r \geq 5 - 10\sqrt[3]{Q}$ від осередку вибуху (Q – маса заряду ВР, кг).

Сейсмостанція – комплект апаратури, який призначено для визначення параметрів сейсмічних коливань ґрунту чи конструкції споруди.

Параметри сейсмобухової хвилі (СВХ):

- *зміщення ґрунту* – відстань на яку перемістилась частинка ґрунту від нейтрального положення;
- *швидкість зміщення ґрунту* (u) – швидкість зміщення частинки ґрунту у СВ;
- *прискорення зміщення ґрунту* (W) – зміна швидкості зміщення в часі;
- *період коливання* (τ) – час, за який проходить повний цикл руху;
- *частота коливань* (f) – число повних коливань частинок (періодів) за одну секунду.

Сейсмічна хвиля – пружне збудження середовища; параметри стану на її фронті практично не змінюються. Область її дії – 120–150 $r_{зар}$ і визначається загальною енергією заряду та властивостями середовища.

В зоні поширення сейсмічних коливань спостерігаються об'ємні (поздовжні та поперечні) і поверхневі пружні хвилі.

Поздовжні – викликають коливальний рух середовища, при якому коливання співпадають з напрямком руху хвилі. У них найбільша швидкість.

Швидкість

$$C_p = \sqrt{\frac{E g(1-\mu)}{10\rho(1+\mu)(1-2\mu)}},$$

де E – модуль пружності; g – прискорення земного тяжіння; ρ – щільність; μ – коефіцієнт Пуассона.

Для гранітів $C_p = 5-6$ км/с, вапняку 2,5–4,5; піщаники – 0,6–1,6, у воді $C_p = 1,43$; повітрі 0,34 км/с.

Поперечні – коливання перпендикулярні напрямку фронту. Їх швидкість менша $\frac{C_p}{C_s} \cong \sqrt{3}$; $C_s = \sqrt{\frac{Eg}{20\rho(1+\mu)}}$; $\mu = \frac{\xi}{1+\xi}$; $\xi = \frac{\Delta q}{\Delta \rho}$ – коефіцієнт бічного тиску

Пісок $\xi = 0,25-0,5$; глина $\xi = 0,11-0,12$.

Поверхневі хвилі – вздовж відкритої поверхні.

Релея – по еліптичній орбіті $C_R = 0,92C_s$

Лява – в шарах без вертикальних переміщень, впоперек напрямку руху хвилі.

На прикладі осцилограми (рис. 8.1) продемонстровано розподіл коливального процесу на відрізки, що відповідають типам хвиль розглянутих вище. Поверхневу фазу відображає відрізок з найбільшим періодом коливань (масова швидкість – V_r). Поперечна фаза має так звані "зазубринки" (масова швидкість – V_s), а поздовжній відповідає відрізок з великою частотою (масова швидкість – V_p).

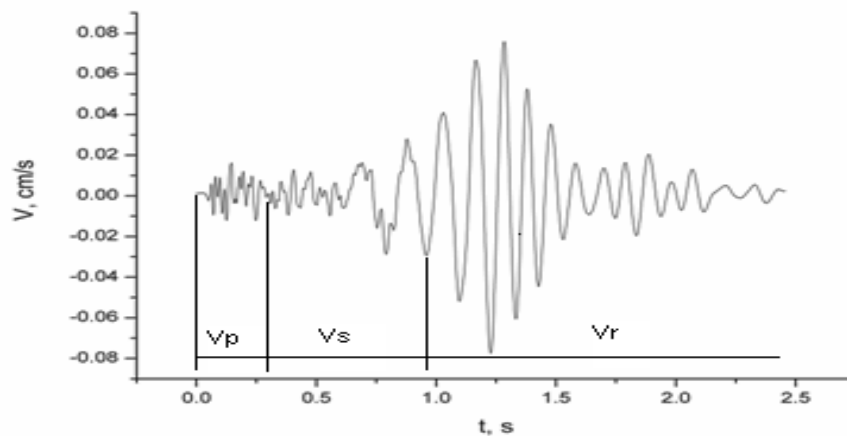


Рис. 8.1. Осцилограма з розподілом коливального процесу на відрізки, що відповідають різним типам хвиль

Найбезпечнішою фазою коливань буде та, максимальне значення амплітуди якої будуть припадати на відрізки процесу з максимальною частотою. І навпаки, у разі отримання максимальних значень амплітуд коливань на відрізок з максимальним періодом, внаслідок накладення коливальних процесів сейсмічної хвилі з власними коливаннями будівель, процес викликатиме найбільшу небезпеку.

Сейсмічні коливання збуджуються всією енергією вибуху, яка перейшла в пружні хвилі і розподіляється поміж різними хвилями з різними швидкостями та досить швидко розподіляються на групи.

Коливання поверхні землі із збільшенням відстані від епіцентру вибуху визначаються дією максимальних коливань хвиль одного типу, а не всією енергією пружних хвиль.

Найбільш загальним критерієм оцінки сейсмічної дії є швидкість коливань середовища в сейсмічній хвилі U . Швидкість коливань та власна частота коливань цивільних будинків та промислових споруд є основними параметрами, які визначають сейсмічну дію різних хвиль.

При вибухах напруження та відносні деформації будинків і споруд прямо пропорційні швидкості коливань. Тому швидкість зміщення частинок ґрунту найбільш зручна для характеристики сейсмічної дії вибуху.

Деформації будинків відбуваються при $V > V_p$. Існує шкала для визначення інтенсивності сейсмічних коливань, бали якої відповідають балам шкали інтенсивності землетрусів.

Загальним критерієм сейсмічної безпеки будівель і споруд, за яким забезпечується їх збереженість під час вибухів, є допустима швидкість сейсмічних коливань ґрунту біля їх фундаментів.

Допустиму швидкість сейсмічних коливань ґрунту встановлюють залежно від конструктивних особливостей, типу будівельних матеріалів, призначення, фізичного стану і термінів служби будівель і споруд.

За критерій безпеки під час визначення допустимих параметрів коливань ґрунту біля фундаментів житлових будівель приймають мінімальні пошкодження штукатурки, а в промислових будівлях і спорудах, де її нема – деформації в перегородках, тріщини на стиках панелей та блоків.

Виконання вибухових робіт дозволено тільки за допустимих швидкостей сейсмічних коливань ґрунту біля фундаментів будівель і споруд та допустимих рівнів тиску у фронті ударної вітряної хвилі.

Таблиця 8.1. Шкала інтенсивності сейсмічних коливань під час вибухів [140]

Характеристика коливань	Бали	Швидкість коливань, см/с
Коливання реєструють тільки прилади	1	менш ніж 0,2
Коливання відчуються в окремих випадках у тиху погоду	2	0,2–0,4
Коливання відчуються деякими людьми або яким відомо про проведення вибуху	3	0,4–0,8
Коливання відчуються багатьма людьми, деренчання скла	4	0,8–1,5
Опадання побілки, пошкодження старих будівель	5	1,5–3,0
Тонкі тріщини в штукатурці; пошкодження будівель, які мали деформації	6	3,0–6,0
Пошкодження будівель, які перебували в задовільному стані: тріщини в штукатурці, падіння кусків штукатурки, тонкі тріщини в стінах, тріщини в печах і трубах	7	6,0–12,0
Значні пошкодження будівель: тріщини в несучих конструкціях і стінах, великі тріщини в перегородках, падіння пічних труб, обвали штукатурки	8	12,0–24,0
Руйнування будівель: великі тріщини в стінах, розшарування кладки, падіння окремих частин стін	9	24,0–48,0
Великі руйнування і обвали будівель і споруд	10–12	більш ніж 48,0

В окремих випадках, під час ліквідації аварійних ситуацій, дозволено одноразове проведення вибухових робіт на граничній швидкості коливань. Під час цього в кожному конкретному випадку ситуацію повинні оцінювати експерти з урахуванням наслідків такого виконання вибухових робіт і можливих витрат на відновлення будівель і споруд.

Будівлі і споруди, які можуть зазнати впливу сейсмічних вибухових хвиль, поділяються на п'ять класів [143].

I клас – особливо відповідальні та унікальні споруди, в тому числі виробничі корпуси, складські будівлі хімічної промисловості з токсичними і отруйними речовинами, вибухонебезпечні корпуси хіміко-фармацевтичної промисловості та споруди нафтохімічної промисловості, історичні і архітектурні пам'ятники та релігійно-культові заклади. Об'єкти I класу та допустиму швидкість коливань ґрунту біля їх фундаментів затверджують регуляторні органи держави.

II клас – споруди з одночасним перебуванням великої кількості людей (великі вокзали, аеропорти, театри, цирку, музеї, виставкові та концертні зали з числом місць більше 1000 чоловік, криті ринки та стадіони);

– будівлі і споруди, функціонування яких необхідне під час землетрусу або у разі ліквідації його наслідків (системи енерго- та водозабезпечення, системи пожежогасіння, телефонного і телеграфного зв'язку), виробничі корпуси важкої промисловості з безперервним циклом роботи, банки, державні та місцеві адміністративні органи, тощо;

– висотні споруди невеликих у плані розмірів (башти, щогли, димові труби, шахти ліфтів, що стоять окремо, тощо) за відношенням висоти споруди H до її ширини B , що дорівнює або більше ніж 5, і великопрогонові споруди довжиною не менше 30 м;

– каркасні будівлі, стінове заповнення яких не впливає на їх деформативність, за відношенням висоти стояків h до їх поперечного розміру b в напрямку дії сейсмічного навантаження, що дорівнює або більше ніж 25.

III клас – будівлі і споруди лікарень на 100 ліжок і більше, пологових будинків, акушерських корпусів, станцій швидкої допомоги, шкіл, дитячих

садків, вищих навчальних закладів, магістральних залізниць і автомобільних доріг і штучних споруд транспорту;

– будівлі готелів, спальних корпусів закладів відпочинку на 250 місць і більше.

IV клас – каркасні будівлі промислового та житлового призначення за відношенням висоти стояків h до їх поперечного розміру b , що дорівнює або менше ніж 15.

Житлові, громадські та промислові будівлі, що не увійшли до I–III класів.

V клас – будівлі та споруди, руйнування яких не пов'язане із загибеллю людей, втратою матеріальних і культурних цінностей і не викликає припинення безперервних технологічних процесів або забруднення навколишнього середовища (сховища, кранові та ремонтні естакади, підприємства торгівлі та побутового обслуговування з терміном служби не більше 20 років, невеликі майстерні, тимчасові будівлі та споруди, торговельні павільйони, тощо).

Споруди циклічно-поточних технологій, наземні транспортні галереї, конвеєри, вузли перевантаження.

Допустиму швидкість коливань ґрунту під час багаторазових вибухів біля фундаментів будівель і споруд із урахуванням їх класу, категорії та стану, наведено у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2. Допустиму швидкість коливань ґрунту під час багаторазових вибухів біля фундаментів будівель і споруд із урахуванням їх класу, категорії та стану

Категорія будівель і споруд	Конструктивні особливості будівель і споруд та їх стан	Допустима швидкість коливань ґрунту за класами будівель і споруд, см/с			
		II	III	IV	V
1	Із сталевим каркасом та несучими стінами з монолітного залізобетону. Залишкові деформації в конструкціях будівель і споруд відсутні. Промислове і громадське призначення. Житлове призначення	5,0 2,0	7,0 3,0	9,0 3,0	12,0 –
2	Із сталевим каркасом мають тріщини в заповнювачах каркасу і окремі незначні тріщини в несучих стінах з монолітного залізобетону. Із залізобетонним каркасом без залишкових деформацій. Промислове і громадське призначення. Житлове призначення. Медичні дитячі і освітні заклади.	3,0 2,0 –	5,0 3,0 1,5	7,0 3,0 1,5	9,0 – –
3	Каркасні будівлі мають значні пошкодження в заповнювачах, тріщини в каркасі і корозію сталевих каркасів. З монолітного залізобетону мають незначні тріщини в стінах. З несучими стінами з цегляної або кам'яної кладки залишкових деформацій не мають. Промислове і громадське призначення. Житлове призначення. Медичні, дитячі і освітні заклади.	1,5 1,0 –	3,0 2,0 0,4	5,0 2,0 0,4	7,0 – –
4	Каркасного типу мають тріщини в каркасі, порушення зв'язків між окремими елементами. Глинобитні, цегляні і крупно блочні будівлі і споруди мають пошкодження у вигляді тріщин у несучих стінах. Промислове та громадське призначення. Житлове призначення (в тому числі будівлі, які мають термін експлуатації більше ніж 50 років, але придатні до експлуатації). Медичні, дитячі і освітні заклади	0,8 0,4 –	1,5 0,4 <0,2	3,0 0,4 <0,2	5,0 – –

Категорія будівель і споруд	Конструктивні особливості будівель і споруд та їх стан	Допустима швидкість коливань ґрунту за класами будівель і споруд, см/с			
		II	III	IV	V
5	Пошкодження залізобетонного каркасу і корозія сталевих каркасу. З несучими стінами мають значні пошкодження у вигляді крупних косих тріщин, порушення зв'язків між зовнішніми і внутрішніми стінами тощо. Промислове і громадське призначення. Житлове призначення.	0,5 0,3	1,0 0,5	2,0 1,0	3,0 –
6	Промислового, громадського та житлового призначення: Великопанельні будівлі до 5 поверхів. Великопанельні житлові будівлі (6–9 поверхів). Великопанельні житлові будівлі (12–16 поверхів)	– – –	0,7 0,4 0,2	0,7 0,4 0,2	– – –

8.3. Оцінка сейсмобезпеки будівель різного технічного стану при техногенних вибухах

Із аналізу практики проведення підривних робіт встановлено, що такі роботи не здійснюються без розрахунку сейсмобезпечних відстаней та оцінки допустимого рівня сейсмічного впливу (швидкості коливань ґрунту в основі об'єкту) на навколишні промислові, цивільні або природні об'єкти. Такі оцінки проводяться відповідно до існуючих нормативних документів: Єдині Правила Безпеки при підривних роботах, СНіП-II-7-81, Шкали інтенсивності сейсмічних коливань під час вибухів. Використання їх приводить до помилкового визначення (зазвичай до завищення) гранично-допустимих норм. Це пов'язано з тим, що основний параметр вибухової хвилі, який прийнятий за критерій сейсмобезпеки – допустима інтенсивність коливань ґрунту в основі будівлі, визначається відповідно таблиць для будівель і споруд, які мають порушення (тріщини різного походження), без урахування їх технічного стану. Завищення граничних норм ведуть до помилкового

визначення сейсдобезпечних параметрів масових вибухів у кар'єрах, що призводить до не прогнозованої бальності та сприятливих умов подальшого розвитку існуючих та утворенню нових тріщин для навколишніх будівель.

За станом проблеми в промисловій сейсміці, в даному розділі була сформульована мета досліджень яка полягає в опрацюванні надійних оцінок сейсдобезпеки будівель різного технічного стану з урахуванням частоти їх власних коливань і коливань ґрунтової основи, які збуджені сейсмічною дією техногенних вибухів, і розробка рекомендацій з сейсдобезпечного проведення підривних робіт у кар'єрах.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання:

- установити основні параметри вибухових хвиль, які будуть прийняті за критерій сейсдобезпеки при визначенні допустимої інтенсивності коливань ґрунту в основі будівлі різного технічного стану;
- установити закономірність взаємодії сейсмовибухових хвиль системи "ґрунт-будівля" на основі існуючого критерію, з урахуванням частотних характеристик коливань ґрунту і власних коливань будівель, для визначення в різних діапазонах частот, у тому числі резонансних, допустимих швидкостей коливань в будівлях різного технічного стану;
- розробити комплексну методику визначення допустимих норм сейсмоколивань будівель різного технічного стану і опрацювати рекомендації з сейсдобезпечного ведення підривних робіт у кар'єрах.

Визначення критерію безпеки будівель, у тому числі ослаблених тріщинами, від дії на них сейсмічних хвиль з різним діапазоном частот і величиною амплітуди коливань, які найбільш корелюють з пошкодженнями, що виникають у будівлі, необхідно проводити керуючи нижче приведеним судженням.

Коли ґрунт, на якому зведена будівля, починає рухатися під дією сейсмічних хвиль, то він розгойдує її як в цілому, так і окремі її частини. Разом із вимушеними коливаннями, що відповідають характеру сейсмічних сил, у будівлі виникають власні коливання, які залежать від її форми, геометричних розмірів, фізичних властивостей будівельного матеріалу і її ослабленості тріщинами. Накладення цих рухів викликає в будівлі динамічні

зусилля, які можуть стати загрозою для цілісності, розвитку існуючих та утворення нових тріщин в будівлі. Інтенсивність динамічних зусиль у конструкціях будівлі залежить від потужності вибуху, відстані від місця вибуху до неї, тобто від зони впливу хвилі на ґрунт, а також від характеристик будівлі (ослабленості її тріщинами). В залежності від епіцентру вибуху (приведених відстаней) поширення різних типів її хвиль можна розділити на три характерні зони: ближня, перехідна та дальня. Відносно сейсmobезпечності впливовими є дві: перехідна й дальня зони (розташування об'єктів, що охороняються). Останні й були розглянуті в даному розділі для обґрунтування вибору критерію впливу сейсмовибухових хвиль на будівлі. Для перехідної зони вибуху (граничі приведених відстаней від 6 до 16 м/кг^{1/3}), яка характеризується наявністю поздовжніх, поперечних та поверхневих хвиль, й представлена у вигляді загасаючих коливань, в розділі, розв'язуючи диференціальне рівняння коливань будівлі, визначена величина сейсмічної сили, яка діє на будівлю. Це дозволило сформулювати висновок, що величина сейсмічної дії на будівлю прямо пропорційна швидкості зміщення частинок ґрунту та її частоті. А для дальньої зони (зона пружних деформацій ґрунтів, граничі приведених відстаней від 16 м/кг^{1/3}), розглядаючи коливання ґрунту у вигляді коливання сталого типу, та розв'язуючи диференціальне рівняння коливань системи "ґрунт-будівля" з урахуванням затухання в ній хвиль, коли частота коливань в хвилі більша частоти власних коливань будівлі (що частіше всього спостерігається в практиці), визначена величина швидкості коливань будівлі. Підтверджена пряма пропорційність швидкості коливань частинок ґрунту біля будівлі швидкості коливань у сейсмічній хвилі, оскільки являє собою швидкість коливання ґрунту. Таким чином, основними параметрами, що визначають сейсмічну дію вибухової хвилі на будівлі та які корелюють з пошкодженнями, є швидкість коливань частинок ґрунту й частота коливань ґрунтової основи T і власна частота будівлі T_0 (тобто відношення T/T_0). Останні не враховуються в існуючих нормативах і тому потребують їх удосконалення. Тому для розрахунку будівель на допустимі сейсмонавантаження (сейсмостійкість), а також прогнозування масштабів

(сейсмічного впливу) вибухів на них, у даному розділі виконані дослідження щодо оцінки змін інтенсивності сейсмічних коливань при їхньому переході від ґрунтової основи фундаменту будівлі й далі на саму будівлю з урахуванням спектральних характеристик такої системи.

Визначення допустимої швидкості коливань ґрунту біля фундаменту будівлі може проводитись за двома методами: перший – з використанням частотного спектру дії струсів на будівлі; другий – з урахуванням міцнісних властивостей матеріалу будівлі та ослабленості її тріщинами.

Для розв'язання задачі з визначення швидкості коливань ґрунту біля фундаменту будівлі з урахуванням частотних характеристик системи "ґрунт-будівля" (перший метод) була використана відома в інженерній сейсмології залежність, яка враховує зміни амплітуди швидкості коливань при переході їх від ґрунту в будівлю та амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) цієї коливальної системи, а для оцінки сейсмостійкості будівлі були визначені максимальні значення динамічних впливів, які діють на будівлю. Останні оцінювались за допомогою установленого на конструкції будівлі стандартного сейсмометра СБМ з такими постійними характеристиками: період коливань стандартного сейсмографа $T_{CB} = 0,25$ с, декремент його затухання $\lambda_{CB} = 0,5$. Оскільки величина швидкості коливань будівлі $u_{зд}$ являє собою амплітуду коливань маятника, підстава якого рухається за законом швидкості коливань ґрунту $u_{зр.} = u_{зр.}(t)$, то максимальні значення $u_{зр.}$ будуть різні при різних значеннях періоду коливань T й декрементів затухання λ . Отже, максимальна амплітуда коливання маятника $u_{зр.}$ є функцією періоду затухання при даному динамічному впливові і є спектром дії на будівлі даного конкретного коливання ґрунту. У діапазоні періодів коливань 0,5...0,7 с, які характерні кар'єрним вибухам, для визначення допустимої швидкості коливань ґрунту біля фундаменту охоронної споруди використовується залежність [144]:

$$u_{дон} = u_0 \frac{T_0^2}{T_{CB}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\lambda_{CB}}} \cdot \left[\left(1 - \frac{T^2}{T_0^2} \right) + \frac{4\lambda^2}{\pi^2 + \lambda^2} \cdot \frac{T^2}{T_0^2} \right]^{1/2}, \quad (8.8)$$

де $u_{дон.}$ – допустима швидкість коливань ґрунту (см/с) біля фундаменту будівлі, що охороняється, без урахування частотної характеристики коливальної системи "ґрунт-будівля" і визначається згідно з існуючими нормами;

T – період коливань ґрунту біля фундаменту будівлі, с; T_0 – період власних коливань будівлі, с; u_0 – максимальні значення швидкості коливань будівлі, що відповідає допустимим значенням при деяких фіксованих значеннях $[T_0]$ й декременту затухання будівлі $[\lambda_0]$.

Визначення допустимої швидкості зміщення ґрунту (см/с) біля фундаментів будівель різного технічного стану, з урахуванням частотних характеристик коливань ґрунту, власних коливань, міцнісних властивостей і ослабленості будівлі тріщинами проводиться [144]:

$$U_{дон} = \frac{[\sigma]K_{осл}\psi K_e}{\rho V_p K_{II}}, \quad (8.9)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження (для цегельної кладки на цементі М50 – $7,0 \cdot 10^5$ Па, для кладки із крупних шлакоблоків – $23 \cdot 10^5$ Па, для штукатурки – $0,9 \cdot 10^5$ Па) для будівельного матеріалу або між окремими елементами будівлі, для яких визначається допустима швидкість зміщення; $K_{осл}$ – коефіцієнт ослаблення тріщинами несучих стін будівлі; ψ – коефіцієнт втрати енергії при поширенні по будівлі коливального процесу (для будівлі з цегли $\psi = 0,6$, для будівлі з крупних шлакоблоків $\psi = 0,7$); ρ – щільність ґрунту в основі будівлі; V_p – швидкість поширення повздовжньої хвилі в ґрунті, см/с; K_e – коефіцієнт передачі коливань в сейсмічній хвилі від ґрунту до будівлі

$$K_e = (1,5 \cdot 10^{-2} \cdot r / Q^{1/3})^{1/5}, \quad (8.10)$$

де $r / Q^{1/3}$ – приведена до маси заряду відстань від місця вибуху, $m^1 / kg^{1/3}$;

K_{II} – коефіцієнт врахування частотних характеристик $K_{II} = 2,4 \cdot \frac{f_0}{f} + 0,9$, f – частота коливань ґрунту, f_0 – частота власних коливань будівлі.

Приведена відстань в формулі (8.34) обирається по сейсмічній Шкалі для вибухів відповідно до бальності, яка не викликає порушень і пошкоджень

тих елементів будівлі, для яких за формулою (8.2) визначається допустима швидкість коливань.

Коефіцієнт ослаблення тріщинами несучих конструкцій визначається на основі коефіцієнта тріщинуватості несучих стін [144]:

$$K_{ocл} = (1 - AK_{Tp})^2, \quad (8.11)$$

де A – коефіцієнт, який враховує форму деформації (для деформації типу тріщини $A = 300$); K_{Tp} – коефіцієнт тріщинуватості будівлі (визначається на основі інвентаризації охоронної будівлі),

$$K_{Tp} = \frac{V_{Tp}}{V_0 + V_{Tp}}, \quad (8.12)$$

де V_{Tp} – об'єм тріщин ($V_{Tp} = ldh$, де l , d , h – середня довжина, ширина і глибина тріщини відповідно, м), м³; V_0 – об'єм несучої стіни, м³.

Період власних коливань будівлі визначається за формулою:

$$T_0 = 0,265(h/v), \text{ с} \quad (8.13)$$

де h – висота будівлі, м; v – ширина, м.

Період коливань ґрунту, для різних типів хвиль визначають за осцилограмою, або за такими формулами:

під час вибуху свердловинних зарядів в повздовжній пружній хвилі

$$T_p = K_p Q_l^{1/6} (0,01l + 1), \text{ с}, \quad (8.14)$$

у поверхневій хвилі

$$T_R = K_R Q_l^{1/6} (0,015l + 1)(r/Q^{1/3})^v, \text{ с}, \quad (8.15)$$

де K_p , K_R , v – експериментальні коефіцієнти; Q_l – питома лінійна маса свердловинного заряду, кг/м; l – довжина свердловинного заряду, м; r – відстань від місця вибуху до пункту спостереження, м; Q – маса одного свердловинного заряду, кг.

Виконані в даному розділі аналітичні дослідження щодо впливу сейсмовибухових хвиль на будівлі також показали, що, крім величини відношення T/T_0 (T – період коливання ґрунту, T_0 – період власних коливань будівлі), важливим показником у спільному коливальному процесі є логарифмічний декремент загасання λ .

Використовуючи значення допустимої швидкості коливань ґрунту в фундаменті будівлі (U_{oon} , см/с), визначаються сейсдобезпечні параметри

масових вибухів у кар'єрах – максимально-допустима величина маси свердловинного заряду ВР в групі ($Q_{don}, \text{кг}$) для одночасного підривання згідно з методом розосереджених зарядів [144]:

$$Q_{don} = \left(\frac{U_{don}}{mK} \right)^{3/n} r^3, \quad (8.16)$$

де K – коефіцієнт, який враховує умови вибуху і поширення сейсмовибухових хвиль (СВХ); m – кількість свердловинних зарядів в одному ступені уповільнення; n – показник затухання СВХ на відстані; r – відстань від місця вибуху до об'єкта, що охороняється, м.

Наведені в цьому розділі аналітичні дослідження були перевірки і доповнені в промислових умовах проведенням масових вибухів на гірничо-видобувних підприємствах України.

Дослідження діапазону ймовірних резонансних явищ при взаємодії сейсмовибухових хвиль із охоронними об'єктами, для типових будівель масової забудови в промислових умовах, проводилось з застосуванням апаратури і методики багатоканальної реєстрації коливань.

Розроблені до початку проведення підривних робіт комплексні методики визначення допустимого рівня швидкості коливань для конкретних будівель, які розташовані поблизу місця проведення підривних робіт, основані на використанні аналітичних розрахунків, наведених в попередньому розділі та експериментальних досліджень виявлення причин утворення нових і розвитку існуючих тріщин в кожній окремій будівлі. Наявність в будівлях порушень тріщинного характеру враховувалась в методиках, з застосуванням наведеного в попередньому розділі методу визначення допустимої швидкості коливань ґрунту біля фундаменту будівлі через врахування коефіцієнта ослаблення міцності матеріалу капітальних стін будівлі (4–5). Для сейсмічної оцінки технологічних вибухів безпосередньо на будівлю, в залежності від матеріалу, з якого вона побудована, в методиці використовувались експериментальні дані з сейсмо- та частотограм за параметрами сейсмовибухових хвиль, тобто амплітуди, періоди коливання й швидкості, які пов'язані з пошкодженнями, розвитком

існуючих і утворенням нових тріщин, або повною цілісністю будівлі, в залежності від масштабу вибуху та відстаней.

З метою вивчення дії сейсмовибухових хвиль від короткосповільненого вибуху (КСВ) системи свердловинних зарядів ВР на будівлі, у тому числі й ослаблені тріщинами, в роботі розроблені методи оцінки їх технічного стану з визначенням коефіцієнтів тріщинуватості несучих стін K_{TP} , основних параметрів сейсмічних хвиль (з осцилограм вибуху), які згідно з результатами досліджень другого розділу (U_{don} , см/с та T/T_0) прийняті за критерій сейсмобезпеки, а також розроблено метод розрахунку допустимої для одночасного підривання маси заряду.

Велике значення для оцінки динамічної стійкості будинку, на відміну від існуючих норм, при дії на нього СВХ має взаємозв'язок між частотними характеристиками будинку й вибухової хвилі, що було обґрунтовано в другому розділі. Задачею експериментальних досліджень була перевірка результатів аналітичних досліджень та одержання нових результатів при проведенні апаратурних замірів безпосередньо в будівлях різного технічного стану і вплив на них СВХ, викликаних короткосповільненими вибухами зарядів різної приведеної маси. Одержані з осцилограм період T та швидкості коливань ґрунту в фундаменті будівлі U_{don} , см/с використовувалися для визначення експериментальних коефіцієнтів K_p , K_R , V в формулах (8.13)–(8.14), значення яких для граніту 0,01, 0,012, 0,38 відповідно. Періоди власних коливань будівлі T_0 визначалися з осцилограми, яка одержана при сейсмометричних замірах, або в залежності від висоти будівлі і ширини згідно з формулою (8.12). З амплітудно-частотних характеристик одержували періоди максимальних амплітуд сейсмовибухових хвиль, аналіз яких показав, що в основному періоди максимальних амплітуд перебувають у діапазоні 0,025–0,2 (частота 5...40 Гц), а власні періоди коливань T_0 й коефіцієнт демпфірування λ відповідно 0,2–0,4 с (2,5–5,0 Гц) і 0,3. Ці дані відповідають більшості будівель масової забудови території України.

Проведені експериментальні дослідження для підтвердження вищевикладеного. Вивчення впливу амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) короткосповільнених вибухів на стійкість охоронюваних об'єктів

проводилося для різних будинків у т.ч. ослаблених тріщинами. Для останніх це дозволило використовувати не тільки нормативні (паспортні) значення припустимих швидкостей коливань будинків, але й фактичні значення в результаті ослаблення їхніми тріщинами. По отриманим у розділі 2 даним були виконані перерахунки припустимих значень швидкостей (існуючих норм) з обліком реальних АЧХ при виконанні спеціальних вибухів і масових вибухів на кар'єрі. Характерні осцилограми й спектрограми, отримані від впливу спільного коливального процесу системи "грунтова підстава – конструкція" при виконанні 2-х схожих між собою масових вибухів на кар'єрі, наведені на рисунках 8.2–8.3.

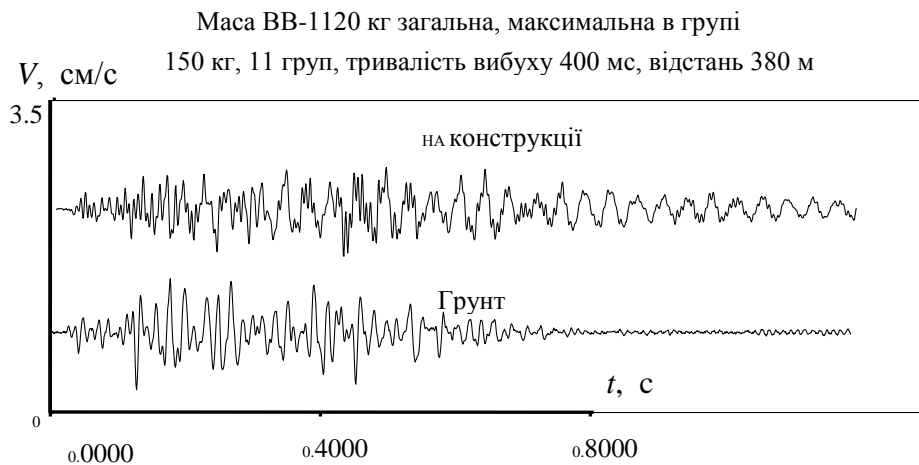


Рис. 8.2. Осцилограми спільного коливального процесу системи "грунт-конструкція" при виконанні масового вибуху № 1 в кар'єрі. Швидкість коливання ґрунтової основи $U_{\max} = 0,853$ см/с, швидкість конструкції $U_{\max} = 0,64$ см/с

З аналізу отриманих даних треба, що інтенсивність коливань при переході сейсмічної хвилі із ґрунтової підстави на конструкцію, залежить від АЧХ коливальної системи. При виконанні першого вибуху (рис. 8.2) максимально отримана швидкість коливань на ґрунті склала 0,853 см/с, на конструкції 0,64 см/с, а вибуху № 2 (рис. 8.3) – 0,37 см/с і 0,452 см/с відповідно. Цю відмінність можна пояснити на основі аналізу отриманих АЧХ при першому вибуху (рис. 8.4, а, б), при якому (рис. 8.4, б) у спектрі на ґрунтовій основі практично відсутні переважаючі гармоніки, які б збігалися з такими ж (рис. 8.4, а), отриманими на конструкції. І навпаки, при другому вибуху (рис. 8.4, а, б) у спектрі на ґрунтовій основі (рис. 8.4, б) присутні

переважаючі гармоніки, які збігалися б з такими ж отриманими (26 Гц) на конструкції (рис. 8.4, а). Тому при першому вибуху отримано зниженні швидкості коливань на конструкції стосовно ґрунтової підстави, а при другому вибуху інтенсивність коливань на конструкції збільшується.

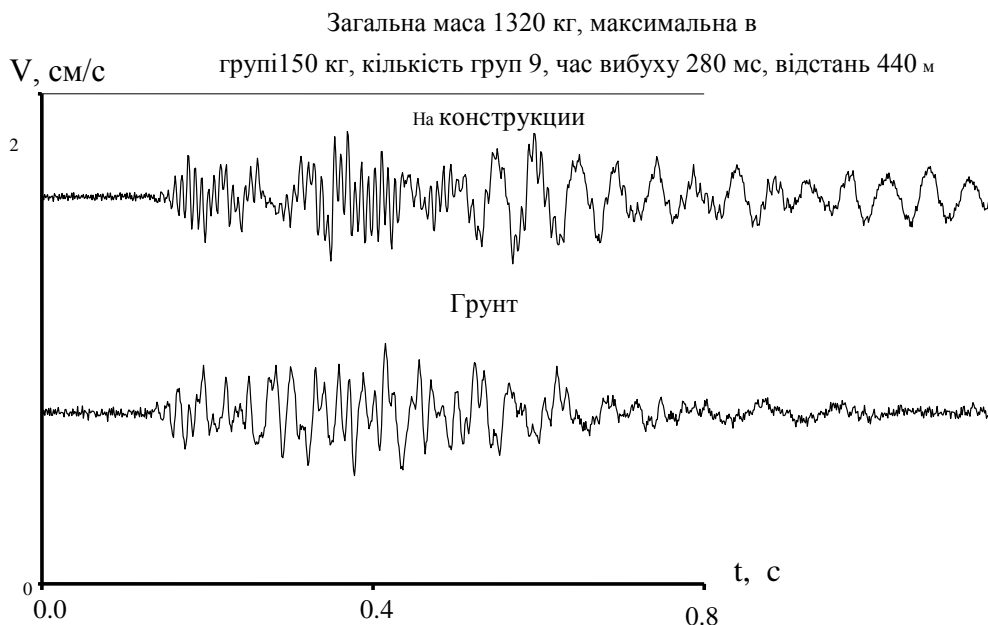
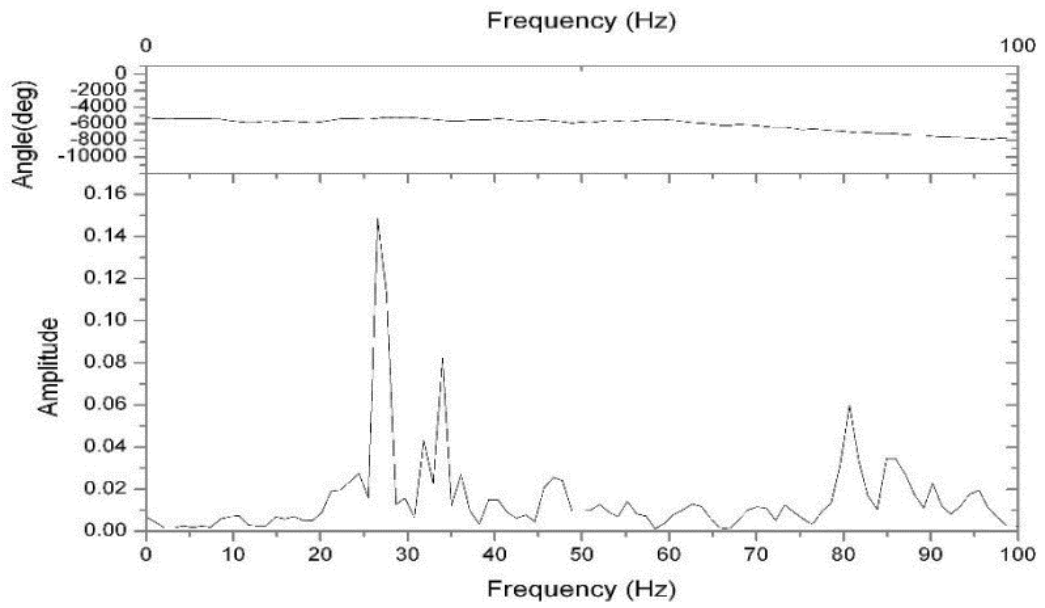


Рис. 8.3. Осцилограми спільного коливального процесу системи "ґрунт-конструкція" при виконанні масового вибуху № 2 в кар'єрі. Швидкість коливання ґрунтової основи $U_{\max} = 0,37$ см/с, швидкість конструкції $U_{\max} = 0,452$ см/с

Ці експерименти підтвердили, що основними критеріями інтенсивності дії СВХ на конструкції є швидкості зміщення ґрунту, а також переважаюча частота (періоди) коливань ґрунту (вибух № 1 – 55 Гц (рис. 8.5) і вибух № 2 – 25–92 Гц) і власні коливання (26 Гц) будови (конструкції). Якщо співвідношення T/T_0 мале, то амплітуда зміщення конструкцій будівлі по відношенню до амплітуди зміщення основи її буде порівняно невеликою. Експериментальне підтвердження цьому отримане при виконанні першого вибуху. При значеннях T , близьких до T_0 , амплітуда коливань досягає максимуму і може перевищити амплітуду коливань ґрунту – це підтверджено при виконанні вибуху № 2.

a



б

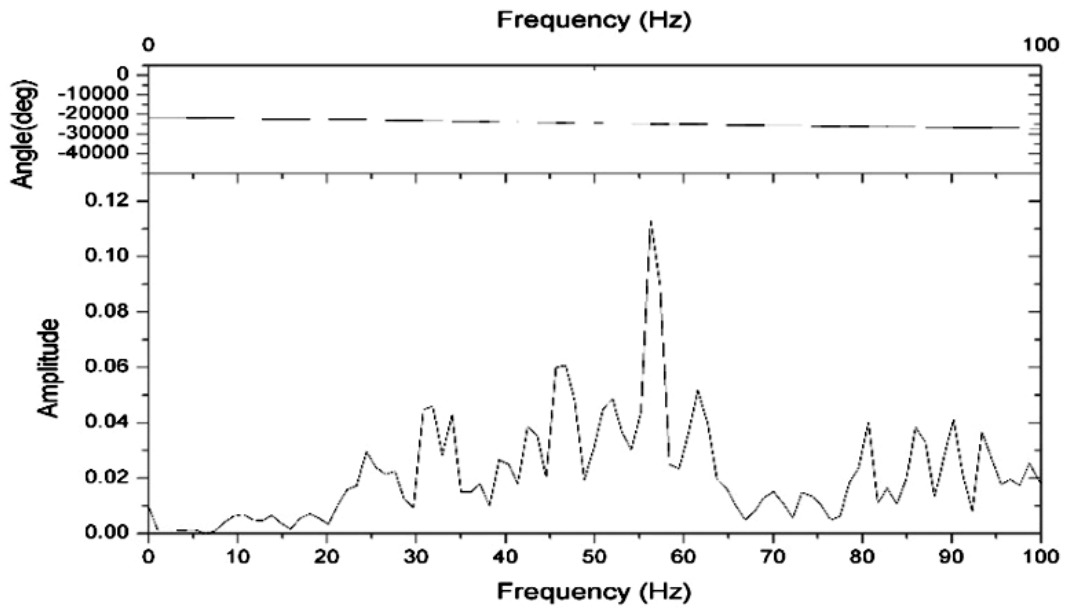
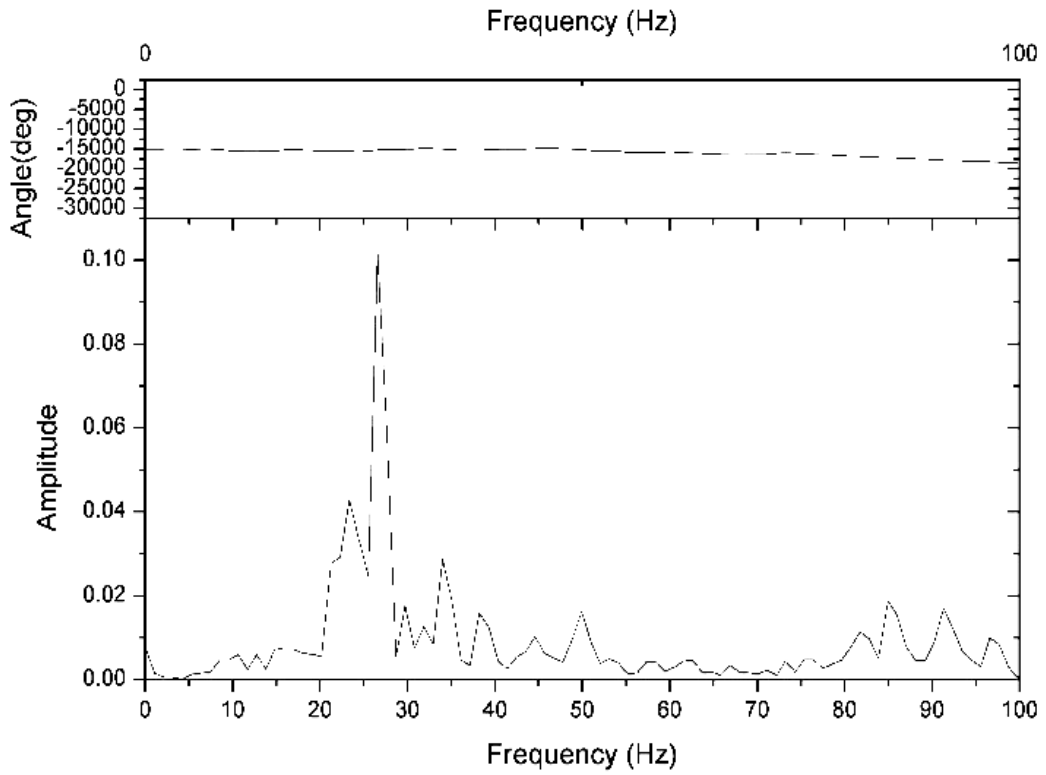


Рис. 8.4. Амплітудно-частотний спектр коливань вибуху № 1:
а – конструкція; б – ґрунтова основа

a



б

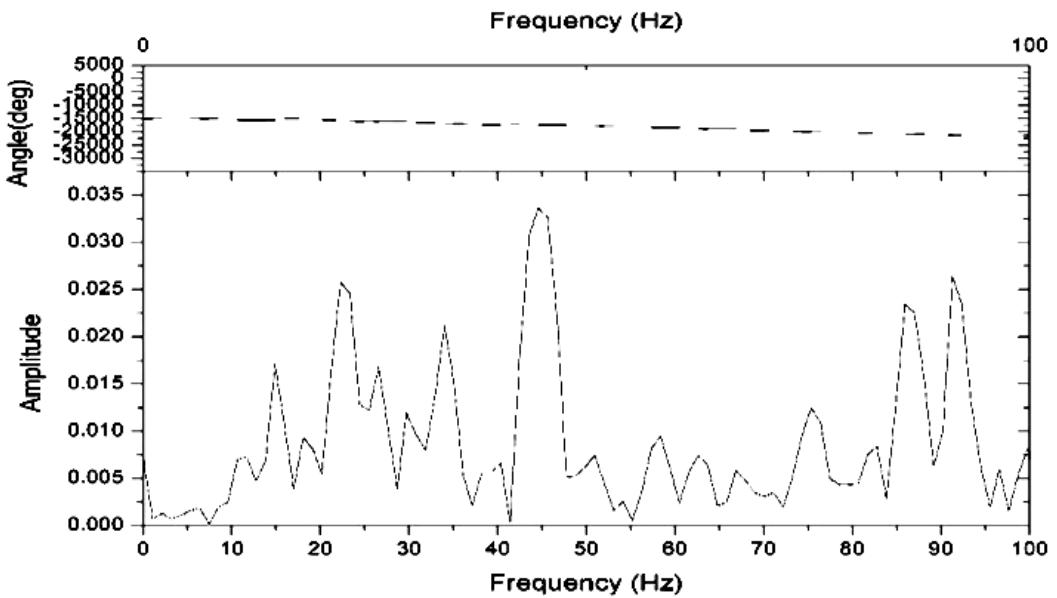


Рис. 8.5. Амплітудно-частотний спектр коливань вибуху № 1:
a – конструкція; *б* – ґрунтова основа

Одержані з осцилограм експериментальних вибухів значення швидкості ґрунту у фундаменті будівлі та перераховані з урахуванням

частотних характеристик коливання об'єктів згідно з аналітичними дослідженнями зображені на рис. 8.6.

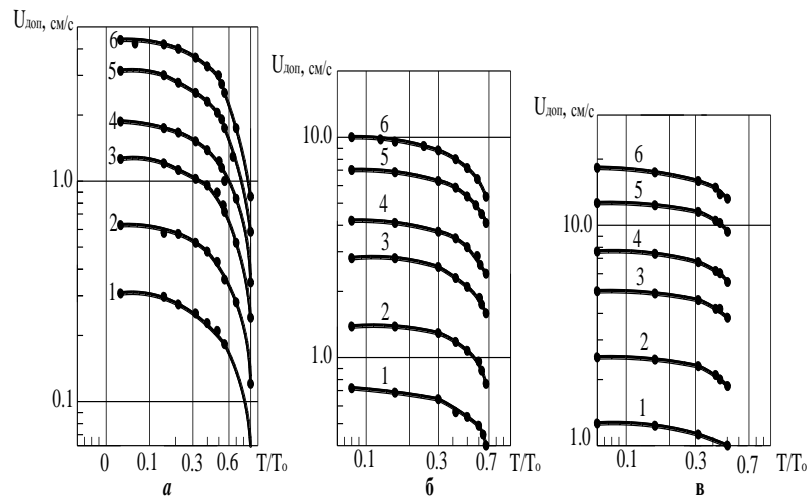


Рис. 8.6. Графіки для перерахування існуючої нормативної допустимої швидкості коливань будівель (для III класу) в значення з урахуванням величини відношення T/T_0 :

$a - T_0 = 0,2 \text{ с}; \text{ б} - T_0 = 0,3 \text{ с}; \text{ в} - T_0 = 0,4 \text{ с};$

$1-6 -$ уточнені з урахуванням T/T_0 значення $U_{\text{дон}}$ відповідно $0,5; 1; 2; 3; 5; 10 \text{ см/с}$, які наведені в нормативних документах для будівель III класу

Із аналізу рис. 8.6 видно, що ці результати (наприклад, в резонансній області коливань $T/T_0 = 0,5...1,0$) значно відрізняються від даних існуючої Шкали інтенсивності сейсмічних коливань від вибухів, де не враховується частотний фактор, а також, що для одного і того ж значення $U_0 = 1,0 \text{ см/с}$, яке прийнято відповідно до існуючої Шкали, залежно від величини T/T_0 й коефіцієнта демпфірування $- 0,3$, $U_{\text{дон}}$ може змінюватися від 1,5 до 5 разів, що переконливо підтверджує необхідність врахування амплітудно-частотної характеристики коливальної системи "грунтова основа-будівля".

Для будівель різного технічного стану (ослаблених тріщинами) допустима швидкість, крім оцінювання її в різних діапазонах частот, ще встановлювалась з урахуванням коефіцієнта тріщинуватості, який визначався на основі обстеження конкретних будівель та коефіцієнта ослаблення. Експериментально досліджувався вплив швидкостей коливань ґрунту в основі будівель на її стійкість в різних діапазонах частот коливань, одержаних із осцилограм і спектрограм короткоуповільнених вибухів системи свердловинних зарядів ВР різної маси. На основі узагальнення

результатів досліджень в промислових умовах, з урахуванням аналітичних і експериментальних досліджень щодо визначення головних критеріїв впливу сейсмовибухових хвиль на об'єкт, в дисертаційній роботі розроблені сейсмічні норми оцінки сейсмобезпеки підривних робіт для будівель з різним технічним станом (рис. 8.7).

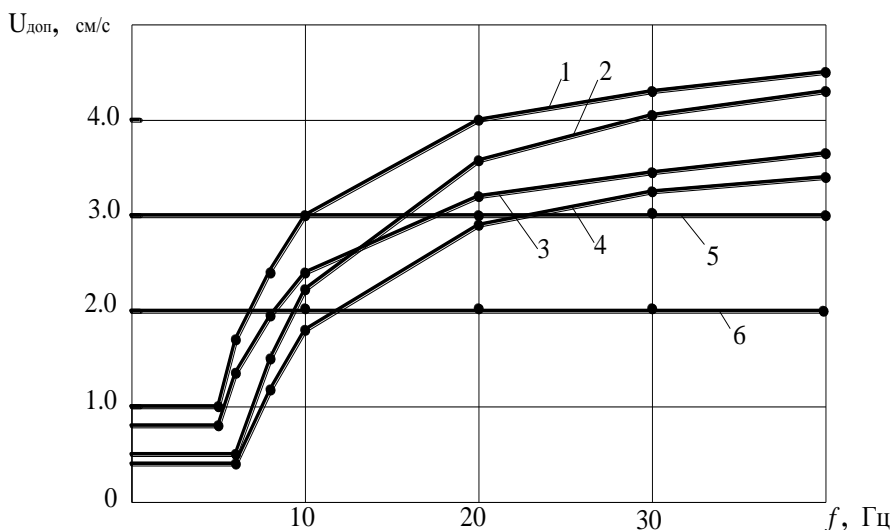


Рис. 8.7. Залежності допустимої швидкості зміщення ґрунту в основі будівлі від частоти коливань в СВХ:

1, 2 – цегляна ($f = 4$ Гц) і саманна ($f = 5,5$ Гц) будівлі відповідно, що не мають залишкових деформацій; 3, 4 – те ж саме, ослаблені тріщинами ($K_{осл} = 0,8$); 5, 6 – допустимий рівень інтенсивності коливань для цегляної і саманної будівель згідно з існуючими нормативними даними відповідно

Для оперативного визначення масштабів промислових вибухів з допустимою швидкістю коливань ґрунту в основі охоронної будівлі, з урахуванням двох методів оцінки, розроблена комплексна номограма рис. 8.8.

Проведені експериментальні дослідження впливу СВХ на будівлі масової забудови (саманні, цегельні, у тому числі послаблені тріщинами) дозволили одержати такі величини швидкостей коливань в різних частотних діапазонах, які забезпечують повну цілісність будівель зазначених типів.

Допустима швидкість коливань ґрунту біля будівель і споруд під час проведення вибухових робіт залежить від співвідношення частоти коливань ґрунту (f) до частоти власних коливань будівлі (f_0). За значеннями f близькими до f_0 , швидкість коливань конструкцій будівлі значно зростає і у

разі достатній тривалості коливань ґрунту може призвести до резонансного явища та руйнування будівлі.

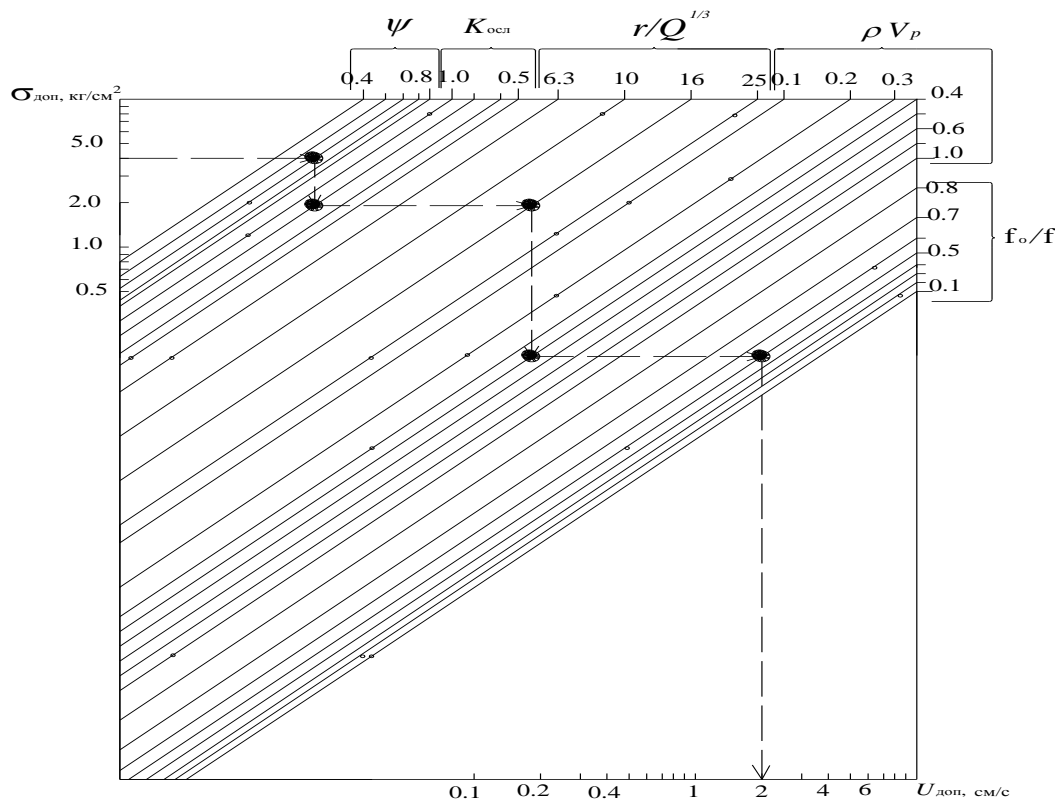


Рис. 8.8. Комплексна номограма для визначення масштабів вибухів та допустимих величин швидкості коливань $U_{доп}$ з урахуванням частотних характеристик коливань ґрунту й будівлі та її послабленості тріщинами

Значення допустимої швидкості коливань для типів будівель II–IV класів, що знаходяться в задовільному технічному стані, в залежності від частоти коливань ґрунту біля їх фундаментів визначаються за графіками на рис. 8.6. Для будівель, що знаходяться в незадовільному стані, допустима швидкість коливань ґрунту біля будівель і споруд встановлюється на основі обстеження технічного стану будівель із залученням спеціалістів організації, що має дозвіл на такий вид діяльності.

Впровадження результатів дослідження виконувалися в два етапи – до і після проведення вибуху. Результатом I-го етапу є визначення допустимої швидкості коливання ґрунту в фундаментах для різних типів будівель і різного технічного стану, з урахуванням частотних характеристик споруд за

номограмою. Після технічного обстеження будівель і розрахунку коефіцієнта ослаблення, згідно з розробленими автором нормами, виконані аналітичні розрахунки параметрів підричних робіт експериментального вибуху. Результатом II-го етапу є проведення сейсмовимірів і одержання осцилограм і спектрограм, із яких визначені параметри хвилі порівнювались з нормами, що одержані за результатами I-го етапу, і в випадку, якщо вони не перевищують допустимих величин, їх використовували для розробки рекомендацій з сейсмобезпечного проведення підричних робіт.

Результати наукових досліджень авторів були впроваджені на багатьох кар'єрах України: при виконанні підричних робіт Філією "Кримвибухпром" ДП "НВО Павлоградський хімічний завод" на кар'єрах ВАТ "Шархінський кар'єр", ВАТ "Старокримський кар'єр", ВАТ "Кар'єр Мраморний" була використана методика автора по визначенню допустимої швидкості коливань ґрунту біля фундаментів будівель з тріщинами населених пунктів Шарха, Старий Крим та Мраморне. На основі врахування до існуючого критерія сейсмобезпеки параметра частоти коливань сейсмічної хвилі були видані рекомендації щодо сейсмобезпечних параметрів масових вибухів в цих кар'єрах ВАТ "Шархінський кар'єр", ВАТ "Старокримський кар'єр" та ВАТ "Кар'єр Мраморний".

Підтверджено достовірність рекомендацій, оскільки за весь період не лише не було зафіксовано будь-яких пошкоджень будівель (осипання штукатурки тощо), але й нормалізувався психологічний стан у місцевих жителів.

8.4. Прогнозування сейсмобезпеки короткоспівільнених вибухів при неелектричній системі ініціювання з урахуванням суперпозиції хвиль

Аналіз літературних джерел з теоретичних досліджень показав, що дослідження вибуху групи циліндричних зарядів, які найбільш розповсюджені в практиці підричних робіт, часто базуються на заміні подовженого заряду ланцюжком елементарних зосереджених зарядів, а

закономірності, отримані при розв'язанні одновимірних задач, узагальнюються до просторових. Хоч у деяких роботах поставлені й розв'язані просторові задачі про вибух одного або двох циліндричних зарядів у ґрунтовому масиві, однак ці розв'язки неповною мірою розкривають механізм взаємодії між вибухами циліндричних групових зарядів миттєвого чи короткосповільненого підривання. Отже, поряд з широким діапазоном відомих експериментальних досліджень зміни сейсмоефекту при взаємодії хвиль від вибуху системи циліндричних зарядів теоретичні дослідження з оцінки сейсмовипромінювання цих зарядів в повній мірі не вивчені.

Існуючий спосіб прогнозу сейсмічного ефекту КСВ базується на його оцінюванні за максимальною масою всіх свердловинних зарядів ВР, з'єднаних в одну систему ініціювання (групу), що підриваються з інтервалом сповільнення не менше 20 мс. При цьому вважається, що підривання кожного заряду ВР в середині групи проходить без будь яких пауз сповільнення, тим самим не враховується, що кількість ВР, що підривається за одиницю часу зменшується, а загальна тривалість вибуху збільшується. Стосовно оптимального сповільнення, з точки зору якості подрібнення, то воно виконується при умові взаємодії динамічних складових хвиль напруження при послідовному ініціюванні зарядів у ряду і досягається для порід типу гранітів і вапняків, із застосуванням інтервалів сповільнення, значення яких знаходяться в межах менше 20 мс. Тому, подальший розвиток досліджень щодо розробки способу прогнозування сейсмічного ефекту короткосповільненого підривання потребує вивчення хвильових процесів та їх суперпозиції від дії вибуху одиночних і з'єднаних в одну систему ініціювання групових циліндричних зарядів ВР в гірському масиві.

На основі аналізу сучасних досягнень науки та теоретичних узагальнень сформульовано мету досліджень яка полягає у вивченні хвильових процесів та взаємодії хвиль від вибуху одиночних і групових циліндричних зарядів в гірському масиві для удосконалення способу прогнозування сейсмічного ефекту короткосповільненого підривання.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання:

- розробити математичну модель, алгоритм і програму для проведення чисельних розрахунків зі встановлення полів хвильових процесів від дії вибухів одиничних і групових циліндричних зарядів під час миттєвого, та короткосповільненого підривання в гірському масиві;
- розробити методику сейсмічних вимірювань та програмно-математичного забезпечення обробки їх даних відповідно до умов проведення промислових досліджень сейсмічної дії вибухів на кар'єрах;
- встановити інтенсивність сейсмічних хвиль, викликаних миттєвою дією вибухів одиничних, групових розосереджених та зосереджених зарядів ВР у гірському масиві;
- визначити в промислових умовах критерій інтенсивності сейсмічної дії короткосповільненого підривання зарядів вибухової речовини (ВР), з'єднаних різними системами ініціювання, на основі дослідження суперпозиції хвиль, з урахуванням взаємодії тих зарядів ВР, що вибухають з внутрішньогруповими інтервалами сповільнення, в залежності від маси зарядів та тривалості вибуху;
- розробити спосіб прогнозування сейсмічного ефекту короткосповільненого підривання за критерієм інтенсивності сейсмічних хвиль, який враховує суперпозицію хвиль у гірському масиві, та розробити рекомендації з сейсмобезпечного проведення підривних робіт на кар'єрах.

З аналізу результатів досліджень другого розділу встановлено, що тільки у випадку взаємодії зарядів між ними створюються умови суперпозиції хвиль напружень, при яких відсутні "тіньові" зони (спостерігається руйнування породи між зарядами), а масова швидкість пружної хвилі зменшується. При відсутності взаємодії спостерігається суперпозиція сейсмічних хвиль (масова швидкість пружної хвилі збільшується), а утворені "тіньові" зони характеризують відсутність повного руйнування породи між зарядами. З метою підтвердження теоретичних досліджень необхідно було провести апаратні сейсмовимірювання в реальних умовах від дії одиничних та короткосповільнених вибухів. При цьому була вибрана структурна схема апаратної реєстрації коливань та методика оцінки сейсмобезпеки КСВ, які наведені в наступному розділі.

Вивчення параметрів сейсмічних хвиль від дії циліндричних (свердловинних) зарядів проводились в польових та промислових умовах. У першу чергу була визначена організація сейсмічного контролю, вибрана структурна схема апаратурної реєстрації коливань. У другу чергу визначено спосіб прогнозування параметрів сейсмоефекту для різних схем короткосповільненого підривання за сейсмостійкістю споруд, який полягає в тому, що до початку масового вибуху в промислових умовах за існуючою методикою визначався допустимий рівень швидкості коливань для конкретних будівель, які розташовані поблизу місця проведення підривних робіт. Потім тільки після проведеного сейсмоконтролю одержані експериментальні дані з сейсмо- та частотограм за параметрами сейсмічних хвиль. Тобто амплітуди, періоди і швидкості коливань, в залежності від масштабу вибуху, відстаней та маси заряду ВР, що підривається за одиницю часу, використовувались як значення, які не повинні перевищувати визначених допустимих норм.

Завданням польових досліджень було встановлення інтенсивності сейсмічних хвиль від дії вибухів при наявності, відсутності, або взаємодії одиночних, групових розосереджених та зосереджених зарядів, а промислових – вивчення сейсмічних хвиль від дії багатостадійного режиму розвитку детонації зарядів ВР, які послідовно з'єднані різними системами в одну схему КСВ й неодноразово ініціюють з різними масштабами вибуху та масі зарядів ВР, яка миттєво підривається в одиницю часу й викликає або не викликає перевищень допустимої швидкості коливань на об'єкті.

В польових умовах для визначення механічному взаємодії вибухів зарядів та сейсмічної інтенсивності підривання досліджувались вибухи розосередженого та зосередженого зарядів ВР з однаковою масою в дві серії. Серія I складалася з одночасного підривання 6 зарядів масою по 5 кг (вибух 1) і 3-х зарядів по 5 кг (вибух 2). Серія II складалася з зосередженого заряду 15 кг (вибух 3) і зосередженого заряду масою 30 кг (вибух 4). Глибина закладання всіх зарядів становила 1,5 м.

Профіль виміру параметрів сейсмічних хвиль розташовувався в напрямку від місця вибуху, перпендикулярно ряду зарядів ВР, з установкою датчиків на відстанях 150, 242, 322 та 462 м.

На основі отриманих даних побудовано залежність швидкості коливань частинок ґрунту $u(x, z)$ від приведеної відстані r (рис. 8.9). Видно, що два вибухи з однаковою масою ВР, коли один із зарядів розосереджений, а інший зосереджений, мають різні значення масової швидкості коливань. Тобто, навіть при однаковій масі ВР, що підривається миттєво, має значення наявності розосередження заряду. Це явище виникає в результаті взаємодії між зарядами ВР миттєвого підривання.

Аналіз залежностей на рис. 8.6 показує, що сейсмічний ефект вибуху знижується при рівному поділі одного заряду на декілька, за умови таких відстаней між зарядами, які забезпечать утворення суцільної зони руйнування гірничої породи. Якщо відстань не забезпечує руйнування породи між зарядами, то від вибуху зарядів між воронками руйнування утворюються тіньові зони, що змінюють закономірність затухання сейсмічної хвилі та суттєво підвищують значення масової швидкості (крива 2, порівняно з кривою 3). При поділі одиночного зосередженого заряду на частини сумарна маса ВР яких дорівнює масі зосередженого, інтенсивність сейсмічних коливань зменшується на 10 % (крива 1 порівняно з кривою 4). Це пояснюється наявністю взаємодії між зарядами миттєвого підривання.

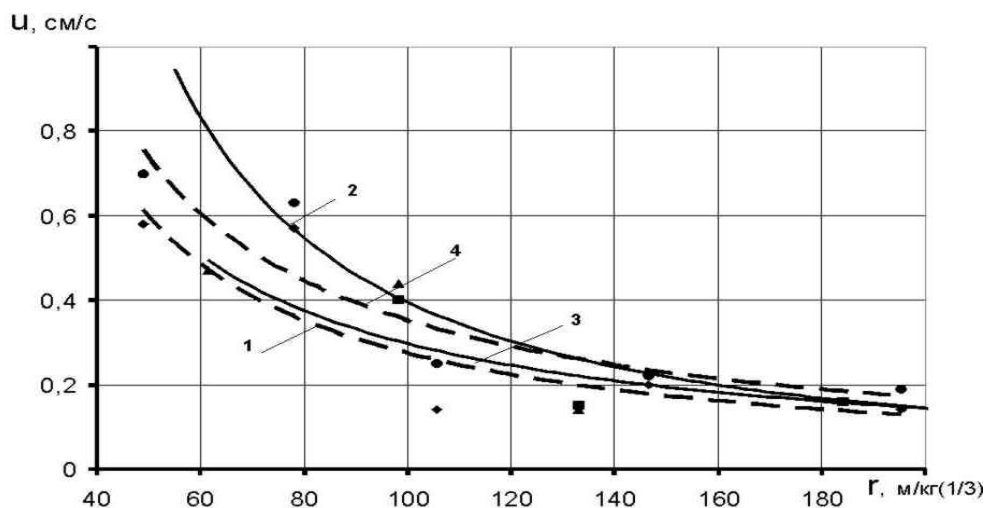


Рис. 8.9. Залежність швидкості коливань частинок ґрунту від приведеної відстані під час вибухів в польових умовах:
 1 – вибух 6-ти розосереджених зарядів масою по 5 кг;
 2 – вибух 3-х зарядів масою по 5 кг; 3 – зосередженого заряду масою 15 кг;
 4 – заряду масою 30 кг

Дослідження в польових умовах дозволили оцінити вплив взаємодії хвильових полів від миттєвих вибухів одиночних і групових зарядів ВР щодо зміни їх інтенсивності в ґрунтовому масиві.

Вивчення дії сейсмовибухових хвиль від різних схем КСВ та систем ініціювання на будівлі проводилось з встановленням основних параметрів сейсмічних хвиль (U_{don} , см/с та T/T_0), одержаних з осцилограм вибуху, які згідно з існуючими дослідженнями слугують для визначення критерію сейсмобезпеки. На основі порівняння параметрів сейсмічних хвиль, одержаних методом оцінки одночасного підривання маси заряду в максимальній групі та методом оцінки маси заряду ВР, що підривається за одиницю часу, розроблявся спосіб оцінки сейсмічного ефекту КСВ. Для кожної схеми вибухової мережі, як по системі ініціювання КЗДШ, так і типу "Нонель" побудовані графіки режиму розвитку вибуху зарядів ВР (в кг), які ініціюють одночасно, в залежності від інтервалів їх сповільнення (мс) рис. 8.10.

На рис. 8.10 наведені порівняльні графіки (а) і (б) для 2-х вибухів з однаковою загальною масою ВР 8500 кг та масою ВР в максимальній групі $Q = 1400$ кг, але з різними періодами сповільнення всіх зарядів t . Одержані на однакових приведених відстанях $60 \text{ м/кг}^{1/3}$ значення швидкостей коливань становлять 0,40 та 0,31 см/с для схем (а) і (б) відповідно.

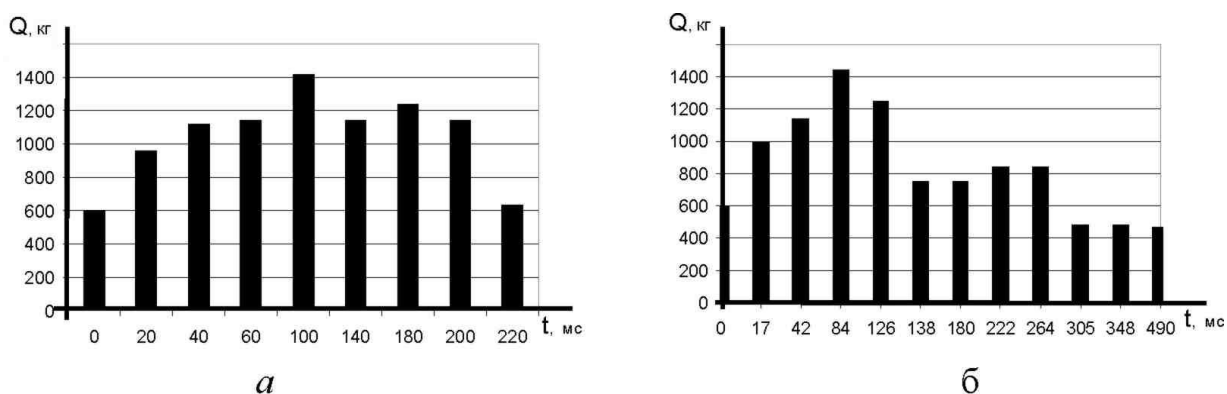


Рис. 8.10. Діаграми розвитку вибуху маси ВР, що ініціює миттєво в кожному інтервалі сповільнення для різних систем ініціювання:
а – КЗДШ; б – система ініціювання типу "Нонель"

При неелектричній системі ініціювання, коли після підривання кожного заряду ВР у межах груп існують паузи сповільнення, тобто зменшується кількість ВР, що підривається за одиницю часу та збільшується загальна тривалість вибуху, що і змінює результуючий сейсмоефект вибуху. Тобто сейсмоефект зменшився на 30 % за схемою (рис. 8.10, б) порівняно з схемою (рис. 8.10, а) Таким чином, хоч за існуючим способом оцінки ці два вибухи оцінюються як вибухи з однаковою сейсмічною інтенсивністю (0,40 см/с; маса заряду в максимальній групі у них однакова, 1440 кг), однак через збільшення пауз сповільнення тривалість вибуху збільшилась, а кількість ВР, що вибухає миттєво, зменшилась, що у відомих способах оцінки не враховано. Тому змінилась інтенсивність сейсмічних хвиль короткочасного вибуху (рис. 8.10, б), тобто отримано різний показник сейсмічної інтенсивності, який визначається з виразу:

$$K_c = \frac{\sqrt[3]{N^n} Q_{заг}}{N \tau_{заг}} \quad (8.17)$$

де N – кількість ступенів сповільнення; $Q_{заг}$ – загальна маса зарядів ВР, кг; $\tau_{заг}$ – тривалість вибуху, в тому числі внутрішньогрупових інтервалів сповільнення та часу протікання детонації в хвилеводі, с.

Вираз $\sqrt[3]{N^n}/N$ враховує ріст інтенсивності в $\sqrt[3]{N^n}$ раз при КСВ з $\tau=0$ (миттєвий вибух) порівняно з зарядами такої ж маси, що розділені інтервалами сповільнення. При цьому показник ступеню n характеризує миттєвий вибух, який визначений емпіричним шляхом при проведенні досліджень миттєвих вибухів зосереджених і розосереджених зарядів однакової маси. Для розосереджених зарядів ВР, в яких під час вибухів виникає взаємодія зон руйнування між ними, показник $n \sim 1$ отримано на основі польових досліджень.

Опираючись на результати цих досліджень, в роботі визначено критерій сейсмічної інтенсивності, який входить в формулу (8.17) і дозволяє оцінити дію КСВ, враховуючи масу ВР, яку підривають за 1 мс:

$$K_{int} = Q_{заг} / \tau_{заг} \quad (8.18)$$

За допомогою запропонованого критерію в роботі враховано розподіл загальної маси заряду ВР на масу, що підривається за одну мілісекунду й впливає на суттєву різницю між сейсмічною дією вибухів з однаковою загальною масою ВР та масою ВР, що вибухає миттєво в максимальній групі, але з різним часом ініціювання всіх зарядів (різними системами ініціювання). На рис. 8.11 на графіках залежностей швидкості коливань частинок ґрунту від приведеної відстані, одержаних для різних систем ініціювання під час вибухів у кар'єрах, одержано менші значення масової швидкості коливань (залежність 2) для СНІЗ, ніж для КЗДШ (залежність 1). Це пояснюється тим, що кількість ВР, що підривається за одиницю часу, зменшилась, а загальна тривалість вибуху збільшилась, тобто зменшився критерій сейсмічної інтенсивності за рахунок наявності пауз сповільнення в групах та меншої швидкості розповсюдження ініціюючої хвилі в хвилеводах СНІЗ типу "Нонель" порівняно з ДШ та електричними.

На основі узагальнення результатів досліджень на гранітних та вапнякових кар'єрах одержаний прогностичний графік сейсмобезпеки короткосповільненого підривання по визначенню обмежень критерію сейсмічної інтенсивності (кг/мс) в залежності від допустимої масової швидкості коливань ґрунту біля будівель (рис. 8.12).

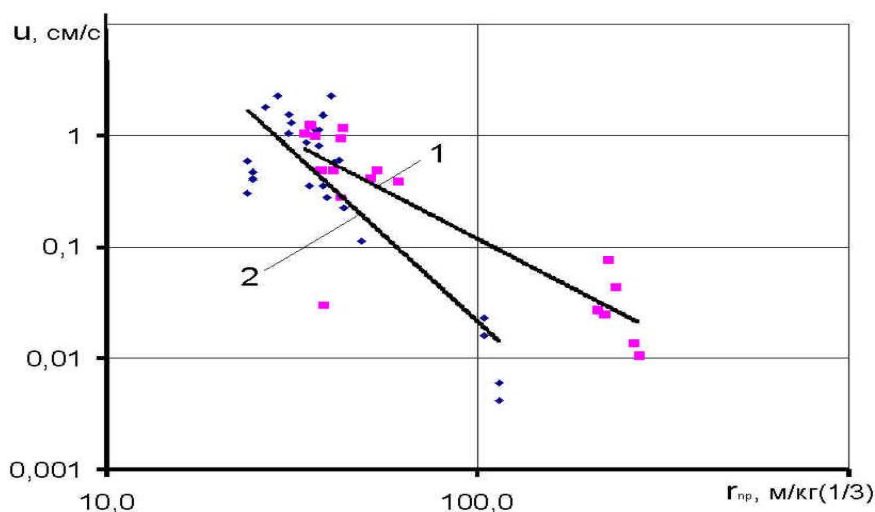


Рис. 8.11. Залежність швидкості коливань частинок ґрунту від приведеної відстані під час вибухів:
1 – система ініціювання КЗДШ та ЕДКС; 2 – неелектричні системи ініціювання

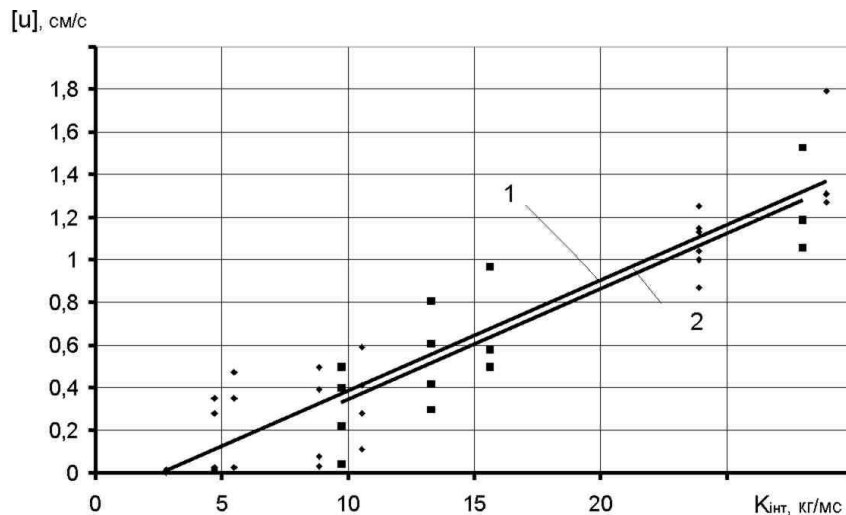


Рис. 8.12. Залежність допустимої масової швидкості коливань часток ґрунту біля будівлі від показника сейсмічної інтенсивності:
1 – для гранітів; 2 – для вапняків

На основі наведених вище результатів випробувань в промислових умовах було визначено рівні сейсмічності КСВ (схем з різною системою ініціювання зарядів багатостадійного режиму розвитку неодночасного ініціювання всіх зарядів ВР, які послідовно з'єднані різними системами в одну мережу вибуху) в залежності від рівня режиму розвитку вибуху в часі всіх зарядів ВР з інтервалами сповільнення, в тому числі й внутрішньогрупових, та часу протікання детонаційного процесу по хвилеводу. Автором виконано сейсмопрогноз КСВ за показником сейсмічної інтенсивності. На основі цього розроблено рекомендації з визначення масштабів масових вибухів, які не наносять ушкоджень на прилеглі об'єкти.

На підставі результатів сейсмодосліджень, виконаних в даному розділі, з метою утворення умов сейсдобезпеки буро-підривних робіт на кар'єрах (особливо в зоні наближення фронту робіт до житлових масивів) розроблено рекомендації, при яких необхідне дотримання таких заходів :

1. Максимальна маса свердловинних зарядів ВР, що підривається в 1 мс, оцінюється за показником сейсмічної інтенсивності та не повинна викликати перевищення допустимої масової швидкості коливань часток ґрунту біля будівлі, що визначаються залежностями на (рис. 8.12).

2. Кількість інтервалів сповільнення на вибух має залежати від показника сейсмічної інтенсивності, який не викликає перевищень допустимої швидкості коливань частинок ґрунту біля будівель.

3. Проектування комутаційних мереж проводиться у відповідності до пунктів 1 і 2 та з забезпеченням відбивання породи таким чином, щоб розвиток детонації зарядів був направленим по можливості від об'єкту, що охороняється.

5. Розбивку сітки свердловин та їх буріння потрібно проводити з розрахунку рівномірного вибухового навантаження на масив, а вимушені окремі відхилення параметрів розташування свердловинних зарядів необхідно враховувати при розрахунках відповідної маси ВР.

6. З метою забезпечення якості і сейсдобезпечного проведення масових вибухів необхідно дотримуватись таких положень:

- контроль виконання робіт згідно з Типовим проектом проводиться до і після масового вибуху;
- до проведення вибуху контроль забезпечує чітку організацію та здійснення підготовчих робіт (зачистка і розбивка блока, буріння, доставка до місця робіт ВР і матеріалу для набійки, заряджання свердловин, їх набійка, монтаж вибухової мережі та ін.), коригування параметрів зарядів, організація і проведення вибуху, оцінка, прийом і браковка окремих видів робіт;
- після виконання вибуху контроль забезпечує оцінку результатів вибуху, виявлення і усунення дефектів виконаних робіт (подрібнення негабаритних кусків гірничої маси, ліквідацію навісів, обробку підшви уступу), загальну оцінку якості подрібнення гірничої маси.

8.5. Алгоритм визначення сейсдобезпечних параметрів вибухів і відстаней

Швидкість коливань ґрунту від вибуху одного зосередженого заряду ВР (V , см/с), розраховують за формулою:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.5}, \quad (8.19)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від умов проведення вибуху і розповсюдження сейсмовибухових хвиль; Q – маса зосередженого заряду ВР, кг; r – відстань від заряду до місця спостереження, м.

Коефіцієнт K , який об'єднує декілька факторів, що по різному впливають на швидкість коливань ґрунту, розраховується як добуток ряду коефіцієнтів:

$$K = K_1 K_2 K_3. \quad (8.20)$$

де K_1 – коефіцієнт, який враховує особливості ґрунту, що висаджують (табл. 8.3); K_2 – коефіцієнт, який враховує особливості ґрунту під фундаментом будівлі (формула (8.21) і табл. 8.4); K_3 – коефіцієнт, який враховує сезонність робіт і має значення: весна і осінь – 1,0; зима – 0,9; літо – 0,8.

Таблиця 8.3. Значення коефіцієнта K_1

Ґрунт, що висаджується	Значення K_1
Скельний вище середньої міцності ($f = 13 - 16$)	200
Скельний нижче середньої міцності ($f = 8 - 12$)	180

Таблиця 8.4. Значення коефіцієнта K_2

Ґрунт під фундаментом будівлі, що охороняється	Значення K_2
Скельний цільний	1,0
Скельний тріщинуватий, порушений	1,6
Галечникові і щебеневі	2,3
Пісчані і глинисті	2,6
Насипні і ґрунтові	5,0

Коефіцієнт K_2 розраховується також за формулою:

$$K_2 = \sqrt{\gamma V_p / (\gamma V_p)_\phi} \quad (8.21)$$

де γ і V_p – об’ємна маса висаджуваного ґрунту та швидкість розповсюдження в новому поздовжньої хвилі; $(\gamma V_p)_\phi$ – те саме під фундаментом будівлі.

Сейсmobезпечна відстань (r_c , м) під час вибуху зосередженого заряду ВР розраховується за формулою:

$$r_c = \left(\frac{K}{V_{дон}} \right)^{2/3} Q^{1/3} \quad (8.22)$$

де K і Q – ті ж самі значення, що і в формулі (8.15); $V_{дон}$ – допустима швидкість коливань ґрунту для охоронного об’єкту.

Сейсmobезпечна маса (Q , кг) зосередженого заряду ВР розраховується за формулою:

$$Q_c = \left(\frac{V_{дон}}{K} \right)^2 r^3, \quad (8.23)$$

де значення параметрів ті ж, що і в формулах (8.20) і (8.22);

Період коливань ґрунту (T , с) у поверхневій (головній) хвилі під час підриву зосередженого заряду ВР у скельному ґрунті розраховується за формулою:

$$T = 0,006 Q^{1/6} \left(\frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{0,44} \quad (8.24)$$

Частота коливань ґрунту (f , Гц) визначається за наступною формулою:

$$f = 1/T \quad (8.25)$$

У гірничій промисловості корисні копалини, в т.ч. і залізні руди, добувають підриванням гірських порід за допомогою рядів свердловинних зарядів. Кількість рядів свердловинних зарядів (m) і кількість свердловинних зарядів в ряду (N) залежить від розміру породного блоку, технічних і технологічних чинників. Свердловинні заряди в ряду підриваються одночасно чи окремо, а ряди – із застосуванням короткоповільненого способу.

У разі вибору оптимальних параметрів короткоуповільненого способу підривання, сейсмічний ефект (швидкість коливань ґрунту, см/с) від підриву всього блоку визначається сейсмічним ефектом від підриву одного ряду свердловинних зарядів (на один ступень уповільнення) або однієї свердловини, тобто підривом N зарядів за наступною формулою [145]:

$$V = KN \left(\frac{Q_{\text{еф}}^{1/3}}{r} \right)^{1.5}, \quad (8.26)$$

де N – кількість свердловинних зарядів, що підриваються одночасно в групі (на один ступень уповільнення) або окремо; r – відстань від пункту спостереження до блоку, який висаджується, м; $Q_{\text{еф}}$ – ефективна маса, що характеризує кожний окремий свердловинний заряд (Q_1 , кг) із ряду розосереджених зарядів за відношенням до виходу енергії у загальний хвильовий процес у результаті одночасного їх підриву та взаємодії зарядів, а отже і втрати частини енергії, в кілограмах, і обчислюють за формулою:

$$Q_{\text{еф}} = Q_1 \left[(1 - 1/N)c + 1/N \right], \quad (8.27)$$

де c – відносна відстань між свердловинними зарядами у разі підривання скельних ґрунтів, м.

$$c = \frac{a}{9\sqrt[3]{Q_1}}, \quad (8.28)$$

де a – відстань між свердловинами за проекту ВР, м.

Сейсмобезпечна відстань (r_c , м), за умов короткоуповільненого підривання блоку гірничих порід рядами розосереджених свердловинних зарядів, розраховується за формулою:

$$r_c = \left(\frac{KN}{V_{\text{дон}}} \right)^{2/3} Q_{\text{еф}}. \quad (8.29)$$

Сейсмобезпечна кількість свердловинних зарядів розосереджених в одному ряду (на один ступінь уповільнення), у разі масового вибуху, розраховується за формулою:

$$N_c = \frac{V_{\text{дон}} r^{1.5}}{K Q_{\text{еф}}}. \quad (8.30)$$

Період коливань ґрунту (T , с) у поверхневій хвилі, у разі одночасного підривання ряду розосереджених свердловинних зарядів у скельному ґрунті, розраховується за формулою [146]:

$$T = 0,012Q_l^{1/6}(0,015l + 1) \left(\frac{r}{Q_1^{1/3}} \right)^{0,38}, \quad (8.31)$$

де Q_l – лінійна маса (погонна витрата) ВР свердловинного заряду, кг/м; l – довжина свердловинного заряду, м; r – відстань від пункту спостереження до блоку, який висаджується, м; Q_1 – маса ВР одного свердловинного заряду, кг.

У формулах (8.19), (8.420) і (8.21) значення коефіцієнтів і параметрів ВР наступні:

K – об'єднуючий коефіцієнт, який залежить від умов проведення вибуху та розповсюдження сейсмічних вибухових хвиль:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7, \quad (8.32)$$

де K_4 – коефіцієнт орієнтації об'єкту відносно висаджуваного блоку (табл. 8.5); K_5 – коефіцієнт ступеня свободи масиву, що підривають (табл. 8.6);

K_6 – коефіцієнт діаметру заряду (табл. 8.7) і формула (8.32); K_7 – коефіцієнт, який ураховує вплив кількості груп зарядів (ступенів) на сейсмічний ефект короткоуповільненого підривання (табл. 8.8) і формула (8.33).

Таблиця 8.5. Значення коефіцієнта K_4

Розташування об'єкта, який підлягає збереженню	Значення k_4
У тилу блоку, який підлягає висаджуванню	1,00
У фланзі блоку, який підлягає висаджуванню: детонація зарядів у блоці спрямована в протилежний бік від об'єкта	0,65
У фланзі блоку, який підлягає висаджуванню: детонація зарядів у блоці спрямована в бік об'єкта	0,85
Перед блоком, який підлягає висаджуванню	0,70

Таблиця 8.6. Значення коефіцієнта K_5

Умови висаджування	Значення k_5
У звичайному фронтальному забої	1,0
У забої з однією вільною поверхнею (проходка траншей на всю довжину і перетин одночасно, висаджування на неприбрану гірничу масу, за числа рядів свердловинних зарядів більше ніж чотири, висаджування в затисненому середовищі тощо)	2,0
У ціликах з (4–5) вільними поверхнями	0,5

Таблиця 8.7. Значення коефіцієнта K_6 в залежності від діаметра зарядів

D_3 , мм	180	215	245	280	320
K_6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8

Коефіцієнт K_6 розраховується також за формулою

$$K_6 = 140d_3^{-0,9}. \quad (8.33)$$

Сейсмічний ефект під час вибуху свердловинних зарядів різного діаметру визначається за формулою (8.25).

Таблиця 8.8. Значення коефіцієнта K_7 від числа груп підривання

Кількість груп (ступенів вибуху)	3	4	5	6	7	8	9	10
K_7	0,75	0,68	0,63	0,6	0,56	0,54	0,52	0,5

Коефіцієнт K_7 розраховується також за формулою

$$K_7 = 1,08 / \sqrt[3]{m}, \quad (8.34)$$

де m – кількість груп зарядів (ступенів уповільнення).

Для досягнення мінімального впливу сейсмічного ефекту під час масового короткоуповільненого підривання гірничого масиву, необхідно(повинно) дотримуватись наступних основних рекомендацій:

- кількість ступенів уповільнення повинно бути не менше ніж 3–4, а сейсмічний хвильовий процес оптимального рівню досягається за 10–12 ступенів;
- маси зарядів повинні бути рівномірно розподілені за ступенем уповільнення, крім перших і останніх ступенів, у яких маси зарядів мають бути на 25–30 % менше, ніж в інших ступенях;
- оптимальний інтервал уповільнення знаходиться у наступних межах по відношенню до періоду коливання ґрунту $\frac{1}{2}T \leq T_s \leq T$; для скельних ґрунтів ($f = 10 - 16$) у залежності від діаметру заряду $T_s = 20-30$ мс.

8.6. Керування інтенсивністю сейсмічного сигналу екрануванням

Провадження вибухових робіт в гірництві та будівельній справі супроводжується поширенням за межами та в межах руйнованого масиву хвиль напружень, які поряд з подрібненням масиву до заданого гранулометричного складу здійснюють шкідливий вплив на навколишні споруди, виробки та сам масив. В залежності від відстані цей вплив виражається в пружно-пластичних (залишкових) та пружних деформаціях. Підвищення якості подрібнення потребує в першу чергу збільшення витрат вибухової речовини, зниження сейсмічного ефекту за межами оброблюваного вибухом блока – зниження витрат ВР, що спричиняє зниження ефективності вибухових робіт або навіть відмову від них. Отже, в конкретних умовах виробництва постає питання розробки комплексного підходу до керування енергією вибуху - збільшення частки енергії, що витрачається на руйнування, і зменшення енергії сейсмічних хвиль. Одним з таких ефективних методів впливу на результат масового вибуху є екранування.

Відомо, що зміна параметрів екранованого підривання подовжених зарядів ВР суттєво впливає як на процеси подрібнення гірської маси, так і на сейсмічну дію вибуху. Сутність методу екранування полягає в утворенні на

межі руйнованого блока контурного ряду, що може бути запроектований в двох варіантах – або з утворенням суцільної монощільни в площині ряду контурних зарядів, або площинної зони інтенсивної тріщинуватості. В обох варіантах контурний екран виконує роль охоронної завіси від сейсмічного впливу на навколишній масив завдяки відбиттю породжених вибухом хвиль і лише частковому їх переломленню в середовище поза підірваним блоком. В той же час частина енергії відбитих хвиль сприяє зростанню часу обробки руйнованого масиву та завдяки додатковій інтерференції хвиль – подальшому подрібненню гірської маси.

В практиці вибухових робіт часто приходиться руйнувати масив безпосередньо поруч до об'єктів, що охороняються. При цьому ми намагаємось одночасно досягнути як підвищення ефективності руйнування гірничої маси так і зниження шкідливої дії сейсмічних коливань не тільки на споруди, що розташовані в зоні дії вибуху, але й на масив в охоронній зоні. Для цього використовують методи екранування сейсмopідривних хвиль тонкими шарами розпушеної породи, що дозволяє знизити сейсмоефект, і контурними щілинами, що сприяють підвищенню ефективності вибухового руйнування.

Фізичні явища, що сприяють процесу екранування, вивчені недостатньо, тому пропонується застосовувати екрани комплексно, тобто для підвищення ефективності вибухових робіт використовувати спільно звичайні і нові типи екранів зі зміненими геометричними, кінематичними та динамічними параметрами. Вирішення задач по визначенню оптимальних параметрів комплексних екранів дозволить в кінцевому результаті підвищити ефективність вибухового руйнування і знизити сейсмічну дію в охоронній зоні.

Сутність комплексного екранування полягає у створенні на кордоні зони, яка руйнується, областей, представлених подрібненим матеріалом з пониженими щільністю породи і швидкістю розповсюдження вибухових хвиль. В загальному випадку ефективність руйнування і ступінь екранування оцінюється відношенням потенціалів масових швидкостей з екранами і без них на однакових відстанях від заряду.

Визначаючим параметром пропонованого способу підривання є розташування комплексного екрану R_e відносно найближчого до нього ряду свердловин. Вірне визначення місця (помилка у визначенні і вимірюванні не повинна перевищувати 15–17 %) дозволяє збільшити ступінь подрібнення руйнованого об'єму при одночасному зниженні сейсмоефекту.

Приймаємо, що об'єкт знаходиться на відстані 120 м від центру вибуху, тобто в сейсмічно небезпечній зоні.

З метою ефективного зниження коливань на значній площі і підвищення ефективності руйнування обираємо екран у вигляді вертикальної зони інтенсивної тріщинуватості. Розрахунок параметрів комплексного екрану виконується в наступній послідовності.

Відстань від екрану до основних зарядів:

$$R_e = r_3 \left(\frac{P_d}{\sigma_{ст}} \right)^{\frac{1}{2}} \sigma_{роз}^k (\rho c u_e)^{-k} = 11,3 \approx 11 \text{ м}, \quad (8.35)$$

де $r_3 = 1,51$ – радіус еквівалентного сферичного заряду, м;

$$r_3 = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 14,5}{4 \cdot 3,14}} = 1,51 \text{ м}, \quad (8.36)$$

де $V = 14,5$ – об'єм сфери сумарного заряду, необхідного для підривання блоку, м^3 ;

$$V = nV_3 = 50 \cdot 0,29 = 14,5 \text{ м}^3, \quad (8.37)$$

де $n = 50$ – кількість свердловин у блоці, що підривається, шт.; $V_3 = 0,29$ – об'єм заряду в одній свердловині, м^3 ;

$$n = \frac{V_{підр}}{V_{підр.1з}} = \frac{14400}{291,6} = 49 \approx 50 \text{ св}, \quad (8.38)$$

де $V_{підр}$ – об'єм блоку, що підривається, м^3 ;

$$V_{підр} = W n_p W n_{св} h_y = 6 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 10 = 14400 \text{ м}^3, \quad (8.39)$$

де $n_p = 4$ – кількість рядів свердловин, згідно з проекту, шт.; $n_{св} = 10$ – кількість свердловин у ряді, шт.;

$$n_{св.у\ ряді} = \frac{V_{щ.т.}}{n_T V_{підр.1з} n_p} = \frac{606000}{52 \cdot 291,6 \cdot 4} = 10 \text{ шт.}, \quad (8.40)$$

де $V_{\text{шт.}} = 606000$ – річна продуктивність кар'єру в щільному тілі, м^3 ; $n_{\text{т}} = 48$ – кількість тижнів в році, при умові що вибух відбувається один раз на тиждень, згідно з проектом; $V_{\text{підр.1з}} = 291,6$ – об'єм масиву, який підриває один заряд, м^3 ;

$$V_{\text{підр.1з}} = h_y a^2 = 10 \cdot 5,42 = 291,6 \text{ м}^3; \quad (8.41)$$

де $P_{\text{д}} = 4 \cdot 10^6$ – середній тиск детонації, кПа ; $\sigma_{\text{ст}} = 240$ – межа міцності граніту на стиснення для об'ємних хвиль, МПа ; $\sigma_{\text{роз}} = 0,2\sigma_{\text{ст}}$ – межа міцності граніту на розрив для об'ємних хвиль, МПа ; $k = 1/2$ – емпіричний коефіцієнт, рівний $1/2$ для циліндричних і $3/2$ для зосереджених зарядів; оскільки використовуються циліндричні заряди, приймаємо коефіцієнт $k = 1/2$; $\rho = 3870$ – середня щільність граніту, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c = 6000$ – середня швидкість розповсюдження пружної хвилі в породі, $\text{м}/\text{с}$; $u_e = 0,61$ – масова (критична) швидкість в гірській породі за екраном при ширині екрану, рівній $\delta_e = 0,5 \text{ м}$, $\text{м}/\text{с}$;

Глибину екрану визначимо з виразу:

$$H_e = k_2 l_3 = 1,6 \cdot 7,7 = 12,32 \text{ м}, \quad (8.42)$$

де l_3 – глибина основних зарядів, м ; k_2 – коефіцієнт, отриманий шляхом досліджень; для міцних порід $k_2 = 1,6$, для порід середньої міцності $k_2 = 1,8$.

Оптимальне значення H_e можна обрати з умови:

$$(1 - H_e / l_3)^\alpha + H_e / l_3 \geq 2, \quad (8.43)$$

де $\alpha = 2$ для міцних порід ($f = 14 \div 18$) і $\alpha = 3$ для порід середньої міцності ($f \leq 12$), так як граніт має міцність $f = 15$, приймаємо $\alpha = 2$; $(1 - 12,32 / 7,7)^2 + 12,32 / 7,7 \geq 2$, $2,02 \geq 2$, умова виконується

Протяжність комплексного екрану:

$$L = 1,5R_e = 1,5 \cdot 11 = 16,5 \text{ м}, \quad (8.44)$$

кількість свердловин (шпурів):

$$n = (L + 1,5R_e) / a + 1 = (16,5 + 1,5 \cdot 11) / 1,65 + 1 = 21,2, \quad (8.45)$$

де $a = 1,65$ – відстань між зарядами, м ;

$$a = k_3 R_e = 0,15 \cdot 11 = 1,65 \text{ м}, \quad (8.46)$$

де k_3 – коефіцієнт, отриманий шляхом досліджень; для шарів розпушеної породи $k_3 = 0,15$, для щілин $k_3 = 0,1$.

Питома витрата зарядів екрана:

$$q_e = k_4 \rho f^{1/2} R_e = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,87 \cdot 15^{1/2} \cdot 11 = 1,154 \text{ кг/м}^2, \quad (8.47)$$

де $f = 15$ – коефіцієнт міцності породи за шкалою М.М. Протод'яконова; k_4 – коефіцієнт, отриманий шляхом досліджень, для суцільних колонкових зарядів у випадку екранування шаром подрібненої породи $k_4 = 7 \cdot 10^{-3}$, для зарядів, розосереджених повітряними пустотами у випадку екранування щілиною попереднього відколу, $k_4 = 2 \cdot 10^{-3}$.

Таким чином, очікувана ступінь екранування на відстані $r = 120$ м складе $B = 4$. На цій відстані в зоні, що охороняється буде забезпечено гарантоване зниження сейсмічних коливань.

Контурне підривання масиву з діагональною схемою короткосповільненого підривання

Контурне підривання дозволяє уникнути порушень скельного масиву гірських порід за межами проектного контуру, забезпечити отримання більш крутих і стійких відкосів уступів і виїмок, зменшити перебури і збільшити стійкість законтурного масиву. Цей ефект досягається шляхом зменшення величини заряду в останньому ряді свердловин.

У нашому випадку контурне висаджування виконується методом попереднього щілиноутворення (рис. 8.13).

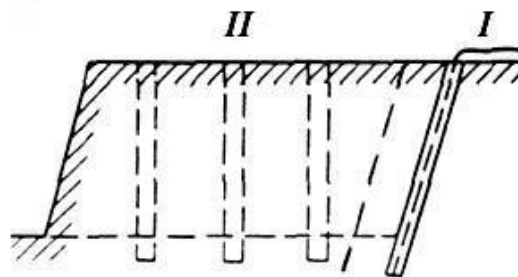


Рис. 8.13. Метод контурного висаджування: попереднє щілиноутворення: I і II – послідовність підривання

Попереднє щілиноутворення це, коли по проектному контуру уступу кар'єра або виїмки заздалегідь бурять і підривають ряд зближених свердловин зменшеного діаметра (60–160 мм), заряджають їх гірляндами з

патронів $d=32$ мм амоніту 6ЖВ розосередженими або шланговими зарядами і підривають до виникнення масового вибуху в приконтурній зоні або сумісно, але з випередженням на 50–100 мс. Між контурними і технологічними свердловинами рекомендується розміщати допоміжний (буферний) ряд свердловин, які мають діаметр однаковий з основним, але розташовуються на відстані в 1,4–1,6 рази меншій і заряджаються суцільним зарядом в поліетиленовій трубі. При цьому діаметр труби складає 0,7 діаметра свердловини, а маса заряду 50–60 % від основного.

Так як основною метою є зменшення сейсмічної дії масового вибуху на навколишнє середовище, необхідно застосувати спосіб контурного підривання з попереднім щілиноутворенням з діагональною схемою короткосповільненого підривання (рис. 8.14). При короткосповільненому підриванні дія кожної серії вибуху не накладається на наступну при забезпеченні інтервалу сповільнення, мс:

$$T_{\text{сп}} \geq 2 \sqrt{\frac{S\gamma}{q}} \geq 2 \sqrt{\frac{116,64 \cdot 3,8}{0,9}} \geq 44 \text{ мс}, \quad (8.48)$$

де $S = 116,64$ – площа поверхні уступу, що припадає на одну свердловину, м^2 ;
 $\gamma = 3,8$ – щільність граніту, т/м^3 ; $q = 0,9$ – питома витрата ВР, кг/м^3 .

Приймаємо інтервал сповільнення $T_{\text{сп}} = 45$ мс.

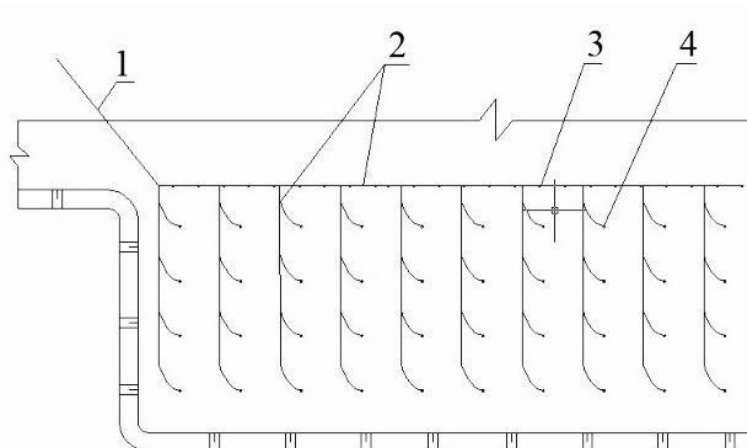


Рис. 8.14. Схема контурного підривання з попереднім щілиноутворенням з діагональною схемою короткосповільненого підривання:
 1 – УНС-ПА-0-100; 2 – УНС-ПА-25-10; 3 – ряд контурних свердловин;
 4 – ряд основних свердловин

Розрахунок основних параметрів при контурному підриванні масиву

Відстань між свердловинами при контурному підриванні:

$$a = 22d_3k_3k_y = 22 \cdot 0,13 \cdot 0,85 \cdot 1 = 2,5 \text{ м}, \quad (8.49)$$

де $d_3 = 0,13$ – діаметр контурного заряду, м; $k_3 = 0,85$ – коефіцієнт затискання, у.о.; k_y – коефіцієнт геологічних умов, у.о.

Коефіцієнт затискання приймають таким: у разі повного затискання (оконтурювання котловану, виїмки тощо) $k_3 = 0,85$; у разі роботи на косогорі або уступі, якщо число рядів свердловин розпушення не менше за два, $k_3 > 3$; у разі завершального контурного відбивання $k_3 = 1,00$, а за меншого числа рядів свердловин розпушення $k_3 = 1,10$.

Коефіцієнт геологічних умов за відсутності яскраво вираженої системи нашарувань або тріщинуватості $k_y = 1,00$; якщо між домінуючою системою тріщин і лінією контуру є кут, що дорівнює 90° , то $k_y = 0,90$, якщо кут дорівнює $20 \dots 70^\circ$, то $k_y = 0,85$; у разі горизонтального залягання, а також якщо геологічні площини збігаються з лінією контуру, то $k_y = 1,15$.

Довжина контурних свердловин повинна перевищувати глибину свердловин для зарядів розпушення на $10 d_k$:

$$L_k = L_c + 10d_{к.з.} = 11,7 + 10 \cdot 0,11 = 12,8 \text{ м}, \quad (8.50)$$

де $L_c = 11,7$ – глибина свердловин з урахуванням перебуру, м; $d_k = 0,11$ – діаметр контурних свердловин, м;

Відстань між контурними зарядами та свердловинами розпушення для міцних порід:

$$a_{к.з.} = 20d_3 = 20 \cdot 0,032 = 0,64 \text{ м}, \quad (8.51)$$

Приймаємо $a_{к.з.} = 0,7$ м.

Відстань між рядами контурних і основних зарядів в міцній породі:

$$b_k = 18d_{зр.} = 18 \cdot 0,22 = 3,96 \text{ м}, \quad (8.52)$$

де $d_{зр.} = 0,22$ – діаметр свердловин розпушення, м;

Довжина забійки в контурній свердловині:

$$l_{зб} = a_k = 0,7 \text{ м}. \quad (8.53)$$

Довжина заряду в контурній свердловині:

$$l_{з.с.} = L_k - l_{зб} = 12,8 - 0,7 = 12,1 \text{ м}. \quad (8.54)$$

Маса контурного заряду по лінійній густині (місткості):

$$Q_k = l_{з.с} \cdot p' = 12,1 \cdot 0,4 = 4,84 \text{ кг}, \quad (8.55)$$

де $p' = 0,4$ – лінійна густина заряджання амоніту 6ЖВ, кг/м.

Витрата ВР на серію контурних зарядів по поверхні відколі в міцних породах (базова питома витрата ВР для контурного підривання в міцних породах $q_{\sigma} = 1,1$ кг/м²).

$$Q_{в.р} = q_{\sigma} \cdot S = 1,1 \cdot 1440 = 1584 \text{ кг}. \quad (8.56)$$

В практиці вибухової справи застосовуються в практиці два способи зменшення сейсмічного ефекту від масових вибухів (екранування та контурне підривання з попереднім щілиноутворенням), кожен з яких зменшує небезпечний радіус сейсмічної дії. До першого способу слід віднести варіант екранування дії вибуху шаром подрібненого матеріалу. Дослідження показали, що при розміщенні такого екрану шириною 0,5 м на відстані 11,0 метрів від центра вибуху забезпечується ступінь екранування $B = 4$. Питомі витрати вибухової речовини майже однакові в обох випадках (1,154 кг/м² – при застосуванні екрану; 1,1 кг/м² – при попередньому щілиноутворенні).

Необхідно зауважити, що проведення екрану відбувається до вибуху, але незалежно від нього, тобто ми можемо провести одноразово екран на шляху розповсюдження сейсмічних хвиль перед будівлями, що охороняються, і таким чином підривати декілька блоків, без повторного проведення захисного шару. А при використанні схеми контурного підривання з попереднім щілиноутворенням, підривання контурного ряду здійснюється безпосередньо за 45 мс до вибуху основних зарядів і тому кожен блок необхідно оконтурювати рядом свердловин для попереднього щілиноутворення. Це призведе до значних витрат ВР та збільшення трудомісткості робіт.

Отже найбільш доцільним буде застосування способу екранування дії вибуху шаром подрібненої породи.

8.7. Технологічні параметри методу екранування для керованого подрібнення масиву зарядами в рукавах

Ефективність підривних робіт на гірничодобувних підприємствах в різних галузях промисловості залежить, у першу чергу від правильного вибору їх параметрів на стадії проектування. При цьому розрахункові значення параметрів повинні відповідати умовам висадження як за геометричними характеристиками розташування в плані підірваного об'єму порід, так і за витратами енергії вибуху на їх подрібнення. До того ж методика розрахунку в типових проектах повинна базуватися на досягненнях науки і практики.

Технологічні рішення, спрямовані на підвищення керованості вибуховим процесом, призначені як для забезпечення вибіркового напрямку порушення цілісності гірського масиву монощілиною чи площинною зоною руйнування, так і для покращення ступеня подрібнення масиву в межах, оконтурених цією монощілиною або зоною. В сучасних умовах ведення масових вибухів на кар'єрах будівельних матеріалів з подальшим заглибленням гірничих робіт ускладнюється гідрогеологічна ситуація, що потребує розробки методів ведення БВР з застосуванням заходів по гідроізоляції зарядів сумішевих ВР на основі гідрофобних компонентів. Одним з дієвих засобів гідроізоляції є поліетиленові рукави.

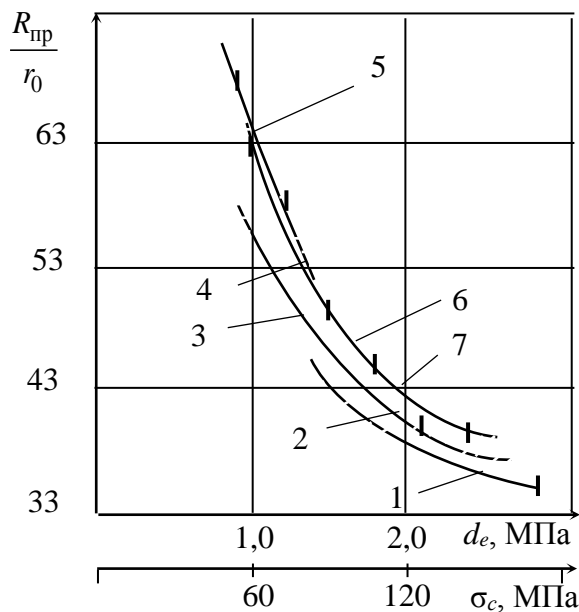
У зв'язку з використанням при виробництві масових вибухів свердловинних зарядів у поліетиленових рукавах [55, 147] традиційно застосовувані методики розрахунку параметрів масових вибухів [27, 59] не задовольняють у ряді випадків сучасним вимогам, обумовленим специфікою даного методу висадження. Як відзначалося вище, на даному етапі стан підривних робіт в Україні характеризується переходом від тротиловмісних ВР до найпростіших і емульсійних з використанням конверсійних матеріалів. Для цих цілей обґрунтованих рекомендацій поки не розроблено. За наявними результатами досліджень показана ефективність застосування технології заряджання свердловин зарядами найпростіших неводостійких ВР у ПР [27].

В основу методики покладені встановлені закономірності подрібнення анізотропних скельних порід при різних відстанях від зарядів [147, 148]. За основний параметр прийнятий радіус зони з технологічно обґрунтованим максимальним ступенем подрібнення порід η_T для стандартної ВР. Перехід до іншого типу ВР або до інших умов здійснюється за допомогою перерахування по запропонованим формулам.

Технологічний радіус зони подрібнення визначається на базі граничного радіуса руйнування.

Граничний радіус $R_{пр}$ зони руйнування визначається на першому етапі для еталонної ВР (грамоніт 79/21) і номінальних умов (масив однорідний, нетріщинуватий; висота уступу $H_y = 15$ м; заряд без рукава і без забивки; довжина заряду $l_3 = 12$ м; мінімальний ступінь подрібнення $\eta_T = 1$).

Граничний радіус зони руйнування для еталонного заряду може бути визначений для конкретних гірських порід по номограмі (рис. 8.15), що отримана чисельними розрахунками по математичній моделі.



- 1 – піщаник карбонатний ($\sigma_c = 120\text{--}175$ МПа);
- 2 – піщаник дрібно- і середньозернистий ($\sigma_c = 100\text{--}120$ МПа);
- 3 – піщаник глинистий з алевролітом ($\sigma_c = 60\text{--}100$ МПа);
- 4 – алевроліт дрібнозернистий ($\sigma_c = 105\text{--}135$ МПа);
- 5 – аргіліт ($\sigma_c = 10\text{--}77$ МПа);
- 6 – алевроліт грубозернистий ($\sigma_c = 82\text{--}105$ МПа);
- 7 – алевроліт карбонатний ($\sigma_c = 110\text{--}155$ МПа)

Рис. 8.15. Номограма визначення граничного радіусу зони руйнування для еталонного заряду ВР в різних гірничих породах

При перерахунку на застосування іншого типу ВР радіус зони руйнування визначається за формулою:

$$R_{np1} = R_{np} \left(\frac{\rho_{BB}}{\rho_{79/21}} \right) K_{BB} K_0 K_1, \quad (8.57)$$

де ρ_{BB} , $\rho_{79/21}$ – щільність відповідно іншої ВР і еталонного грамоніту 79/21, кг/м³; K_{BB} – перевідний коефіцієнт від амоніту 6 ЖВ до інших типів ВР (приймається за таблицями відносної працездатності ВР); K_1 – коефіцієнт, що враховує перехід від уступу $H_y = 12$ м до уступу довільної висоти ($K_1 = \sqrt{H_y} / 15$); K_0 – коефіцієнт, що враховує вплив оболонки заряду r_0/r_c і ступінь підривної порід (ЛП – легкопідривні; СП – середньопідривні і ВП – важкопідривні). Значення K_0 змінюються в спосіб, який показаний у табл. 8.9.

Таблиця 8.9. Значення коефіцієнта K_0

r_0/r_c	1–0,9	0,9–0,8	0,8–0,7	0,7–0,6	0,6–0,5
ЛП	1,0	1,0	1,0	0,95	0,85
СП	1,0	1,0	0,95	0,85	0,75
ВП	1,0	0,95	0,85	0,75	0,6

Технологічно обґрунтований (мінімальний) ступінь подрібнення порід η_T у масиві обмежується розмірами ковша екскаватора E (м³), тоді:

$$\eta_T = d_e / 0,6 \sqrt[3]{E}, \quad (8.58)$$

де d_e – розмір окремоностей у масиві, м; при $\eta_T < 1,5$ приймається значення, рівне 1,5 (рис. 8.15).

Для забезпечення прийнятого ступеня подрібнення ($\eta_T \geq 1,5$) необхідно визначити технологічний радіус зони руйнування R_T , що буде трохи менше $R_{ПР}$, тобто

$$R_T = R_{ПР} - \Delta R, \quad (8.59)$$

де ΔR – зменшення радіуса зони руйнування для забезпечення прийнятої технологічно обґрунтованого ступеня подрібнення, м. Ця поправка визначається по номограмі (рис. 8.16) або розраховується за формулою:

$$\Delta R = (R_{ПР} - r_0) [1 - (1/\eta_T)^{1/q}], \quad (8.60)$$

де q – коефіцієнт, що враховує тип породи ($q = 2$ – міцний піщаник; $q = 1,7$ – алевроліти; $q = 1,4$ – аргіліти).

Лінія найменшого опору порід по підшві уступу, м:

$$W = 1,6R_T. \quad (8.61)$$

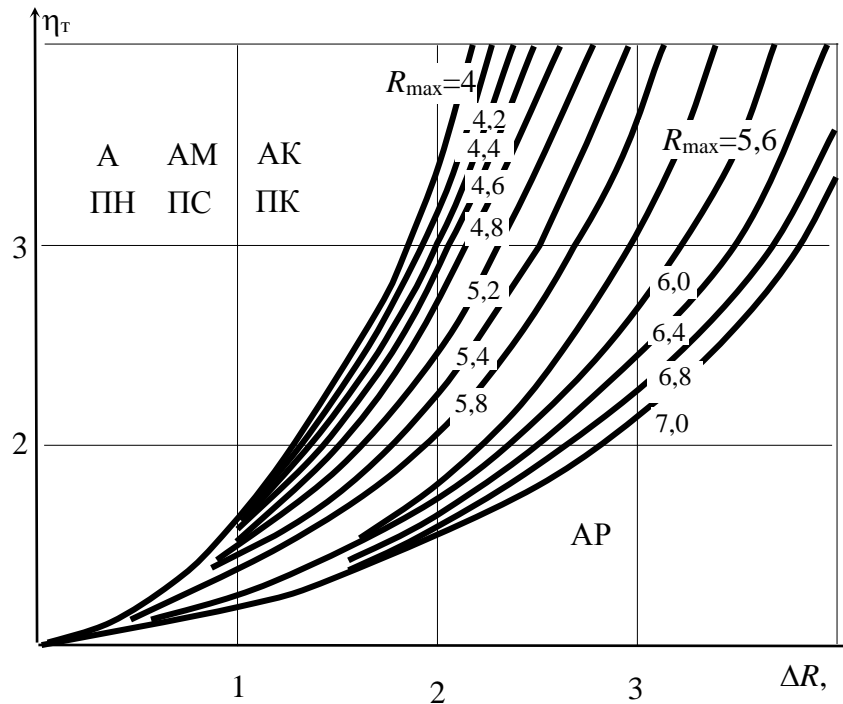


Рис. 8.16. Номограма для визначення технологічного радіуса зони руйнування гірських порід: А, АМ, АК – алеволіти відповідно карбонатний, дрібнозернистий, крупнозернистий; ПМ, ПС, ПК – піщаники відповідно дрібнозернистий, середньозернистий, крупнозернистий; АР – аргіліт

Відстань між свердловинами за прийнятою схемою короткосповільненого висадження визначається з урахуванням середнього часу сповільнення на свердловину для квадратної сітки:

$$a = R_T(1 + K_T) K_3, \quad (8.62)$$

де $K_T = 1 + 0,006\tau$ – коефіцієнт, що враховує середній час сповільнення на одну свердловину; τ – час сповільнення, мс; K_3 – коефіцієнт, що враховує вплив забивки ($K_3 = 1$ – без забивки; $K_3 = 1,15$ – із забивкою).

Відстань між рядами свердловин:

при одночасному висадженні $b = a$;

при сповільненому висадженні:

$$a = R_T(1 + K_{Ta})K_3; \quad (8.63)$$

$$b = R_T(1 + K_{Tb})K_3, \quad (8.64)$$

де $K_{\tau a}$ і $K_{\tau b}$ – коефіцієнти, що враховують час сповільнення відповідно між свердловинами в ряді і між свердловинами в суміжних рядах, м.

Довжина заряду:

$$l_3 = l_c - l_{\text{заб}}, \quad (8.65)$$

де $l_{\text{заб}}$ – довжина забивки, м (визначається пропорційно довжині свердловини l_c).

Довжина перебуру:

$$l_{\text{пер}} = 2\sqrt{l_c/12}. \quad (8.66)$$

Тріщини в масиві за рахунок відбивання, перерозподіляють енергію вибуху, концентруючи її в одних напрямках і різко знижуючи в інші, тобто спостерігається вплив анізотропії порід]. Це видно із кругової діаграми енергетичної провідності при вибуховому руйнуванні гірських порід (рис. 8.17, а). При сильно вираженій анізотропії порід ($K_a < 1$, де K_a – коефіцієнт анізотропії) відстань між зарядами визначається з урахуванням діаграми енергетичної провідності (рис. 8.17, б). Потім встановлюються раціональні напрямки відбивання і пов'язані з ними напрямки розташування рядів свердловин стосовно до конкретної схеми висадження.

В умовах кар'єрів можна вважати, що $\varphi_{a_1} = \varphi_{a_2}$. Тоді відстань між зарядами в рядах:

$$a_1 = \sqrt{\frac{k_{S ab}}{K_a \sin(\phi_{a_1} + \phi_{a_2})}}; \quad (8.67)$$

$$a_2 = K_a a_1, \quad (8.68)$$

де $k = 1,1-1,3$ – коефіцієнт збільшення виходу гірської маси за рахунок більш рівномірного розподілу енергії вибуху; a і b – розміри сітки свердловин без врахування тріщинуватості масиву, м.

У процесі оконтурювання блоку прив'язка свердловин на ньому здійснюється не до бровки уступу, а до лінії простягання шарів тріщин. По контуру блоку буряться додаткові свердловини в точках з недостатньою насиченістю енергією.

Пропонована методика розрахунку параметрів може бути використана при заряджанні обводнених і сухих свердловин зарядами ВР будь-якої щільності при їхньому формуванні в поліетиленових рукавах.

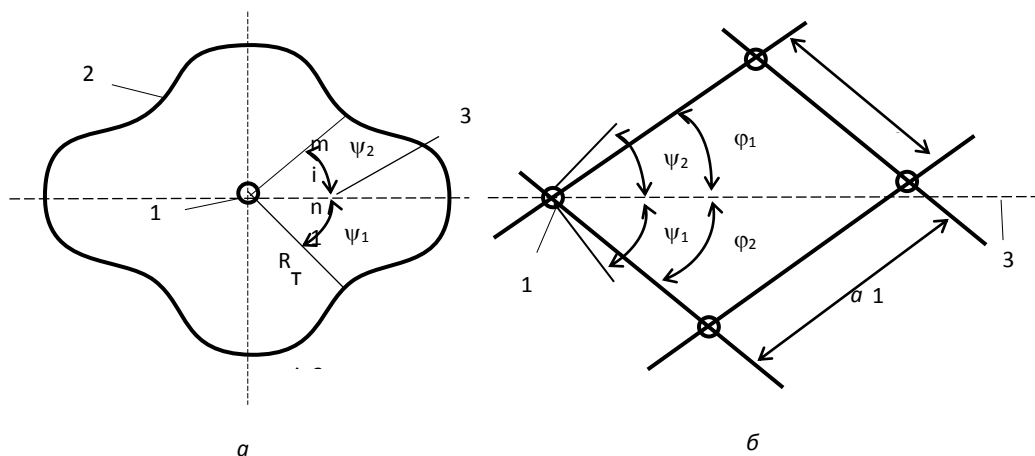


Рис. 8.17. Полярна діаграма енергетичної провідності (а) і елементи сітки розташування свердловин (б):

1 – заряд ВР; 2 – контур діаграми енергетичної провідності, $R_m = f(\psi)$; 3 – простягання шарів породи або напрямок максимального руйнування порід

У зв'язку зі специфікою методу висадження в рукавах необхідно ретельно підходити до визначення маси заряду і довжини поліетиленового рукава. Тому враховуються співвідношення поперечних розмірів рукава і свердловини, вигин заряду в свердловині, а також необхідність збільшення висоти колонки заряду для одержання аналогічної якості подрібнення порід при переході до зарядів у рукавах зменшеного діаметра.

Для сухих свердловин маса заряду в поліетиленовому рукаві:

$$Q_p = k_e Q_c \left(d_p / d_c \right)^2 + \Delta h p, \quad (8.69)$$

де Q_c – маса ВР у сухій свердловині без рукава, кг; k_e – коефіцієнт, що враховує вигин рукава в свердловині; d_p, d_c – діаметр, відповідно, рукава і свердловини, м; Δh – збільшення висоти заряду при заряджанні в рукав, м; p – місткість ВР у рукаві, кг/м.

У реальних умовах $k_e = 1,025-1,1$ при $d_p/d_c = 0,6-0,9$; величина $\Delta h = 0,5-1,5$ м при $d_p/d_c = 0,9-0,6$.

Маса заряду в рукаві в обводненій свердловині встановлюється шляхом перерахування заряду в цій свердловині без рукава. У цьому випадку

необхідно додатково враховувати ущільнення ВР при водонасиченні заряду ВР усередині рукава. У таких умовах відбувається ускладнена, у порівнянні із сухими, деформація заряду, що враховується коефіцієнтом вигину заряду $k_g = 1,03-1,15$ (більше його значення відповідає $d_p/d_c = 0,6$ і висоті стовпа води, близької до висоти заряду).

Для практики значення Q_p можна визначити за табл. 8.10, у якій наведені дані для зарядів граммоніта 79/21 у рукаві ($d_p = 0,18$ м), розташованого в обводненій свердловині ($d_c = 0,216$ м). Для визначення Q_p по цій таблиці можуть бути використані проектна висота і маса заряду в свердловині без рукава.

Використання найпростіших ВР не гарантує стійку детонацію в зоні можливого замочування. Тому при заряджанні найпростіших ВР у рукави необхідно враховувати наступне:

- частина заряду найпростіших ВР, поміщених у рукав, що може замокати, повинна розташовуватися в контакті із частинами заряду ВР, що стійко детонує при замочуванні;
- довжина замоченої частини заряду найпростіших ВР не повинна перевищувати припустимої довжини інертного проміжку в заряді;
- у замоченій частині заряду краще застосовувати найпростіші сумішеві ВР, не схильні до розшарування при замочуванні, наприклад, які містять твердий горючий компонент.

З врахуванням викладеного кількість промислових і найпростіших ВР у рукаві може бути розраховано виходячи з висоти стовпа рідини в рукаві. Рівень розчину селітри в рукаві H_p із урахуванням щільності визначається за формулою:

$$H_p = \frac{\rho_g}{\rho_p} \cdot H_{g3} \approx 0,75 H_{g3} \quad (8.70)$$

де ρ_g, ρ_p – відповідно, щільність води і розчину селітри, кг/м³; H_{g3} – висота стовпа води в зазорі між рукавом і стінкою свердловини, м,

$$H_{g3} = k_{\phi} H_{g0} d_c^2 / (d_{cg}^2 - 0,9p), \quad (8.71)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації води через тріщини в стінках свердловини ($k_{\phi} = 0,5-0,95$); H_{e0} – первісний рівень води в свердловині, м.

Таблиця 8.10. Основні параметри свердловинних зарядів

Параметри зарядів без рукавів	Відношення висот стовпа води і заряду в свердловині																				
	0,1		0,2		0,3		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		0,9		1,0		
250	2,5	193	5,0	203	5,0	213	5,5	220	5,5	233	6,0	250	6,0	270	6,5	288	7,0	305	7,5	325	8,0
	6,9	0,7	7,0	1,4	7,0	2,1	7,0	2,8	8,0	3,5	8,5	4,2	9,0	4,9	10,0	5,6	10,5	6,3	11,0	6,9	12,0
300	7,5	231	6,0	243	6,0	255	6,5	264	6,5	279	7,0	300	7,5	324	8,0	345	8,5	366	9,0	390	10,0
	8,3	0,8	8,5	1,7	8,5	2,5	8,5	3,3	9,0	4,2	10,0	5,0	11,0	5,8	12,0	6,6	12,5	7,5	13,5	8,3	14,5
350	9,0	270	7,0	284	7,0	298	7,5	308	8,0	326	8,0	350	9,0	378	9,5	403	10,0	427	10,5	455	11,5
	9,6	1,0	10,0	2,0	10,0	3,0	10,0	3,9	10,5	4,9	11,5	5,8	12,5	6,8	13,5	7,7	14,5	8,7	15,5	9,6	16,5
400	10,0	308	8,0	324	8,0	340	8,5	352	9,0	372	9,5	400	10,0	432	11,0	460	11,5	488	12,0	520	13,0
	11,0	1,0	11,0	2,2	11,0	3,3	11,0	4,4	12,0	5,5	13,5	6,6	14,5	7,7	15,5	8,8	16,5	9,9	17,5	11,0	19,0
450	11,0	347	8,5	365	9,0	383	9,5	396	10,0	419	10,5	450	10,5	486	12,0	518	13,0	549	14,0	585	14,5
	12,4	1,2	12,5	2,5	12,5	3,7	12,5	5,0	14,0	6,2	15,0	7,4	17,0	8,7	17,5	10,0	19,0	11,2	20,0	12,4	21,5
500	12,5	385	9,5	405	10,0	425	10,5	440	11,0	465	11,5	500	13,5	540	13,5	575	14,5	610	15,0	650	16,0
	13,8	1,4	14,0	2,8	14,0	4,3	14,0	5,7	15,5	6,9	17,0	8,3	18,0	9,7	19,5	11,0	21,0	12,4	22,5	13,8	23,5
550	14,0	424	10,5	446	11,0	468	12,0	484	12,0	512	13,0	550	14,0	594	15,5	633	17,0	671	17,0	715	18,0
	15,7	1,6	16,0	3,2	16,0	4,7	16,0	6,3	17,5	8,9	19,0	9,5	20,5	11,1	22,0	12,7	24,0	14,2	25,5	15,7	27,0
600	15,0	462	11,5	486	12,0	510	13,0	528	13,0	558	14,0	600	15,0	648	16,0	690	17,0	732	18,5	780	19,5
...

Примітка. Цифри в стовпцях для зарядів без рукавів, записані у вигляді:

a	v
-----	-----

a	v
-----	-----

, позначають: a – маса заряду ВР без рукава, кг; v – кількість мішків ВР, шт.; c – висота заряду ВР без рукава, м; цифри в стовпцях для зарядів у рукавах, записані у вигляді позначають: a – маса заряду в рукаві; v – кількість мішків ВР, шт; c – глибина свердловини; d – глибина стовпа води в свердловині

Результати розрахунку висоти стовпа рідини в рукаві обумовлюють визначення кількості різних ВР, що заряджаються в рукав в обводнену свердловину. У процесі переміщення ВР у рукаві при заряджанні свердловин всі деформації стовпа ВР компенсуються збільшенням довжини рукава L_p , яка розраховується за формулою

$$L_p = K_{BB}H_{BB} + (1 + K_n[\varepsilon_n])H_n, \quad (8.72)$$

де K_{BB} – коефіцієнт запасу рукава, що забезпечує формування стовпа речовини; $H_{BB} = H_v + \Delta h$ – висота стовпа ВР у рукаві, м; K_n – коефіцієнт запобіжного запасу рукава; $[\varepsilon_n]$ – гранична поздовжня деформація матеріалу рукава на розтяг; H_n – висота незаповненої частини свердловини над стовпом речовини, м,

$$K_{BB} = 1 + K_{\varepsilon 1} + K_{\varepsilon 2} + K_{\varepsilon 3}, \quad (8.73)$$

де $K_{\varepsilon 1}$ – коефіцієнт затрат рукава на зморщення в процесі усадки стовпа речовини; $K_{\varepsilon 2}$ – коефіцієнт затрат рукава на вигин стовпа речовини в свердловині; $K_{\varepsilon 3}$ – коефіцієнт затрат рукава на оминання виступів стінок свердловини.

Значення $K_{\varepsilon 1}$ в сухій частині свердловини дорівнює 0,01–0,05, в обводненій – 0,6–0,65; $K_{\varepsilon 2}$ при $d_p/d_c = 0,95$ дорівнює 0,02–0,03 і при $d_p/d_c = 0,6$ – 0,12–0,15; $K_{\varepsilon 3}$ при $d_p > d_c$ дорівнює 0,001–0,002, при $d_p \leq d_c$ – 0,01–0,03.

Коефіцієнт K_n носить характер запасу надійності підтримки зв'язку з поверхнею стовпа речовини. При тривалому знаходженні заряду в сухій свердловині до 7 діб $K_n = 1$ –3, в обводненій, з урахуванням можливого вимивання заряду, $K_n = 5$ –10.

Для спрощених розрахунків довжини рукава може бути використана формула:

$$L_p \geq H_c + H_v, \quad (8.74)$$

де H_c – глибина свердловини, м; H_v – висота стовпа води в свердловині, м.

Методика передбачає для підвищення ефективності дії вибуху і зниження вартості вибухових речовин використання різних методів попереднього підривного водозниження. Це може реалізовуватися малопотужними вибухами в технологічних або спеціальних свердловинах, а

також попереднім щілиноутворенням. Щілиноутворення здійснюється спеціальними лінійними або гірляндними зарядами, а також вибуховими речовинами з добавками, що знижують їхню потужність.

Провадження вибухових робіт в гірництві та будівельній справі супроводжується поширенням за межами та в межах руйнованого масиву хвиль напружень, які поряд з подрібненням масиву до заданого гранулометричного складу здійснюють шкідливий вплив на навколишні споруди, виробки та сам масив. В залежності від відстані цей вплив виражається в пружно-пластичних (залишкових) та пружних деформаціях. Підвищення якості подрібнення потребує в першу чергу збільшення витрат вибухової речовини, зниження сейсмічного ефекту за межами оброблюваного вибухом блока – зниження витрат ВР, що спричиняє зниження ефективності вибухових робіт або навіть відмову від них. Отже, в конкретних умовах виробництва постає питання розробки комплексного підходу до керування енергією вибуху - збільшення частки енергії, що витрачається на руйнування, і зменшення енергії сейсмічних хвиль. Одним з таких ефективних методів впливу на результат масового вибуху є екранування.

Відомо, що зміна параметрів екранованого підривання подовжених зарядів ВР суттєво впливає як на процеси подрібнення гірської маси, так і на сейсмічну дію вибуху. Сутність методу екранування полягає в утворенні на межі руйнованого блока контурного ряду, що може бути запроектований в двох варіантах – або з утворенням суцільної монощілини в площині ряду контурних зарядів, або площинної зони інтенсивної тріщинуватості. В обох варіантах контурний екран виконує роль охоронної завіси від сейсмічного впливу на навколишній масив завдяки відбиттю породжених вибухом хвиль і лише частковому їх переломленню в середовище поза підірваним блоком. В той же час частина енергії відбитих хвиль сприяє зростанню часу обробки руйнованого масиву та завдяки додатковій інтерференції хвиль – подальшому подрібненню гірської маси.

В практиці вибухових робіт часто доводиться руйнувати масив безпосередньо поруч з об'єктами, що охороняються. При цьому ми

намагаємось одночасно досягнути як підвищення ефективності руйнування гірничої маси, так і зниження шкідливої дії сейсмічних коливань не тільки на споруди, що розташовані в зоні дії вибуху, але й на масив в охоронній зоні. Для цього використовують методи екранування сейсмopідривних хвиль тонкими шарами розпушеної породи, що дозволяє знизити сейсмоефект, і контурними щілинами, що сприяють підвищенню ефективності вибухового руйнування.

Фізичні явища, що сприяють процесу екранування, вивчені недостатньо, тому пропонується застосовувати екрани комплексно, тобто для підвищення ефективності вибухових робіт використовувати спільно звичайні і нові типи екранів зі зміненими геометричними, кінематичними та динамічними параметрами. Вирішення задач по визначенню оптимальних параметрів комплексних екранів дозволить в кінцевому результаті підвищити ефективність вибухового руйнування і знизити сейсмічну дію в охоронній зоні.

Сутність комплексного екранування полягає у створенні на межі зони, яка руйнується, областей, представлених подрібненим матеріалом з пониженими щільністю породи і швидкістю розповсюдження вибухових хвиль. В загальному випадку ефективність руйнування і ступінь екранування оцінюється відношенням масових швидкостей в масиві з екраном і без нього на однакових відстанях від заряду.

Визначальним параметром пропонованого способу підривання є відстань комплексного екрану R від найближчого до нього ряду свердловин. Вірне визначення місця (помилка у визначенні і вимірюванні не повинна перевищувати 15-17%) дозволяє збільшити ступінь подрібнення руйнованого об'єму при одночасному зниженні сейсмоефекту.

8.8. Апаратурні комплекси для дослідження оцінки впливу сейсмічних та ударної повітряної хвиль на довкілля і визначення допустимих норм під час проведення вибухових робіт

Відповідно до вимог п.2 ст.6 Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» 2059-VIII від 23 травня 2017 року з дотриманням екологічних, санітарно-гігієнічних, протипожежних, містобудівельних й територіальних обмежень згідно діючих нормативних документів в тому числі для гірничо-видобувних підприємств є обов'язковими розробка «Звіту з оцінки впливу на довкілля» (ОВД) і висновків з оцінки впливу на довкілля, у яких визначено допустимість провадження планової діяльності у видобуванні корисних копалин або його продовженні (ч.3 ст. 11 Закону України «Про оцінку впливу на довкілля»), що видається Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України стосовно оцінки впливу на довкілля сейсмічних та ударно-повітряних хвиль під час проведення вибухових робіт до відповідно розробленого «Плану проведення після проектного моніторингу впливу на довкілля» підприємство зобов'язано проводити «Моніторинг величин сейсмічних коливань і ударно-повітряних хвиль при виконанні масових вибухів» із залученням спеціалістів, які мають відповідний дозвіл на цей вид діяльності (наприклад Науково-дослідна лабораторія проблем сейсмічної безпеки технологічних вибухів інституту гідромеханіки НАН України, НВПІП «СКТБ ГЕОФІЗИК» <https://www.mining-consulting.com/> та ін.). Останні проводять інструментальні записи сейсмічних і ударно-повітряних хвиль при їх поширенні в гірничому масиві та в повітрі під час проведення вибухових робіт при видобутку корисних копалин або встановлення сейсмобезпеки вибуху для охоронних будівель і на основі моніторингових вимірів видають заключення щодо оцінки допустимого сейсмічного впливу і ударно-повітряної хвилі на довкілля. Ці дослідження вимагають розробки положень і вимірювальних засобів служби вимірювань, їх ефективного функціонування у розв'язуваних наукових завданнях і їхнього використання у конкретних умовах. Обрана апаратура повинна забезпечити не тільки виміри основних параметрів сейсмічних хвиль (амплітуди,

швидкості, прискорення коливань), значення порогу звукового тиску ударно-повітряної хвилі (в ДБ), але і програму спектрального аналізу всього коливального процесу "місце вибуху (короткоуповільнених вибухах системи зарядів вибухової речовини (ВР) при видобутку корисних копалин) у взаємозв'язку з довкіллям (сейсмостійкістю будівель і споруд, застосування та ін.). Таким чином, одним із завдань, які ставилися для досягнення мети цього розділу, було визначення існуючих структурних схем апаратурної реєстрації коливань, яка б при обробці результатів вимірів дозволила одержати достовірні дані в умовах проведення різних вибухів. Таким вимогам для запису параметрів сейсмодинамічних хвиль (СВХ), які виникали при масових вибухах на дільниці по видобутку корисних копалин, задовольняє аналого-цифрова вимірювальна апаратура: сейсмоприймачі СМ-3 і СМ-3В, реєстратор аналого-цифровий перетворювач АЦП Е-440 і ПК типу ноутбук, а для одночасного запису параметрів сейсмічних коливань і ударно-повітряних хвиль - комплект сейсмографа MiniMate Plus виробництва Канада, який існує в НВП «СКТБ ГЕОФІЗИК» та пройшов метрологічну перевірку в Україні. Далі розглянемо обрані датчики та засоби реєстрації щодо забезпечення не тільки необхідних вимог до вимірів і контролю сейсмічних коливань і ударно-повітряних хвиль, а і надати можливість володіти необхідною інформацією про умови вибуху та сейсмічні коливання і ударно-повітряні хвилі, що дасть можливість одержати такий збір кількісних показників щодо впливу на довкілля, який досить точно дасть змогу підтвердити або спростувати результати аналітичних досліджень і одержати нові дані в конкретних умовах.

Спочатку розглянемо характеристики сейсмічних хвиль, які підлягають реєстрації. В [148] є наступне формулювання сейсмічної хвилі: “це пружні коливання, які розповсюджуються в Землі від осередків землетрусів, вибухів та інших джерел. Подовжня сейсмічна хвиля – хвиля стиснення (коливання частинок середовища здійснюється в напрямку сейсмічного випромінювання); поперечна сейсмічна хвиля – хвиля зсуву (коливання частинок середовища здійснюється в напрямку перпендикулярному до сейсмічного випромінювання”. В [149] встановлено, що “коли є гранична

поверхня (пружний напівпростір, пружне тіло) можливі й поверхневі хвилі”. Амплітуди поверхневих хвиль є максимальні на поверхні і швидко згасають з віддаленням від поверхні в глибину тіла. Ці хвилі мають велике значення в сейсмології.

Зупинимось на особливості сейсмічних хвиль. По-перше, поздовжні та поперечні хвилі є об’ємними. Крім того, всі перераховані хвилі мають різні швидкості розповсюдження. В [150] встановлено, що швидкість поздовжньої хвилі визначається за формулою:

$$C_1 = \sqrt{E(1-\mu)/(1+\mu)(1-2\mu)\rho}, \quad (8.75)$$

а швидкість розповсюдження поперечних хвиль визначається за формулою:

$$C_2 = \sqrt{G/\rho} = C_1 \cdot \sqrt{1-2\mu/2(1-\mu)}, \quad (8.76)$$

швидкість розповсюдження поверхневих хвиль (хвиль Релея) дорівнює:

$$C_3 = 0.9194 \cdot C_2 = 0.9194 \sqrt{G/\rho}. \quad (8.77)$$

де – E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуассона, G – модуль зсуву, ρ – щільність ґрунту.

Енергію руху має кожна з цих хвиль. При аналізі дії сейсмічних хвиль на об’єкт, що охороняється, необхідно експериментально виділити амплітудно-часові характеристики коливання частинок середовища під дією всіх трьох типів хвиль, швидкість розповсюдження сейсмічних хвиль, а також коефіцієнт згасання дії сейсмічних хвиль.

Вимоги до сейсмічної апаратури залежать від задач та умов вимірювання. Вона може бути стаціонарною або мобільною (рис. 8.18). Як визначено в [151], основними для нас є наступні параметри сейсмічних хвиль:

– максимальна амплітуда масової швидкості коливань за типами хвиль та кожного типу по складових, час запізнення максимальної амплітуди коливань щодо першого вступу хвилі. Векторна швидкість зміщення часток ґрунту (см/с) при одночасному вступі складових за X , Y , Z .

– переважні періоди і довжина хвиль у точках спостереження.

- загальна тривалість коливань, логарифмічний декремент затухання.
- час вступу у вертикальній складовій щодо радіальної та тангенціальної, а також взаємні різниці моментів вступу однотипних і різнотипних хвиль.”



Рис. 8.18. Дві групи сейсмічних комплексів.

Ми розглядаємо лише сейсмоапаратуру для мобільної роботи. Вся ця апаратура умовно поділяється на дві групи: з постійною кількістю сенсорів і з перемінною кількістю сенсорів. До першої групи відносяться всевітньо відомі комплекси MiniMate Plus (Канада), Vibracord Plus (Іспанія), ZEB Zund und Messtechnik (Німеччина) та інші. Серед переваг цих комплексів необхідно відмітити компактність, комплектація з сенсорами, оперативність в отриманні результатів вимірювання, автоматичне тестування сенсорів перед вимірюванням. До недоліків можна віднести лише фіксовану кількість вимірювальних каналів (4 – в базовому комплекті (сейсмічний 3-х координатний сенсор – 3 + вимірювальний мікрофон) та 8 – у розширеному комплекті), а також ціна.

Друга група – це комплекси, які орієнтовані на використання універсальних персональних комп’ютерів типу «ноутбук», аналого-цифрових перетворювачів і сенсорів. Перевагами цих комплексів є гнучкість в виборі типів та кількості сенсорів, отримання даних відразу у цифровому вигляді з виводом на монітор комп’ютера, відносно невелика ціна (в порівнянні з ціною комплексів першої групи). Недоліки – це громіздкість, для отримання остаточних результатів необхідний час. Відомі випадки, коли сейсмічний сигнал записувався у цифровому осцилографі з фіксацією TDS-2014 [152]. В [151] наведено приклад використання цифрового сейсмо-

вимірювального комплексу на базі сенсорів типу СМ-3, СМ-3В, аналого-цифрового перетворювача Е-440 та персонального комп'ютеру.

Декілька слів про сенсори. В [150] написано, що «інтенсивність сейсмічної хвилі характеризується такими параметрами коливання середовища чи конструкції як швидкість та амплітуда зміщення, прискорення коливань, період та частота коливань, тривалість коливань, частотний спектр і т.д.» При цьому використовуються сейсмічні сенсори для вимірювання: прискорення (м/с^2), швидкість (см/с), зміщення (мм). По принципу дії сенсори можна поділити на п'єзоелектричні та електромеханічні (акселерометри), електромеханічні (велосімери). В [152] наведено порівняльні характеристики різних типів акселерометрів: електромеханічні (струнні та маятникові) з високою точністю і високою ціною, п'єзоелектричні з високою точністю і високою ціною, п'єзорезистивні з середньою точністю і високою ціною, інтегральні об'ємної конструкції з середньою точністю і середньою ціною, інтегральні поверхневої конструкції (конденсаторні) з середньою точністю і низькою ціною. В таблицях 8.11 – 8.15 наведено технічні та порівняльні характеристики деяких сейсмічних сенсорів, акселерометрів та комплексів.

Таблиця 8.11. Порівняльна характеристика деяких сейсмічних сенсорів

№ п.п	Найменування	Тип	Кількість компонент	Чутливість	Діапаз. частоти	Ел. живл.	Вага
Акселерометри							
1	АТП-1	п'єзоелектр.	3	1В/г	0.2-500	+	4
2	S1073	п'єзоелектр.	3	0.4В* с^2 /м	02-1000	+	2.2
3	СВ1Э	п'єзоелектр.	3	100В/г	0.15-400	+	0.3
4	В&К #8318С	п'єзоелектр.	1	68пКл* с^2 /м	0.1-1000	+	0.47
5	ADXL-105	конденсат.	1	1В/г		+	
Велосімери							
1	СМ-3	ел.-механ.	1	15В/ (м/с)	2-50	-	7.4
2	СМ-3В	ел.-механ.	1	135В/ (м/с)	2-50	-	7.4
3	S2123	конденсат.	3	1500В/ (м/с)	0.5-70	+	2.5
4	GS 20DX	ел.-механ.	3	0-20см/с *	2-250	+	*
5	GS 11D	ел.-механ.	3	0-18 см/с *	2-250	+	*
6	Standard 714A0301	ел.-механ.	3	0.0159-254mm/с **	2-250	+	**

Примітки:

* – Разом з сейсмографом Vibracord Plus важить 4 кг;

** – Разом з сейсмографом MiniMate Plus важить 1.4 кг.

Дискретизація запису аналогових сигналів з сенсорів. Для запису сейсмічних хвиль достатньою величиною дискретизації є 0.001сек. В [154] наведена таблиця максимального часу запису на прилад MiniMate Plus в залежності від дискретизації при роботі з стандартним комплектом сенсорів, тобто з 1 сенсором Standard 714A0301 (кількість каналів – 3) та вимірювальним мікрофоном. При дискретизації 1024 вимірювань в секунду максимальний час вимірювання становить 104 секунди (при дискретизації 2048 – 52 секунди). В більшості випадків пам'яті цього приладу достатньо (1 MB), але трапляються випадки, наприклад масовий вибух на Полтавському ГОКу в Комсомольському, коли цього може бути замало. Маємо два виходи: перший – збільшити пам'ять приладу, другий – використовувати схему: сенсори – аналого-цифровий перетворювач – комп'ютер, де в програмах вводу та зберігання інформації відведено значно більше місця (в програмі L_Graph_2 відведено 2 GB), а, значить, є і більше часу для запису сейсмічного процесу. А також, для вимірювання швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі та визначення декременту затухання коливання середовища необхідно мати 5-7 точок спостереження [151] на лінійному профілі.

Таблиця 8.12. Технічні характеристики сенсора СМ-3

№ п/п	Найменування характеристики	Величина
1	Коефіцієнт перетворення обмоток, В•с/м	15 ± 2.25
2	Активний опір робочої обмотки, Ом	56 ± 11.2
3	Період особистих коливань маятника, с	2 ± 0.1
4	Приведена довжина маятника	0.084 ± 0.0084
5	Момент інерції маятника	0.085 ± 0.00127
6	Габаритні розміри, не більше мм	230 x 170 x 145
7	Вага, не більше	7.4 кг

Крім того можна застосувати систему сенсори – аналого-цифровий перетворювач – комп'ютер типу ноутбук. Таким чином робимо висновок, що для контролювання сейсмічних хвиль необхідно використовувати для замірів вдовж лінійного профілю (3 одно напрямлені X 5 точок = 15) 15 однокоординатних або 5 трикоординатних сенсорів; аналого-цифрові перетворювачі типу E14-440 – 2 комплекти, комп'ютери типу ноутбук – 2 шт.

Крім того, зв'язок між сенсорами та аналого-цифровими перетворюючими забезпечується антивібраційним кабелем типу АВКД.

Таблиця 8.13. Технічні характеристики трьох компонентного акселерометру АПТ-1М.

№ п/п	Найменування характеристики	Величина
1	Чутливість акселерометра, В/г	1
2	Діапазон реєстрованих частот, Гц	0.2 – 500
3	Максимальне прискорення, що реєструється, g	2
4	Живлення від джерела постійної напруги, В	12
5	Робочий струм, мА	2
6	Габаритні розміри, мм	135 x 135 x 160
7	Вага, кг	4

Таблиця 8.14. Порівняльна характеристика стандартних геофонів комплексів *Vibracord DX* та *MiniMate Plus*.

№ п/п	Найменування характеристики	комплект <i>Vibracord DX</i>	комплект <i>MiniMate Plus</i>
1	Дозвільна здатність, mm/c	0.01	0.0159
2	Діапазон вимірювання, mm/c	±200	±254
3	Мінімальний замір, mm/c	0.05	0.0159
4	Робоча частота, Гц	2–250	2–250

Таблиця 8.15. Порівняльна характеристика обладнання для збору, накопичення та відображення сейсмічної інформації.

№ п/п	Найменування характеристики	Осцилограф TDS-2014	АЦП Е14-440	<i>Vibracord DX</i>	<i>MiniMate Plus</i>
1	Максимальна кількість каналів	4	16–32	4 (7)	4(8)
2	Кількість виборок за секунду	$10^{-2} - 10^9$	2 – $2.5 \cdot 10^6$	1024	512–65536
3	Разрядність АЦП	8	12	16	16
4	Об'єм пам'яті, Б	2.5К	2Г	32М	1М
5	Відображення на	Екрані	На комп.	Символ.екр.	Символ.екр.
6	Електр. живлення	Акумуля.	Від комп.	Акумуля.	Акумуля.
7	Вага, кг	2.7	0.35	4	1.4
8	Виготовлено:	США	Росія	Іспанія	Канада

Найбільш ефективним комплексом для одночасного запису параметрів сейсмічних коливань і ударно-повітряних хвиль при дослідженні оцінки впливу на довкілля і визначення допустимих норм під час проведення вибухових робіт є сейсмограф MiniMate Plus виробництва Канада (рис. 8.19) та запропонована схема та послідовність визначення даної оцінки (рис. 8.20).



Рис. 8.19. Загальний вигляд сейсмографу MiniMate Plus

Основні характеристики сейсмографу MiniMate Plus наступні:

- можливість застосування режиму «Instantel Histogram Combo», який дозволяє реєструвати форму сигналу одночасно із записом гістограми;
- функція «Auto Call Home» дозволяє автоматизувати дистанційний моніторинг;
- частота вибірки знаходиться в межах від 1024 до 16384 знач./с на один канал; при роботі з одним каналом частота може досягати до 65536 знач./с;
- опція «Instantel 8-Channel» (8 каналів) дозволяє одночасно підключати два стандартних сейсμοприймача та два мікрофона до одного регістратору Minimate Plus;
- енергонезалежна пам'ять зі стандартним об'ємом, якої достатньо для реєстрації 300 подій (може бути розширена до 1500 подій);

- запис сигналів подій відбувається протягом 100 с при стандартній конфігурації та до 500 с – у вдосконаленому варіанті;
- можливість безперервного моніторингу, тобто нульовий час простою навіть, коли прилад виконує обробку даних;
- любий канал може працювати з широким діапазоном датчиків: сейсмоприймачів, акселерометрів або гідрофонів.

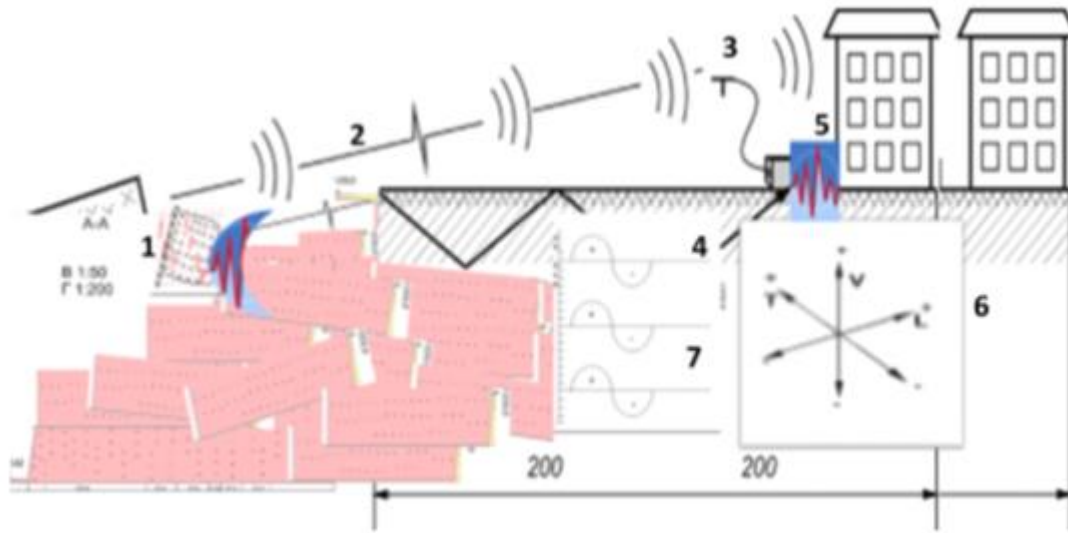


Рис. 8.20. Схема виконання контролю вибуху при оцінці впливу на довкілля від сейсмічних і ударно-повітряних хвиль та визначення допустимих норм під час проведення короткоуповільненого масового вибуху із застосуванням сейсмостанції *Mini Mate Plus*, встановленої біля найближчої забудови: 1 – блок із серії окремих свердловинних зарядів з короткоуповільненим підриванням (КУП); 2 – напрямок дії ударно-повітряної хвилі в атмосфері, 3 – мікрофон; 4 – напрямок сейсмічної хвилі по поверхні земної кори; 5 – найближчий до місця вибуху 3-х поверховий житловий будинок; 6 – сейсмічні коливання земної поверхні V, T, L , – відповідно від вертикальних, поперечних і повздовжніх хвиль. Стрілками показано плюсові і від’ємні сейсмічні коливання земної поверхні, які представлені у вигляді кривих (7), з’єднаних у *Mini Mate Plus*.

Наведемо приклад способу оцінки впливу на довкілля від сейсмічних коливань з використанням апаратних комплексів, наведених вище, при визначенні сейсдобезпечних параметрів вибухів і відстаней. Спосіб, який включає підривання гірничих порід за допомогою рядів свердловинних

зарядів. Кількість рядів свердловинних зарядів (m), кількість свердловинних зарядів в ряду (N) залежить від розміру породного блоку, технічних і технологічних чинників. Свердловинні заряди в ряду підриваються одночасно (миттєво), а ряди – із застосуванням уповільнення.

При виборі оптимальних параметрів короткоуповільненого способу підривання сейсмічний ефект (швидкість коливань ґрунту, см/с) від підриву всього блоку буде визначатися сейсмічним ефектом від підриву одного ряду свердловинних зарядів (одного ступеня уповільнення), тобто підривом N зарядів за наступною формулою [156]:

$$V = K \cdot N \left(\frac{Q_{\text{эф}}^{1/3}}{r} \right)^{1.5}, \quad (8.77)$$

Сейсмобезпечна відстань (r_c , м) при вибуху розосереджених свердловинних зарядів, що розташовані рядами у блоці гірських порід із застосування короткоуповільненого підривання, розраховується за формулою:

$$r_c = \left(\frac{K \cdot N}{V_{\text{дон}}} \right)^{2/3} \cdot Q_{\text{эф}}. \quad (8.78)$$

Сейсмобезпечна кількість свердловинних зарядів розосереджених в одному ряду (в одному ступені уповільнення) при масовому вибуху, розраховується за формулою [156]:

$$N_c = \frac{V_{\text{дон}} \cdot r^{1.5}}{K \cdot Q_{\text{эф}}}. \quad (8.79)$$

Недоліком цього способу є те, що визначення сейсмобезпечної кількості свердловинних зарядів за формулою (8.79) проводиться аналітично по схемі комутації масових вибухів, при цьому виникає похибка, яка пов'язана з відсутністю даних щодо реальних параметрів масових швидкостей збудження в масиві, як від масового вибуху так і одичного свердловинного заряду. Крім того, при реєстрації сейсмічних сигналів (амплітуд) в період проведення масових вибухів, постійно створюються умови накладання одна на одну хвиль, створених вибухом поодиноких зарядів, що не враховується у формулі (8.79).

Тому було поставлено задачу підвищення надійності оцінки сейсмобезпеки при застосуванні короткоуповільненого підривання масових вибухів (МВ) на кар'єрах, наближених до будівель і споруд, за рахунок підривання в породному блоці серії поодиноких свердловинних зарядів (N) та окремо одного (останнього) свердловинного заряду, з інтервалом уповільнення в 5–7 разів більше, порівняно з попереднім, але за умови недопущення його підбою. Реєстрація сейсмічних коливань у напрямку об'єктів, що охороняються, відбувається у 2-х пунктах, заміри амплітуд швидкостей коливань з фрагментом осцилограми запису коливань N поодиноких коливань $U_{\text{м.в.}}$ (U_1 та U_2) та з фрагментом осцилограми запису коливань поодинокого заряду $U_{\text{одн.}}$ (U_1 та U_2) в пунктах реєстрації на відстанях r_1 та r_2 , встановлення максимальних значень маси заряду та інтервалу сповільнення ($Q_{\text{гр}}$) (кількості поодиноких зосереджених зарядів) по схемі комутації вибухової мережі масового вибуху для розрахунку

приведених відстаней для масового вибуху $\bar{r} = \left(\frac{r_1}{Q_{\text{гр}}^{1/3}}\right)$ $\bar{r} = \left(\frac{r_2}{Q_{\text{гр}}^{1/3}}\right)$ та поодинокого заряду (Q_1 - маса заряду в останній свердловині) у $\bar{r} = \left(\frac{r_1}{Q_1^{1/3}}\right)$ $\bar{r} = \left(\frac{r_2}{Q_1^{1/3}}\right)$, складання системи рівнянь, за якими знаходять коефіцієнти пропорційності (K_c) і показники ступеня затухання (n):

$$\begin{cases} U_1 = K_c \left(\frac{r}{Q_{\text{эф}}^{1/3}}\right)^{-n} \\ U_{\text{мс}} = K_c \times N \left(\frac{r}{Q_{\text{эф}}^{1/3}}\right)^{-n} \end{cases} \quad (8.80)$$

де $Q_{\text{эф}}$ – ефективна маса поодинокого заряду в складі групи зарядів МВ, кг.
 N – кількість одночасно підірваних розосереджених свердловинних зарядів.

Із фрагменту осцилограми вибуху поодинокого заряду за значенням (U_1) визначається коефіцієнт сейсмічності (K_c). Він буде ідентичним і для МВ при розгляді останнього розосередженого заряду:

$$K_c = U_1 / \bar{r}^{-n} \quad (8.81)$$

де: U – швидкість зсуву ґрунту під час вибуху поодинокого заряду, см/с,
 r^- – приведена відстань до маси поодинокого заряду.

Ефективна маса (кг) одного окремого заряду у ряді розосереджених визначається за формулою:

$$Q_{\text{еф}} = Q_1 \left[\left(1 - \frac{1}{N_{\text{еф}}^b} \right) \cdot C + \frac{1}{N_{\text{еф}}^b} \right] \quad (8.82)$$

де Q_1 – фактична маса окремого заряду у ряді розосереджених зарядів, кг;
 $N_{\text{еф}}$ – кількість окремих зарядів, хвилі яких приймають участь у взаємодії зарядів;
 b – показник, який залежить від властивостей ґрунту через коефіцієнт затухання сейсмічної хвилі n ($b = \frac{3}{n} - 1$); C – відносна відстань між окремими зарядами і визначається за формулою $C = \frac{a}{2r_0}$.

Знаючи коефіцієнт сейсмічності K_c з системи рівнянь (8.80) можна визначити фактичну кількість одночасно підірваних свердловинних зарядів (N):

$$N = \left(\frac{U_{\text{м.в.}}}{K_c} \right)^{3/n} \cdot \left(\frac{r}{Q_{\text{еф}}^{1/3}} \right)^3 \quad (8.83)$$

Сейсмобезпечна кількість окремих розосереджених зарядів визначається за формулою:

$$N_c = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{K_c} \right)^{3/n} \cdot \left(\frac{r}{Q_{\text{доп}}^{1/3}} \right)^3 \quad (8.84)$$

Сейсмобезпечна відстань (r_c , м), при застосуванні короткоуповільненого підривання на блоці гірничих порід, що складається із розосереджених поодиноких свердловинних зарядів (N), з'єднаних неелектричною системою ініціювання, розраховується за формулою:

$$r_c = \left(\frac{K_c N^{n/3}}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/n} Q_{\text{еф}}^{1/3} \quad (8.85)$$

Поставлена задача вирішується тим, що в способі оцінки сейсмобезпеки при застосуванні короткоуповільненого підривання у масових вибухах на кар'єрах, наближених до будівель і споруд, який включає експериментальне визначення коефіцієнтів пропорційності і показника

ступеня затухання, як від масового вибуху, так і від поодинокого свердловинного заряду та визначення максимальної кількості зарядів вибухової речовини, яка підривається миттєво в групі проводиться із фрагментів осцилограми, одержаної від вибуху поодинокого заряду разом з масовим.

Сейсмічний ефект розосередженого заряду, який характеризується більшою інтенсивністю коливань ґрунту в порівнянні з підриванням зосередженого заряду рівної загальної маси ВР, пояснюється наступними основними причинами.

По-перше, з теорії і практики підривних робіт відомо, що більше енергії в навколишнє середовище від вибуху заряду ВР переходить при більшій площі поверхні зіткнення заряду з породним масивом.

Розглянемо це явище на простому прикладі при підриванні свердловинного заряду діаметром 250 мм, довжиною 7,0 м з масою заряду ВР 500 кг і 5-ти розосереджених свердловинних зарядів діаметром 130 мм, довжиною 6,1 м і масою ВР 100 кг кожний. Поверхня зіткнення першого, зосередженого заряду з породним масивом – 5,6 м², а 5-ти розосереджених зарядів – 12,7 м², тому і інтенсивність сейсмічних хвиль при підриванні розосереджених зарядів буде більшою в порівнянні із зосередженим.

По-друге, у відповідності із законом динамічної подібності для пружних сил наведений вище приклад з порівнянням сейсмічної дії зосередженого і розосередженого зарядів можна записати у вигляді наступної нерівності:

$$\sum_{i=1}^{N=5} Q_1^{1/3} > Q_3^{1/3} \quad (8.86)$$

де N – кількість окремих розосереджених зарядів ($N=5$); Q_1 – маса окремого із числа розосереджених зарядів ($Q_1=100$ кг); Q_3 – маса зосередженого заряду ($Q_3=500$ кг).

Нерівність (8.86) також підтверджує сейсмічний ефект розосередженого заряду.

Спосіб визначення сейсмобезпечних параметрів короткоуповільненого вибуху і відстаней розглянемо на прикладі Лезниківського гранітного

кар'єру. Кількість рядів свердловинних зарядів ($m=4$) і кількість свердловинних зарядів в ряду ($N=58$). Свердловинні заряди в ряду підриваються з уповільненням 40, 60 та 105 мс між зарядами, а між рядами – 25 мс із застосуванням неелектричної системи ініціювання «Імпульс».

Було підірвано 58 свердловинних зарядів, заряджених вибуховою речовиною (ВР) типу «Анемикс-70» масою 17,5 кг/м, по діагональній схемі (13 груп по 4 свердловини та 1–на 3 свердловини) з уповільненням відповідно: 25, 40, 60 та 105 мс між зарядами в групі. Остання свердловина №58 підривалася з інтервалом сповільнення 200 мс після ініціації попередніх 57 свердловинних зарядів. Маса заряду ВР в одній свердловині коливалась в межах від 221,0 до 248,0 кг, а в діагоналі (групі) 4-ри свердловинних заряди загальною масою 972 кг. Загальна маса всіх зарядів становила 13696 кг. Схема вибухової мережі блока № 3, приведена на рис. 8.21.

Для запису параметрів сейсмовибухових хвиль (СВХ), які виникали при масових вибухах на кар'єрі, на відстанях 295-195 м від блоку, що підривався в східному напрямку, використовували аналого-цифрову вимірювальну апаратуру: сейсмоприймачі – СМ-3 і СМ-3В, реєстратор – аналого-цифровий перетворювач АЦП Е-440 і ПК типу ноутбук та сейсмостанцією MiniMate Plus виробництва Канада на відстані 217 м в південно-східному напрямку від масового вибуху. Остання дозволила одночасно вимірювати не тільки сейсмічні коливання гранітної поверхні, а і атмосферний тиск, створений ударно-повітряною хвилею.

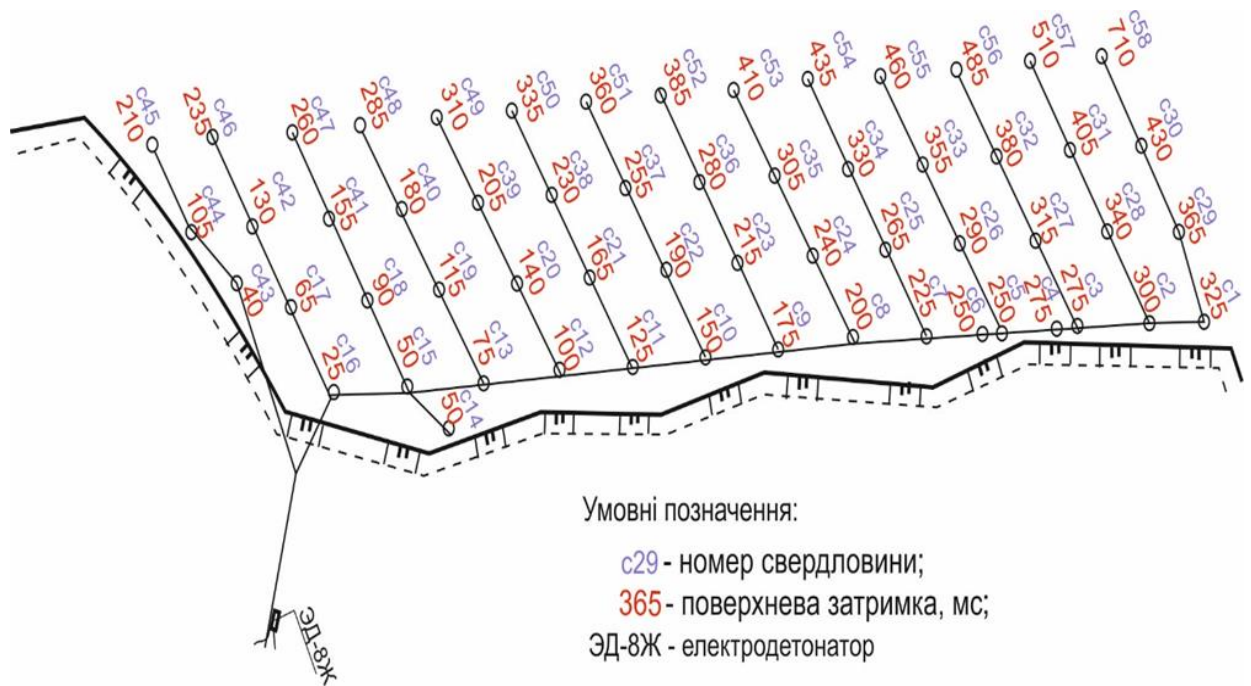


Рис. 8.21. Схема вибухової мережі блока № 3 Лезниківського гранітного кар'єру

Параметри сейсмічних хвиль одержаних від усіх датчиків, в т. ч. і від аналого-цифрової апаратури на різних горизонтах окремих ділянок по видобутку гранітних блоків наведені в таблиці 8.16, результати виміру параметрів сейсмічних та ударно-повітряних хвиль, які виникали при масовому вибуху в кар'єрі, з використанням сейсмостанції MiniMate Plus (примірники протоколів рис. 8.22, 8.23, табл. 8.17).

Із фрагменту осцилограми вибуху поодинокого заряду за значенням (U_1) визначається коефіцієнт сейсмічності (K_c), який буде аналогічним і для масового вибуху (MV) при розгляді останнього розосередженим зарядом:

$$K_c = 0,35 / \left(\frac{r}{247} \right)^{-1,56} \quad (8.87)$$

По фрагментах осцилограми визначають максимальні значення швидкостей зсуву ґрунту від вибуху поодинокого заряду (U_1) і масового вибуху (U_{MV}) та складають систему рівнянь:

$$\begin{cases} U_1 = 440 \left(\frac{r}{102,5} \right)^{-1,56} \\ U_{???} = 82 \left(\frac{r}{247} \right)^{-1,56} \end{cases} \quad (8.88)$$

Таблиця 8.16. Максимальні значення, отримані з осцилограми та швидкості коливань часток гранітної підшови уступів з видобутку блочної продукції при вибуху (за модулем)

№ каналу ш.	Відстань від вибуху, м	Максимальне значення швидкості, см/с		Періоди коливань в об'ємних хвилях	
		Вибух всіх 57 св. (U_{MB})	Вибух 1 св. № 58 (U_1)	Продольні P, с	Поперечні S, с
5	206	1,24	0,35	0,028	0,025
2	249	0,89	0,26	0,028	0,025
1	256	0,80	0,25	0,028	0,025

Таблиця 8.17. Визначені значення коефіцієнтів K та n.

Показники приведені до заряду маси в максимальній групі, кг	Коефіцієнт,	Показник ступеню загасання,
	K_c	n
247	82	1,56
102,5	440	1,56

Пропонований спосіб дає можливість оцінити реальну максимальну кількість свердловинних зарядів, які миттєво підриваються (максимальна маса вибухових речовин на одне сповільнення) і які визначають сейсмічну дію всього масового вибуху. Тому, використовуючи ці значення, при розрахунку допустимих норм довкілля (сейсмостійкості будівель і споруд), забезпечується їх цілісність без нанесення будь яких ушкоджень, пов'язаних з непрогнозованою сейсмічною дією, тим самим зменшуючи витрати на ремонт і підтримку в процесі їх експлуатації.

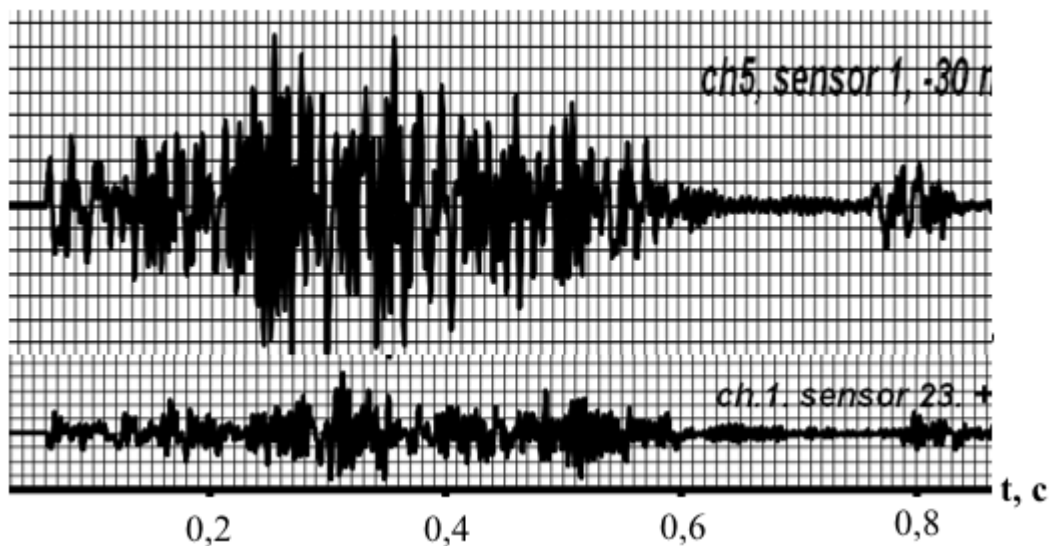


Рис. 8.22 Осцилограма з фрагментом визначення максимальних значень швидкостей зсуву ґрунту від вибуху поодинокого заряду з права (U_1) та масового вибуху з ліва (U_{MB}) параметрів сейсмовибухових хвиль (СВХ), які виникали при масових вибухах на кар'єрі, на відстанях 206м (зверху) та 256м (знизу) від блоку, що підривався в східному напрямку, отриманих від сейсмоприймачів – СМ-3 та аналого-цифрового перетворювача АЦП Е-440.

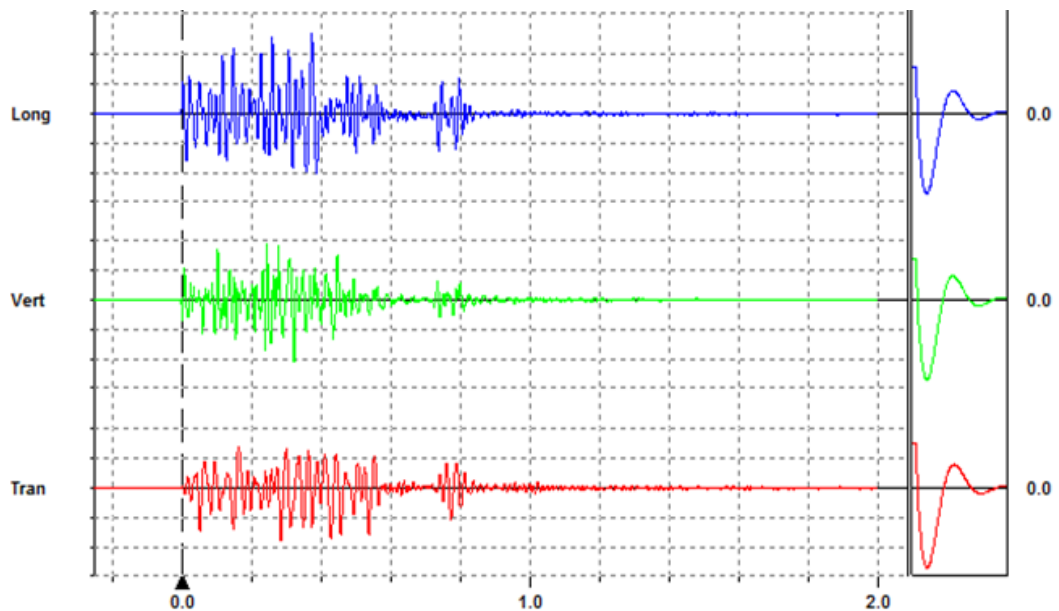


Рис. 8.23. Осцилограми з фрагментами по визначенню максимальних значень швидкостей зсуву ґрунту від вибуху поодинокого заряду з права (U_1) та масового вибуху з ліва (U_{MB}) параметрів сейсмовибухових хвиль (СВХ), які виникали при масових вибухах на кар'єрі, на відстані 217м в південно-східному напрямку, одержаних сейсмографом MiniMate Plus

Наведені вище дослідження в основному стосуються вибору апаратурних комплексів для оцінки впливу сейсмічних хвиль на довкілля і визначення допустимих норм під час проведення вибухових робіт. Тому подальші дослідження потребують доповнення даними щодо оцінки впливу ударно-повітряних хвиль на довкілля відповідно до Закону України «Про оцінку впливу на довкілля».

У даному розділі теоретично та експериментально розглянуто наявні проблеми наукового, технічного і нормативного характеру нових напрямків підвищення сейсмобезпеки вибухових робіт для захисту довкілля. Отримано формулу для визначення коефіцієнта зменшення сейсмічного ефекту при короткоуповільненому підриванні. Запропоновано застосування екранованих прошарків при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів, за допомогою якого можна суттєво знизити сейсмічний ефект. Теоретично та експериментально розглянуто вплив від дії групи циліндричних зарядів. Отримано формулу для визначення поля напружень від вибухової дії групи зарядів на ґрунтовий масив. Запропоновано метод розрахунку сейсмосахисних перешкод та отримано формулу для визначення коефіцієнта екранування. Сформульовано критерій формування плоского фронту вибухової хвилі при дії вибуху групи циліндричних зарядів. Приведені опис і характеристики різних сучасних апаратурних комплексів та дослідження щодо їх вибору для запису параметрів сейсмічних і ударної повітряної хвилі і одержання амплітудно-частотних характеристик з використанням обладнання виробника Instantel (Canada), для реєстрації сейсмічних коливань і ударно-повітряних хвиль, а також комплекс ноутбук + аналого-цифровий перетворювач + сейсмоприймачі.

ВИСНОВКИ

В монографії на основі термодинамічних розрахунків обґрунтовано склади низкошвидкісних вибухових сумішей на основі утилізованих матеріалів та запропоновано вдосконалені рецептури компонентного складу малощільних спінених вибухових композицій місцевого приготування на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри, які відрізняються значною фізичною стабільністю, а встановлені динамічні характеристики забезпечують підвищення ефективності застосування вибухового методу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів.

Обробка гранул АС ультразвуковим випромінюванням призводить до її ущільнення та підвищення утримуючої здатності. Причому, при наростанні впливу ультразвукового випромінювання до 4 хвилин, ці показники сягають максимуму: загальна пористість зменшується на 0,7% для щільної АС і на 1,1% для пористої АС, а утримуюча здатність збільшується на 5,2 % для щільної АС і 6,424 % для пористої АС. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

Встановлено, що найменший піковий тиск на межі розподілу «продукти детонації – середовище» при найдовшій тривалості вибухового імпульсу спостерігається для зарядів на основі спінених 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 рази порівняно зі стандартними малощільними ВР. Час зростання вибухового імпульсу зарядів на основі спінених 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.

Результати проведених експериментів свідчать про те, що малощільні спінені заряди на основі АС/СФ/АП забезпечують ущільнення на глибину 1,5 – 3,0 м, що становить 27–30 потужностей заряду у порівнянні з ігданітом, що забезпечує ущільнення на глибину 1,25 – 2,0 м або 20 – 25 потужностей

заряду. При свердловинному способі оптимальний кут нахилу свердловини знаходиться в межах від 20° до 30° . Ущільнення ґрунтового масиву накладними зарядами потужністю 50, 75, і 100 мм забезпечує глибину ущільнення малощільною ВР відповідно на 25, 20 і 17 % більше, ніж стандартним ігданітом.

Встановлено, що характер ущільнення ґрунтів за допомогою енергії вибуху носить пульсуючий характер, який затухає по мірі проходження крізь масив. Характер самої амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда. А це, в свою чергу, призводить до більш тривалої дії газів продуктів детонації на оточуючий масив, а відповідно, і збільшення щільності.

Отримано формулу для визначення коефіцієнта зменшення сейсмічного ефекту при короткоуповільненому підриванні. Запропоновано застосування екранованих прошарків при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів, за допомогою якого можна суттєво знизити сейсмічний ефект. Теоретично та експериментально розглянуто вплив від дії групи циліндричних зарядів. Отримано формулу для визначення поля напружень від вибухової дії групи зарядів на ґрунтовий масив. Запропоновано метод розрахунку сейсмосахисних перешкод та отримана формула для визначення коефіцієнта екранування. Сформульовано критерій формування плоского фронту вибухової хвилі при дії вибуху групи циліндричних зарядів.

Отримані результати компресійних досліджень свідчать про те, що щільність значно впливає на деформаційні і фізико-механічні властивості структурно-нестійких ґрунтів, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів. Цю характерність доцільно застосувати при визначенні необхідного ступеня ущільнення, регулювання якого дозволить встановити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості просадних структурно-нестійких ґрунтів.

Розроблено пристрої та запропоновано способи приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту безпосередньо на місці проведення робіт.

Застосування даного способу можливо застосовувати: для розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100 – 200 м за один цикл з покриттям шару піносуспензії 50 – 70 мм смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і подальшим підривом вибухового композиту ниткою ДШ; для розмінування пересіченої місцевості; для ущільнення ґрунту злітних смуг на польових аеродромах; для розмінування мінних полів.

Теоретично та експериментально розглянуто вплив сейсмічних хвиль на довкілля і визначено допустимі норми під час проведення вибухових робіт. Отримано величини швидкостей коливань в різних частотних діапазонах, які забезпечують повну цілісність різних типів будівель та споруд і залежать від співвідношення частоти коливань ґрунту (f) до частоти власних коливань будівлі (f_0).

З вище викладеного можна дійти до висновку, що сучасний стан розвитку теоретичних та практичних питань з вдосконалення існуючих та розробки нових рецептур вибухових речовин при застосуванні їх у вибухових технологіях геоінженерії в Україні та за кордоном дозволяє виконувати, як спеціальні вибухові роботи у будівництві, підготовці ґрунтового масиву під злітні смуги на польових летовищах, так і очищення довкілля від ліквідації замінованих територій.

Придатність вибухових речовин (ВР) визначається імпульсними характеристиками, наближеними до швидкості розповсюдження хвиль в середовищі, яке підлягає дослідженню. У випадку ущільнення керованість досягається при наявності резонансних явищ у ґрунтовому масиві, а при розмінуванні досягнення достатнього плоского тиску або кумулятивної струї для ініціювання снаряду. Такий підхід, по суті, являє собою новий самостійний напрямок в галузі застосування вибухових технологій в цивільній та військовій галузях зі своїми аналітичними, інженерно-розрахунковими методами, технологічними досягненнями. Їх арсенал вже

зараз може стати основою окремих завдань з досліджування нових технологій в геоінженерії, для яких відсутні дані значень з імпульсними характеристиками.

Викладене в монографії фактично відображає досягнення, одержані багатолітньою науковою працею у вирішенні цієї важливої проблеми. А від зацікавленого науковця (читача) багато в чому залежать нові досягнення в галузі спеціальних вибухових технологій із застосування різних типів ВР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Г. Кравець, В.Д. Воробйов, та А.О. Кузьменко, *Підривні роботи на кар'єрах: навч. посібник*. Київ: ІСДО, 1994.
2. Э.И. Ефремов, и А.А. Вовк, *Справочник по взрывным работам*. Киев: Наук. думка, 1983.
3. П.И. Федоренко, *Буровзрывные работы*. Москва: Недра, 1991.
4. A. Goszcz. *Elementy mechaniczka oraz ta pania w poeskich kopalniach wegla i miedi*. Biblioteka Szklly Eksploatacji podziemnej. Seria z zampka Gornicza, №2. Krakow (Poland), 1999.
5. В. В. Бойко та О. В. Ган, “Аналіз сучасних методів і способів усунення просадних властивостей лесових ґрунтів.” Перспективи розвитку гірничої справи та підземного будівництва. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» молодих вчених – аспірантів і магістрантів, VIII. 1-3 червня 2016р. Київ: НТУУ «КПІ». С. 95-99. Відновлено з https://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf_2016.pdf
6. О. В. Аріон, Т. Г. Купач, та С. О. Дем'яненко, *Географія ґрунтів з основами ґрунтознавства*. (Навчально-методичний посібник). Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2017.
7. А. К. Ларионов, В. А. Приклонский, та В. П. Ананьев, *Лёссовые породы СССР и их строительные свойства. (ч. 1)*. Москва: Госгеологтехиздат, 1959.
8. В. В. Крамаренко, *Грунтоведение: учебник для среднего профессионального образования*. Москва : Издательство Юрайт, 2019. Востановлено из <https://urait.ru/bcode/442519>
9. А. М. Гальперин та В. С. Зайцев, *Геология: Часть IV. Инженерная геология. (Учебник для вузов)* Москва: Горная книга, 2011.
10. В.В. Аскалонов, *Силикатизация лессовых ґрунтов*. Москва: Госсторйиздат, 1949.
11. Л. К. Смагулова, “Виды и способы закрепления ґрунтов”, *Молодой ученый*, №18, С. 80-83. 2017. Востановленно из <https://moluch.ru/archive/152/43141/>

12. О. І. Валовой, *Ефективні методи реконструкції промислових будівель та інженерних споруд*. (Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.) Кривий Ріг: Мінерал, 2003.
13. Л. М. Шутенко, О. Г. Рудь, та О. В. Кічаєва, *Механіка ґрунтів, основи та фундаменти*. (Пер. з рос.). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017.
14. Г. М. Бадьин, *Справочник технолога-строителя*. (2-е издание) СПб.: БХВ – Петербург, 2010.
15. С. И. Головкин, *Теория и практика усиления оснований методом высоконапорной цементации*. (Монография). Днепропетровск: Пороги, 2010.
16. Ю.М. Абелев и М.Ю. Абелев, *Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах*. Москва: Стройиздат, 1968.
17. І. І. Назаренко, С. М. Польчина, та В. А. Нікорич, *Ґрунтознавство*. Чернівці: Книги – XXI, 2004.
18. А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, Л. А. Анисимов, Е. В. Щекочихина, и А. Ф. Алексеев, “Подготовка оснований зданий и сооружений, строящихся на замедленно-просадочных грунтах I и II типа по просадочности”. *Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура*, 41 (60), С. 14–23. 2015.
19. В. Б. Швець, І. П. Бойко, Ю. Л. Винников, та М. Л. Зоценко, *Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти*. Дніпропетровськ: Пороги, 2012.
20. Л. Р. Ставницер, *Оптимальное проектирование поверхностного уплотнения грунтов трамбуемыми плитами*. (Ч. 4). Новосибирск: Стройиздат, 1966.
21. П.А. Донченко, В.М. Коновал, та І.О. Пономаренко, “Дослідження і вибір оптимальних варіантів механізованих способів закріплення лесових ґрунтових основ”. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика* (ISSN 2413-6212), 9, С. 9-17. 2016.
22. М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлев, О. О. Петраков, В. Б. Швець, О.В. Школа, С.В. Біда, та Ю.Л. Винников, *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти*. Полтава: ПНТУ, 2003.
23. В. И. Крутов, *Основания и фундаменты на просадочных грунтах*. Киев: Будивельник, 1982.

24. Л. Р. Ставницер, *Рекомендации по проектированию и устройству столбчатых фундаментов в котлованах, полученных трамбованием просадочных грунтов*. 1970.
25. Ю. М. Абелев, Простейший метод упрочнения лессовидных грунтов. *Строительная промышленность*, 10, С. 24 – 32. 1935.
26. А. П. Крутов, “Эффективность применения взрывов для уплотнения водонасыщенных малосвязных грунтов”. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*, 2. 2000. Восстановлено из <http://georeconstruction.net/journals/02/9/9.htm>
27. В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, та В. В. Бойко, *Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху*. (Монографія) Житомир: ЖДТУ, 2015.
28. Н. И. Казанский, *Упрочнение лессовидных грунтов в основании сооружений методом глубинного виброуплотнения*. Киев: АС и А УССР, 1962.
29. ДБН В.2.1-10-2009. Основы та фундаменти споруд. Основні положення проектування. 2009.
30. А.М. Доныш, *Исследование методов проходки дренажных скважин для предварительного замачивания*. Новосибирск, 1966.
31. И.К. Самарин, *Расчет оснований гидротехнических сооружений*. Москва: Стойиздат, 1971.
32. В.И. Крутов, “О начальной влажности лессовых грунтов” в кн. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. Киев. Будівельник, 1971, С. 122–125.
33. А.А. Мустафаев, *Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах*. Москва: Стойиздат, 1979.
34. Ф.И. Кучерявий и Ю.Ф. Кучерявий, *Управление сейсмическим действием массовых взрывов на карьерах*. Киев: общество «Знания» УССР, 1978.
35. О.А. Вовк Г.І. Чорний, та А.В. Михайлюк, “Основные закономерности взрывов зарядов с воздушными оболочками в грунтах” в кн. *Использование взрыва в народном хозяйстве*. Киев: Наук.думка, 1970, ч.3.
36. R. L. Kondner, “Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils”. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 89(SM1): pp. 115-141,

1963. Доступно: <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0013011>.

37. С.С. Григорян, Г.М. Ляхов, В.В. Мельников и др., “Взрывные волны в лёссовидном грунте”, *ЖПМТФ*, № 4, С. 35-39. 1963.
38. Г.М. Ляхов и Я.А. Пачепский, “Об учете вязких и пластических свойств при решении волновых задач”, *ЖПМТФ*, № 2, С. 114-120. 1973.
39. А.А. Вовк, “Становление и развитие в Украине исследований по прикладной геодинамике взрыва”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, 17, С. 9–24. (2008).
40. А. А. Вовк, *Основы прикладной геодинамики грунтов*. Киев: Наукова думка, 1976.
41. И. А. Лучко и В. А. Плаксий, *Прикладные задачи динамики грунтов*. Киев: Наукова думка, 1979.
42. В. Г. Кравец, *Динамика уплотнения грунтового массива взрывом*. Киев: Наукова думка, 1979.
43. Г. И. Черный, *Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках*. Киев: Наукова думка, 1979.
44. В. Г. Кравец, Н. С. Грищенко, и Л. И. Демещук, *Формирование инженерных свойств грунтов взрывными методами*. Киев: Наукова думка, 1983.
45. А. Г. Смирнов, и И. С. Бержишкис, *Использование взрыва при строительстве сооружений в водонасыщенных грунтах*. Москва: Недра, 1984.
46. А. А. Вовк и Б. В. Замышляев, *Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок*. Киев: Наукова думка, 1984.
47. В. Г. Кравец, И. А. Лучко, и А. В. Михалюк, *Использование взрыва в мелиоративном строительстве*. Москва: Недра, 1987.
48. И. А. Лучко, В. А. Плаксий, и Н. С. Ремез, *Механический эффект взрыва в грунтах*. Киев: Наукова думка, 1989.
49. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, А. С. Марченко, и Р. Т. Темирбулатов, *Геомеханика и ее практические приложения*. Киев: Ин-т геофизики им. Субботина АН УССР, 1989.

50. A. A. Kuzmenko, V. D. Vorobev, I. I. Denizyuk, and A. A. Dauetas, *Seismic effects of blasting in rock*. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.: New Delhi, 1993.
51. А. В. Бруякин, и В. Д. Воробьев, *Буровзрывные работы в строительстве. Краткий справочник*. Киев: Будивельник, 1993.
52. З. В. Барановский, А. А. Вовк, и В. Г. Кравец, *Вопросы защиты поверхностных зданий и сооружений на подрабатываемых территориях*. Киев: Институт гидромеханики НАНУ, 1996.
53. А. А. Вовк и З. В. Барановский, *Закономерности деформаций грунтов и горных пород при динамических воздействиях*. Киев: Институт гидромеханики НАНУ, 1996.
54. H. Chudek, W. Krawiec, i A. Wowk, *Kompleksowa metoda prognozowania oddziaływania wpływu podziemnej eksploatacji złóż oraz wstczasów gorotworu na chronione obiekty powierzchniowe w brzeźnym obszarze niecki obniżeniowej*. Gliwice: Wydawnictwo politechniki se skiej, 2003.
55. В. С. Прокопенко и К. В. Лотоус, *Взрывание горных пород скважинными зарядами взрывчатых веществ в рукавах*. Киев: Политехника, 2006.
56. НПАОП 0.00-1.66-13, *Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення*. Київ: ДП «Редакція журналу «Охорона праці», 2013.
57. ДСТУ 4704:2008, *Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки*. Київ: Держспоживстандарт України, 2009.
58. ДСТУ 7116:2009, *Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд*. Київ: Держспоживстандарт України, 2010.
59. В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, та В. В. Бойко, *Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху*. (Монографія). Житомир : ЖДТУ, 2015.
60. П. З. Луговий, І. І. Анік'єв, та Є. О. Сущенко, «Визначення та аналіз ударних і сейсмічних навантажень на об'єкт під дією вибуху». *Проблеми охорони праці в Україні*, 3, С. 63–68. 2000.
61. Э. И. Ефремов, Б. И. Римарчук, и В. Я. Шварцер, «Совершенствование простейших взрывчатых смесей на основе аммиачной селитры и нефтепродуктов». *Вестник КДПУ*, 2, 81–84. 2006.

62. Е. В. Колганов и В. А. Соснин, *Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества*. (1-я книга). Дзержинск: ГосНИИ « Кристалл», 2009.
63. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, та Т. П. Кудря, *Создание простейших взрывчатых составов местного приготовления с регулируемой плотностью*. Киев: Препринт ИГФ им. С. И. Субботина АН УССР, 1988.
64. О. О. Вовк та В. І. Плужник, “Створення нового класу промислових вибухових речовин зі змінною густиною”. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, 16, С. 33–42. 2008.
65. В. И. Плужник, Т. Н. Пивоварова, и А.А. Вовк, “Взрывчатый состав”. А. с. СССР № 1166465, МКИ4 С06В 31/28. Заявл. 28.04.1984.
66. В. И. Плужник, Т. П. Кудря, та А. А. Вовк, “Взрывчатый состав”. А. с. СССР №1064611, МКИ4 С06В 31/28. 1982.
67. В. В. Бойко, О. В. Ган, В. Г. Кравец, та А. Л. Ган, “Спосіб приготування та добір компонентного складу спінених вибухових композицій для ущільнення просадних ґрунтів”. *Технічна інженерія*, 2(84), С. 126–132. 2019. [doi.org/10.26642/ten-2019-2\(84\)-126-132](https://doi.org/10.26642/ten-2019-2(84)-126-132)
68. M. Shakeran and A. Eslami, “Geotechnical Aspects of Explosive Compaction”. *Shock and Vibration*, 2016(2), pp. 1-14. 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6719271>
69. В. А. Флорин, *Явления разжижения и способы уплотнения рыхлых водонасыщенных оснований*. Изв. АН СССР. ОТН, 6, 1952.
70. П. Л. Иванов, *Уплотнение несвязных грунтов взрывом*. Ленинград: Стройиздат, 1967.
71. Г. М. Ляхов, *Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах*. Москва: Недра, 1974.
72. И. М. Литвинов, *Глубинное укрепление и уплотнение просадочных грунтов*. Киев. Будівельник, 1969.
73. O. P. Minaev, “Effective Blasting Method of Compacting Sand Foundation Beds for Various Structures”. *Power Technology and Engineering*, 51, pp. 507-512. 2018. doi.org/10.1007/s10749-018-0864-x

74. Н. В. Зуєвська, С. В. Зайченко, В. В. Вапнічна, та Л. В. Шайдецька, *Ресурсозберігаючі технології при будівництві геотехнічних об'єктів*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
75. Г. Г. Фаренюк, *Ущільнення ґрунтів гідровибухом*. 2017. [Ел.видання].
Доступно:
http://www.niisk.com/strukturni_pidrozdili/zaporizke_viddilennja/ushchlnennya-grunt-v-g-drovibukhom.php?clear_cache=Y
76. *Рекомендации по проектированию и производства работ ускоренным уплотнением просадочных лессовых грунтов большой мощности предварительным замачиванием и глубинными взрывами*. Киев: НММСК Госстоя СССР, 1976.
77. В. В. Бойко, А. Л. Ган, та О. В. Ган, “Ущільнення просадних ґрунтів вдосконаленими зарядами малої щільності”. *Збірник наукових праць НГУ. Днепр: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 55, С. 152-162. 2018. Доступно:*
<http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/17.pdf>
78. А. П. Глазкова, *Каталіз горення взривчатих речовин*. Москва: Наука, 1976.
79. С. А. Мельникова, “О влиянии поверхностно-активных веществ на физико-химические и взрывчатые свойства игданитов“. *Взрывное дело, 65/22, С. 30-35. 1968.*
80. А. В. Куприн, И. Л. Коваленко, Л. В. Довбань, та А. Г. Теплицкая, *Термическое поведение аммиачной селитры как основы современных взрывчатых веществ. Высокоэнергетическая обработка материалов*. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009.
81. В. П. Купрін, І. Л. Коваленко, М.І. Іщенко, та В.Ф. Монаков, *Розробка і впровадження емульсійних вибухових речовин на кар'єрах України*. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012.
82. В. К. Тихомиров, *Пены. Теория и практика их получения и разрушения*. Москва: Химия, 1983.
83. В. С. Білецький, (Ред.), *Мала гірнича енциклопедія, Т.3. Донецьк : Схід. видав. дім, 2013.*

84. В. В. Бойко, О. В. Ган, В. Г. Кравець, та А. Л. Ган, “Вплив ультразвукового випромінювання на динамічні характеристики спінених вибухових композицій”. *Збірник наукових праць НГУ*, 59, С. 56–65. 2019. doi.org/10.33271/crpnmu/59.056
85. А. А. Абрамчук, *Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение*. Ленинград: Химия, 1981.
86. НПАОП 0.00-1.67-13. *Технічні правила ведення вибухових робіт на денній поверхні*. Київ: Індустрія, 2013.
87. Г.А. Авакян, *Расчет энергетических и взрывчатых характеристик*. М.: 1964.
88. Б.Р. Ракишев, *Технологические проблемы разрушения горных пород скважинными зарядами*. Физические проблемы разрушения горных пород. М.: ИПКОН, 2004. С. 28–35.
89. И.Ф. Блинов, *Хлоратные и перхлоратные взрывчатые вещества* М.: Оборонгиз, 1941.
89. О. В. Ган, А. Л. Ган, В. В. Вапнічна, та Л. В. Шайдецька, “Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення”. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 6(119), С. 99-105. 2019. doi: 10.30929/1995-0519.2019.6.99-105
90. О. П. Виноградова, “Руйнування гірських порід інструментом з функціональними елементами із композиційних алмазовмісних матеріалів”, дис. канд. тех. наук., Національний Технічний Університет України "Київський Політехнічний Інститут", Київ, Україна, 2015.
91. В. М. Орловський, (Ред.). *Технология аммиачной селитры*. Москва: Химия, 1978.
92. В. В. Вапнічна, А. Л. Ган, та О. С. Васильчук, “Вплив ультразвукового опромінення на утримуючу здатність аміачної селітри”, *ВІСНИК Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2 (80), С. 181–188, 2018.
93. ГОСТ 33832-2016 *Селитра аммиачная и удобрения на ее основе. Метод определения пористости*. Москва: Стандартинформ, 2016.

94. ГОСТ 25336-09 *Посуда и оборудование лабораторные стеклянные*. Москва: Стандартинформ, 2009.
95. ГОСТ 3826-03 *Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками*. Москва: Стандартинформ, 2003.
96. Паспорт УЗГ5-1,6/22 Генератор ультразвуковой. 1976. Доступно: <http://www.prompassport.ru/index.php/prochie-pasporta/bloki-chpu-uchpu-uci/1634-uzg5>
97. М. А. Промтов, *Кавитация*. 2006. Доступно: <http://www.tstu.ru/r.php?r=structure.kafedratasort=taid=3>.
98. Л. Бергман, (Пер. с нем. под ред. Григорьева, В.С., Розенберга, Л.Д.) *Ультразвук и его применение в науке и технике* (2-е изд.) - Москва: Иностранная литература, 1957.
99. О. В. Ган, А. Л. Ган, В. В. Бойко, В. Г. Кравець, та В. В. Вапнічна “Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення” у *II Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики»*, 30.05.2019, Київ; [Електроний ресурс] Доступно: <https://geobud.kpi.ua/conference/problemygeoinzhenerii2/772>
100. О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, В. В. Полисадова, и А. П. Зыкова, *Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов*. (Учебное пособие). Томск: Томской политехнический университет, 2008.
101. А. Воеводка, О. О. Фролов, и В. Г. Кравець, “Ультразвуковая обработка гранулированной аммиачной селитры как средство стабилизации детонации промышленных зарядов”. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво"*, 5, С. 49-51. 2015.
102. І. І. Ваганов, І. В. Маєвська, та М. М. Попович, *Інженерна геологія та охорона навколишнього середовища*. Вінниця: Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), 2013.
103. ГОСТ 5984-99. *Вещества взрывчатые. Методы определения бризантности*. 1999.

104. В. Н. Охотин, “Автомодельное распределение параметров за фронтом детонационной волны”. *Прикладная механика и техническая физика*, 1, С. 109-113. 1984.
105. М. А. Кук, *Наука о промышленных взрывчатых веществах*. Москва: Недра, 1980.
106. В. А. Даниленко и В. М. Кудинов, “Особенности потери устойчивости детонации в удлиненных зарядах”. *Физика горения и взрыва*, 2, С. 101-105. 1983.
107. А. Н. Дремлин, “Пульсирующий детонационный фронт”. *Физика горения и взрыва*, 4, С. 159-169. 1983.
108. В. С. Трофимов и В. А. Веретенников, *Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978.
109. А. Н. Дремлин, В. С. Саврасов, В. С. Трофимов, та К. К. Шведов., *Детонационные волны в конденсированных средах*. Москва: Наука, 1970.
110. Н. Н. Казаков, *Разрушение горной породы ударным действием взрыва*. Москва: ИГД им. А. А. Скочинского, 1966.
111. O. Han, V. Boiko, V. Kravets, and A. Han, “Formation of parameters of foamed explosive mixtures for sealing soils”. *ScienceRise*, (5), pp. 6–12. 2020. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001430>
112. В. В. Бойко, О. В. Ган, та А. Л. Ган, “Дослідження параметрів вибухового імпульсу малоцільних вибухових сумішей для ущільнення просадних ґрунтів”. *Молодий вчений*, 12, С. 7-12. 2019. doi.org/10.32839/2304-5809/2019-12-76-2
113. Л. Н. Литвин, “О воздействии детонационной волны на оболочку заряда“, в кн. *Новые методы разрушения и механика горных пород*. Киев: Наукова думка, 1981. С. 136-140.
114. К. Вольраф и Г. Фомер, (Ред.). *Физика быстротекучих процессов*. Т.1. Москва: Мир, 1971.
115. А. А. Вовк, (Ред.), *Управление действием взрыва в грунтах и горных породах*. Киев: Наукова думка, 1979.
116. М. А. Садовский, *Механический эффект подземного взрыва*. Москва: Недра, 1971.

117. А. А. Вовк, А. А. Дауетас и В. И. Плужник, “Перспективы применения бестротилового водного геля” в конф. *Пути совершенствования технологии добычи и переработки дорожностроительных материалов*. 1984, Каунас, С. 8-10.
118. А. А. Вовк, В. И. Плужник, та Н. Н. Казаков, “Взрывчатый состав”. А. с. 932785 СССР/, кл. С06В 31/20, 1980.
119. Ф. И. Кучерявый, В. А. Чуриков, и И. В. Кривцов, “Заряд взрывчатого вещества”. Авт. Свид. № 1085348 СССР, 1968.
120. И. А. Лучко, В. А. Плакий, Н. С. Ремез, *Механический эффект взрыва в грунтах*. Киев: Наук.думка, 1989.
121. Л. Д. Ландау и К.П. Станюкович, “Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ”. *Докл. Академии наук СССР*, Т. 46, № 9, С. 112 - 117. 1945.
122. В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, В.П. Долгополов, Л.В. Грумінська, *Метрологія та вимірювальна техніка: Навч. посібник*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
123. M. Shakeran and A. Eslami, “Geotechnical Aspects of Explosive Compaction”. *Shock and Vibration*, 2016(2), pp. 1-14. 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6719271>
124. А.А. Вовк, Г.И. Черный, А.Г. Смирнов. *Деформации сжимаемых сред при динамических нагрузках*. Киев: Наук.думка, 1966, 236 с.
125. О.О. Вовк, А.Г. Смирнов, А.О. Кузьменко. Деякі закономірності розповсюдження циліндричних вибухових хвиль всередині масиву ґрунту. *Доповідь АН УССР*, сер.Б, 1973, №3, с. 270-273
126. Г.И. Покровский. Зависимость формы зоны действия взрыва от формы расположения зарядов. *Взрывное дело*, № 54, 1964, с. 126-132.
127. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, и Л. И. Демещук, А. с. 572094 (СССР), МКИ Е02Д 3/10, УДК 624.5., 1976.
128. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, Л. И. Демещук, и В. И. Плужник, А.с. № 4807541 (СССР). МКИ Е02Д 3/10, УДК 621.138.5., 1990.
128. В. С. Трофимов и В. А. Веретенников, *Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация*. Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1978.

129. Н. Н. Казаков, “Зависимость формы и длительности импульса взрыва от различных факторов”, *Взрывное дело*, 74/31, С. 105–112. 1974.
130. А. И. Гончаров и М. Ю. Корнилов, *Справочник по химии*. Киев: Вища школа, 1997.
131. М. Ф. Друкованный, В. М. Комир, и В. М. Кузнецов, *Действие взрыва в горных породах*. Киев: Наукова думка, 1973.
132. К. Вольраф и Г. Фомер, *Физика быстропотекающих процессов*. Т.2. Москва: Мир, 1971.
133. В.С. Білецький, (Ред.) *Мала гірнича енциклопедія. Т.1.* (ISBN 966-7804-14-3) Донецьк : Схід. видав. дім, 2004.
134. В. Б. Швець, І.П. Бойко, Ю.Л. Винников, М.Л. Зоценко, О.О. Петраков, та С.В. Біда, *Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти*. Дніпропетровськ: Пороги, 2014.
135. В. В. Бойко, Ю. П. Приходько, В. К. Гончар, К. С. Золотухін, Ю. Ю. Орлов, В. І. Плужник, та О.В. Ган, “Пристрій для приготування водонаповненої вспіненої вибухової композиції”, патент на корисну модель UA № 122425, МПК: E21C 37/00, 10.01.2018.
136. В. В. Бойко, Т. В. Хлевнюк, Л. В. Лавренов, О. В. Ган, та Ю. П. Приходько, “Спосіб приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту для ущільнення ґрунтів та розмінування місцевості”, МПК E21C 37/00 F41H 11/00, UA № 140360, бюл. № 4, 25.02.2020. Доступно:
<https://base.uipv.org/searchinv/search.php?action=viewdetails&IdClaim=266114>
137. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України (18.07.2013), Наказ № 469, Про затвердження Технічних правил ведення вибухових робіт на денній поверхні. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1320-13>
138. В. Г. Кравець, В. В. Бойко, А. Л. Ган, О. В. Ган, та О. С. Марченко, “Застосування енергії вибуху під час виконання спеціальних гірничо–будівельних робіт”, *науково–практичний журнал “Сучасна спеціальна техніка” МВС України ДНДІ*, № 2(61), С. 135–150. 2020. DOI: [doi.org/10.36486/mst2411–3816.2020.2\(61\)](https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2020.2(61))

139. Г. А. Симанович, О. Є. Хоменко, та М. М. Кононенко, *Руйнування гірських порід вибухом*. Дніпро: НГУ, 2014.
140. В.Н. Мосинец, и В.Ф. Богацкий, Основные научно-технические проблемы сейсмоки ближней зоны. *Взрывное дело 85/72 "Сейсмика промышленных взрывов"*. М. : Недра, 1983. С. 89-101.
141. А.А.Вовк, Временные характеристики сейсмических волн при взрывах одиночных и групповых зарядов различной конструкции. *Прикладная гидромеханика*. Том 6 (78). 2004, №3. С. 9-21.
142. ДБН В.1.1-12:2006 "Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України"
143. В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, та Т. В. Хлевнюк, Оценка сейсмобезопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учетом их спектральных характеристик. *Вісник Національного технічного університету України НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво" № 16*. 2008. С. 3–13.
144. Г.А. Лямзина, Колебания земляной плотины при взрывах. *Колебания земляных плотин*, М. : Наука, 1967. С. 27-36
145. В.В. Бойко, Т.В. Хлевнюк, К.Н. Ткачук, та Л.О. Мітюк, Критерії оцінки небезпечності дії вибухових хвиль на будівлі ослаблені тріщинами. *Проблеми охорони праці в Україні*, № 7. 2003. С. 97–104.
146. В.В. Бойко, Н.С. Ремез, Т.В. Хлевнюк, та Ю.В. Шевченко. Динамическое поведение слоистой цилиндрической оболочки в грунтовом массиве при взрывном нагружении. *Акустичний вісник*, № 2. 2003. С.10–16.
147. В.В. Бойко, А.А. Кузьменко, та Т.В. Хлевнюк. *Оценка допустимой сейсмобезопасности зданий, ослабленных трещинами, при техногенных взрывах*. Киев. : НДІБК, 2008.
148. М.В. Василенко, О.М. Алексейчук *Теорія коливань і стійкості руху: Підручник*. Київ.: Вища школа, 2004.
149. В.К. Совмен, Б.Н. Кутузов, А.А. Марьясов и др. *Сейсмична безпека при вибухових роботах*. М.: Горная книга, 2012.
150. В.В. Бойко *Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України*. К.:ТОВ "Видавництво Сталь", 2012.

151. В.М. Здещиц, Измерение векторной скорости сейсмических колебаний с помощью запоминающего цифрового осциллографа TDS-2014. *Вісник Криворізького технічного університету*. Вип.16. Кривой Ріг, 2007. С.191-196.
152. Г.И. Волович *Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых устройств*. 2 изд., испр. М.: Издательский дом “Додэка-XXI”, 2007.
153. MiniMate Plus.Operator Manuel.Доступно: www.instantel.com
154. А.О.Кузьменко, В.В.Бойко, Т.В.Хлевнюк, Д.В.Хлевнюк, В. А.Лемешко Патент на корисну модель №131003 UA *Спосіб визначення сейсмобезпечної кількості одночасно підірваних свердловинних зарядів і відстаней*.заявл. 25.04.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. №1.

Наукове видання

БОЙКО Віктор Вікторович
ГАН Алатолій Леонідович
ГАН Олена Валеріївна

СПЕЦІАЛЬНІ ВИБУХОВІ ТЕХНОЛОГІЇ
В ГЕОІНЖЕНЕРІЇ

Монографія

Технічний редактор
Комп'ютерна верстка

А.Л. Ган
О.В. Ган