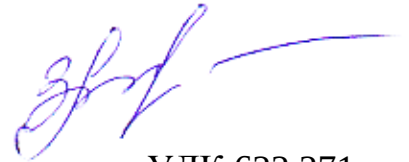


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ЗАКУСИЛО РОМАН ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 622.271

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ НИЗЬКОШВИДКІСНИХ ПРОЦЕСІВ
ДЕТОНАЦІЇ НА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБОТАХ**

Спеціальність 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана самостійно.

**Офіційні
опоненти:**

доктор технічних наук, професор
Темченко Олександр Анатолійович,
Навчально-науковий технологічний інститут Державного
університету економіки і технологій Міністерства освіти і
науки України, професор кафедри хімічних технологій та
інженерії

доктор технічних наук, професор
Воробйов Віктор Васильович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри машинобудування

доктор технічних наук, доцент
Фролов Олександр Олександрович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства
освіти і науки України, професор кафедри геоінженерії

Захист відбудеться 06.06.2025 року об 11.00 на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 14.052.04 у Державному університеті «Житомирська політехніка» за
адресою: 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, конференц зала.

З дисертацією можна ознайомитися на офіційному сайті за покликанням
<https://ztu.edu.ua/site/department?id=142> та у бібліотеці Державного університету
«Житомирська політехніка» за адресою: 10005, Україна, м. Житомир,
вул. Чуднівська, 103.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д
14.052.04



В. О. Шлапак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми досліджень. Підвищення ефективності та безпеки ведення вибухових робіт на відкритій поверхні – основне завдання досліджень новітніх вибухових технологій. Значні обсяги видобутку скельних корисних копалин із залученням енергії вибуху, мінливість гірничо-геологічних і гідрогеологічних умов вимагають постійного вдосконалення техніки вибухових робіт при відкритому і підземному способах видобування корисних копалин, в тому числі через розробку нових засобів ініціювання та висадження.

Комплексний підхід до вирішення перманентної проблеми підвищення безпеки вибухових робіт можливий за рахунок зниження швидкості детонації ініціюючих пристроїв та промислових вибухових речовин на всіх етапах, від ініціювання до подрібнення порід.

Певне відставання вітчизняної вибухової техніки в частині засобів ініціювання промислових зарядів успішно ліквідується в останні роки розробкою конструктивних рішень та технологій з відповідною матеріальною базою для виготовлення власного аналога домінуючої в світі неелектричної системи ініціювання на основі детонуючого трубчастого хвилеводу. Створення вітчизняного коаксіального транслятора детонаційної хвилі варто вважати значним досягненням українських вчених та інженерів. Їх роботи проводилися в умовах практично повної відсутності відомостей щодо теоретичних аспектів безпечної низькошвидкісної детонуючої системи, опису особливостей фізичних процесів і явищ при детонації хвилеводу, обговорення специфіки технології його виготовлення.

Використання для проміжних детонаторів (ПД) з утилізованих потужних вибухових речовин (ВР) на основі тротилу, гексогену, октогену з одночасним безперервним підвищенням маси заряду відсунуло на другий план питання безпеки у даному кластері вибухових робіт і розробку принципово нових проміжних детонаторів. Застосування для цих цілей вибухових сумішей з низькою швидкістю детонації, виготовлених з компонентів, які власне не є ВР та стають такими лише при змішуванні на місці проведення вибухових робіт, а також підвищення ефекту ініціювання за рахунок геометричної форми ПД має сприятливо вплинути на вектор подальшого розвитку наукової думки в даному напрямку.

Одним з перспективних напрямків у розвитку екологічно чистих ВР є створення сумішевих та емульсійних вибухових речовин (ЕВР) місцевого приготування є регульованою щільністю та швидкістю детонації та безпечних у застосуванні. Ці ВР визнані в зарубіжних країнах одними з найбільш перспективних, а обсяги і галузі їх застосування постійно розширюються завдяки їх високій фізичній стабільності, підвищеній вибуховій здатності, низькій токсичності газів вибуху порівняно з традиційними ВР, можливості в широких межах змінювати рецептуру і фізичні характеристики, доступності та дешевизні сировини, високій безпеці виготовлення і застосування. ЕВР активно розробляються і застосовуються в Україні. Проте аналіз ефективності їх застосування на відкритих гірничих роботах не є системним і вимагає комплексного підходу до управління детонаційними процесами в низькошвидкісному режимі. Цей режим має сприяти подовженню тривалості у часі розвитку в гірському масиві новостворених мікродефектів на стадії притаманного йому інкубаційного періоду в режимі в'язкого деформування.

Значну участь в розвитку процесу ініціювання промислового заряду відіграє проміжний детонатор або бойовик, фактично відповідальний за його початковий етап, від якого залежить механізм і ефективність масового вибуху системи промислових зарядів. Традиційно в якості бойовика використовують або вироби з пресованих чи литих штатних індивідуальних вибухових речовин (переважно тротилу), або в разі їх відсутності – спеціально сформовані заряди з наважки штатної промислової вибухової речовини, що вміщує в своєму складі тротил. Постає необхідність вивчення можливості заміни високовартісних і відносно небезпечних бойовиків заводського виготовлення на більш технологічно і економічно доступні, безпечні у виготовленні, перевезенні та використанні вироби з місцевих матеріалів, що набувають вибухової здатності при їх змішуванні на місці виконання вибухових робіт. Основною вимогою до цих виробів з порівняно більш низькою швидкістю детонації є їх ініціююча здатність у робочому режимі. Ця мало вивчена тема вимагає значно ширшого дослідження.

Останніми десятиліттями в міжнародній практиці для «м'якого» відділення монолітів використовують К-труби, що забезпечують ощадливе відколювання блоків від масиву. Вони містять спеціально розроблені та промислово виготовлені заряди вибухових речовин з низькою швидкістю детонації. Однак одночасно до їх складу вводяться високочутливі та небезпечні нітроефіри. Перед українськими науковцями постало завдання створення більш безпечного та ефективного аналогу без застосування нітроефірів на основі доступних невибухових матеріалів. Поряд з іншими напрямками розвитку вибухової техніки на основі низькошвидкісних процесів детонації для їх синергетичного використання та керування їх потенційними можливостями в гірництві, вирішення цього завдання потребує поглибленої уваги до добору енергетично ефективних вибухових, стабільних за детонаційною здатністю, екологічно необтяжливих речовин і їх композицій, в т. ч. місцевого приготування шляхом аналітичних, термогравіметричних і мікроскопічних досліджень для встановлення умов їх вибухового перетворення.

Викладене вище характеризує **актуальність проблеми**, яка ґрунтується на необхідності виконання комплексних теоретичних і прикладних досліджень щодо розробки низки простих за складом, безпечних у виготовленні переважно на місці виконання гірничих робіт вибухових композицій для практичної реалізації технологічних переваг ефективних способів і засобів поширення низькошвидкісних вітчизняних детонуючих систем на відкритих гірничих роботах.

Зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Робота виконана в рамках держбюджетної теми Шосткинського інституту СумДУ № 0117U003110 «Розробка низькошвидкісних вибухових засобів та їх застосування при відкритих гірничих роботах», науково-дослідної теми № 117.09.06.17/2017/у/ТХО/486 «Вибір і обґрунтування оптимального варіанта використання наливних і патронованих емульсійних вибухових матеріалів в умовах кар'єру ПАТ «Південний ГЗК», міжнародної грантової науково-дослідної теми № 80.11-2020.01 «Науково-технічний супровід робіт та розробка директивно-проектної документації для створення хімічного виробництва на ділянці ТОВ «D M Servis» (республіка Азербайджан), науково-дослідної теми № 80.11-2023.СП/02 «Розробка Директивного технологічного процесу виробництва по збиранню системи ініціювання неелектричної «Хвиля» на ділянці ПрАТ "Інтервибухпром" та розробка проекту Технічних умов «Система ініціювання неелектрична "Хвиля"», науково-дослідної

теми № 117.05.10.12 «Розробка директивного технологічного процесу (ДТП) отримання модифікованого анозиту потужністю до 1000 т/рік із заданими характеристиками», науково-дослідної теми № 117.05.11.12 «Розробка способу отримання кристалічного анозиту із заданими характеристиками», науково-дослідної теми № 117.05.12.12 «Розробка, виготовлення та поставка обладнання дослідної установки кристалізації для отримання модифікованого анозиту із заданими характеристиками», науково-дослідної теми 80.11-2024.СП/09 «Розробка технологічного регламенту на виробництво для ТОВ «ТЕХНОСТАРТ УА», науково-дослідної теми 80.11-2024.СП/10 «Розробка технічних умов на продукт для ТОВ "ТЕХНОСТАРТ УА"», в яких автор дисертації був науковим керівником або виконавцем за окремими розділами робіт.

Мета роботи. Підвищення ефективності буро-вибухових робіт на відкритих гірничих роботах шляхом встановлення та впровадження раціональних фізичних та технологічних параметрів низькошвидкісної системи підривання місцевого приготування для забезпечення її стабільного та безпечного функціонування на основі теоретичного обґрунтування детонаційних процесів.

Завдання досліджень

теоретичне обґрунтування та експериментальні дослідження механізму старту ініціюючого імпульсу і поширення детонації коаксіальними трубами та розгалуженнями детонуючого хвилеводу;

дослідження детонаційних процесів у сумішевих вибухових речовинах місцевого приготування та вдосконалення способів ініціювання зарядів ПВР за рахунок спрощення їх рецептури та зміни геометрії проміжних детонаторів;

вивчення властивостей та розробка технології емульсійної ПВР на основі водного розчину аміачної та натрієвої селітр в нафтопродукті з сенсibilізаторами і стабілізуючими домішками;

дослідження термодинамічних і вибухових характеристик К-зарядів та розробка елементів вітчизняної системи для «м'якого» вибухового відділення монолітів декоративного каменю від масиву;

дослідження безпеки застосування низькошвидкісних детонаційних систем.

Об'єкт дослідження – детонаційні процеси у вибухових системах промислового призначення.

Предмет дослідження – фізичні закономірності низькошвидкісних детонаційних процесів та технологічні засоби реалізації безпечної системи підривання промислових зарядів для якісного масового висадження гірських порід.

Методи дослідження. Теоретичне дослідження динаміки полімерної трубки під дією рухомого ударного навантаження. Експериментальне вивчення в лабораторних, полігонних та промислових умовах механізму протікання детонаційних процесів в елементах безпечної низькошвидкісної системи підривання із застосуванням сучасної методики реєстрації силових і кінематичних параметрів. Термодинамічні та термофізичні розрахунки енергетичних і безпекових параметрів досліджуваних елементів системи підривання. Техніко-економічний аналіз ефективності основних технологічних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше дано теоретичний опис специфічних хвильових ефектів у трубчастому коаксіальному трансляторі детонаційної хвилі з нанесеним на внутрішню поверхню шаром вибухової речовини докритичної маси;

- вперше досліджено умови струшування напиленої вибухової речовини зі стійким детонаційним розкладом пилоповітряної вибухової суміші з дотриманням режиму пружного деформування оболонки;

- вперше встановлено механізм трансформації детонаційного процесу в трубчастому хвилеводі та в комутаційних вузлах системи ініціювання, що забезпечують стабільність її функціонування;

- вперше визначено детонаційні характеристики низькошвидкісних вибухових композицій на основі: нітрометану; емульсії водного розчину аміачної та натрієвої селітр в нафтопродукті; перекису водню і гліцерину, з сенсibilізаторами та стабілізуючими домішками;

- науково та експериментально обґрунтовано ефективний склад безпечної вибухової суміші для спорядження вітчизняного аналога К-труб на місці виконання вибухових робіт із застосуванням гетерогенних малочутливих низькошвидкісних вибухових композицій місцевого приготування на основі невибухових матеріалів для якісного і безпечного відбивання блочного каменю;

- вперше розроблено ізогідричний метод отримання сферичних кристалів перхлоратів та октогену, що надає можливість отримувати округлі кристали заданих розмірів та форми в кількості не менше 90 % від маси кристалізованої речовини, для підвищення стабільності низькошвидкісних процесів детонації в засобах підривання.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблено безпечну вітчизняну низькошвидкісну систему ініціювання, відпрацьовано технологічні параметри процесу реалізації елементів системи.

Розроблено та впроваджено у виробництво директивний технологічний процес виготовлення вітчизняної неелектричної системи ініціювання «Хвиля».

Запропоновано технологічні рішення з конструювання вибухової мережі розосереджених свердловинних зарядів на масових вибухах шляхом використання трубчастого безкапсульного комутаційного блока (розгалужувача).

Розроблено вибухові низькошвидкісні композиції на основі нітрометану, перекису водню та гліцерину, перхлоратів для низькошвидкісних проміжних детонаторів.

Виявлено та обґрунтовано переваги неелектричної ініціюючої системи, як засобу формування інтервалів уповільнень на мікро- і мілісекундних рівнях під час короткоуповільненого підривання та відповідного успішного управління сейсмічним ефектом вибуху.

Розроблено та впроваджено у виробництво директивний технологічний процес виготовлення емульсійної вибухової речовини «Азнітро».

Вдосконалено низькошвидкісну безпечну систему підривання типу К-труб місцевого виготовлення для ощадливого відколювання блочних масивів.

Розроблено метод отримання сферичних кристалів високоенергетичних матеріалів ізогідричним способом та впроваджено у виробництво директивний технологічний процес їх виготовлення.

Розроблено схеми висадження для різних типів низькошвидкісних систем підривання з метою підсилення механічного ефекту вибуху в надторцевому шарі руйнованого масиву.

Особистий внесок здобувача. Особисто автором обрано тему дисертації, визначено мету і завдання досліджень, сформульовано основні наукові положення

роботи, розроблено методики проведення комплексу лабораторних, полігонних та промислових експериментів. Автором теоретично обґрунтовано механізм розвитку і протікання хвильових явищ в коаксіальному тілі детонуючого хвилеводу з наступним формуванням детонуючої пилоповітряної суміші [11, 16, 25, 43, 51, 59, 82]. Розроблено конструкцію пасивних комутаційних блоків і виконано дослідження щодо їх надійності у ході передачі детонаційного процесу системою вибухової мережі масового вибуху [1, 40, 50, 52]. Проведено дослідження щодо вибору композиції невибухових компонентів свердловинних бойовиків для їх виготовлення на місці виконання вибухових робіт [10, 21, 24, 27–35, 37, 49, 63–65, 67, 68, 70, 72–77, 79, 80, 84, 89, 90]. Досліджено характеристики існуючих та розробленої емульсійної ПВР [7, 20, 44, 78, 81]. Досліджено характеристики розроблених зарядів для видобутку блочного каменю типу К-труб [2–5, 12, 13, 23, 36, 39, 57, 69, 71, 85]. Проведено оцінку безпеки та ефективності застосування низькошвидкісних систем підривання при масових вибухах та їх вплив на розповсюдження руйнування в гірничому масиві [15, 17–19, 22, 26, 58, 61, 62, 66, 86–88, 91]. Запропоновано методики та технологічний процес виготовлення всіх елементів нової безпечної низькошвидкісної системи підривання [6, 8, 14, 41, 42, 45–48, 53–56, 60, 83].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися на семінарах і науково-технічних радах Шосткинського інституту Сумського Державного університету; I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» Шостка, 2012, 2014, 2016, 2018, 2021, 2022, 2023, 2024 рр.; XIV Наукової конференції «Львівські хімічні читання – 2013» Львів, 2013 р.; II Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі» Кривий Ріг, 2017 р.; 29-й, 30-й и 31-й Міжнародних конференціях «BLASTING TECHNIQUES», Стара Лесна, Словаччина, 2017, 2018, 2019 рр.; 15-й, 16-й, 18-й Міжнародних конференціях «IPOEX EXPLOSIVES: Research – Application – Safety», Устронь, Польща, 2018, 2019, 2023 рр.; II Міжнародної науково-технічної конференції «Problems of Geoengineering and Under-ground Urbanistic», Київ, 2019 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 56 статей (16 у виданнях, індексованих наукометричними базами Scopus/WoS, 22 у іноземних виданнях), 17 патентів на винахід, 14 тез доповідей (6 іноземних), 4 монографії (3 іноземні, 1 індексована наукометричними базами Scopus/WoS).

Обсяг і структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, викладених на 347 сторінках машинопису, враховуючи 18 таблиць, 88 рисунків, 19 додатків, список використаних джерел із 272 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність сформульованої наукової проблеми, що ґрунтується на комплексних теоретичних дослідженнях і прикладних розробках сучасної низки ефективних і безпечних у виготовленні та експлуатації низькошвидкісних вітчизняних детонуючих систем для відкритих гірничих робіт, показано зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та основні задачі досліджень, висвітлено наукову новизну і практичну цінність результатів досліджень.

У першому розділі розглянуто сучасний стан досліджень з тенденціями вдосконалення засобів та способів ведення вибухових робіт у гірництві. Належну увагу відведено розробці вітчизняних засобів висадження місцевого виготовлення, більша частина компонентів яких не є власне вибуховими речовинами чи вибуховими матеріалами, зниженню швидкості детонаційних процесів в елементах вибухових систем для підвищення безпеки проведення вибухових робіт на відкритих розробках родовищах корисних копалин.

Згідно з сучасними уявленнями щодо механізму руйнування гірських порід цей процес формується з двох стадій: докритичної, яка призводить до зародження і повільного в'язкого підростання мікродефектів і критичної, що супроводжується лавинним їх зростанням. На першій стадії підростання субкритичних щілин пов'язане з рухом і взаємодією мікродефектів (дислокацій), що призводить до утворення мікрощілинності. Відповідно до теорії Гріффітса необхідною умовою руйнування є поява достатньо великої щілини, що є передумовою автокаталітичності процесу. Проте відомо, що при швидкісному навантаженні існує певний інкубаційний період, необхідний для взаємодії мікродефектів. Якщо час дії навантаження менший цього періоду, то руйнування породи здійсниться лише при напруженнях, наближених або таких, що перевищують її теоретичну міцність (10^2 – 10^3 ГПа). Такі параметри навантаження в реальних умовах досяжні лише в безпосередній близькості до джерела навантажень. Отже, для ефективного руйнування породи доцільно прагнути, щоб час навантаження перевищував тривалість інкубаційного періоду.

Застосування низькошвидкісних детонуючих систем має сприяти не лише спрощенню гірничих технологій в частині виготовлення вибухових композицій місцевого виготовлення з гарантією надійного спричинення детонації промислового заряду і його вибухового розкладання, а й дотримання прогнозованої якості відбивання з одночасною економічністю, екологічністю та безпекою вибухових робіт.

Визначені напрямки наукового пошуку формують основу плану досліджень. У дисертаційній роботі вирішуються наукові та прикладні питання, пов'язані з розвитком теорії й техніки вибухової справи для відкритих гірничих робіт з метою теоретичного обґрунтування та експериментальних досліджень механізму розвитку та передачі детонаційного процесу в матеріалі оболонки і в розгалуженнях детонуючого хвилеводу; заміни високовартісних вибухових речовин у проміжних детонаторах-бойовиках на композиції з невибухових компонентів місцевого виготовлення з одночасною зміною геометрії проміжних детонаторів для керованого формування силового потоку в деформованому середовищі; вдосконалення технології виробництва сучасної емульсійної вибухової речовини підвищеної безпеки, адаптованої до конкретних умов виконання буро-підривних робіт; розробки наукових підстав та технологічних елементів низькошвидкісної гетерогенної системи для безпечного вибухового відділення в ощадливому режимі монолітів декоративного каменю від масиву без застосування традиційних сенсibilізаторів – нітроефірів; відпрацювання схем і методів комутації вибухової мережі при масових вибухах за умови нижнього ініціювання свердловинного заряду та застосування низькошвидкісної ВР місцевого виготовлення з метою орієнтації силового поля в міжзарядному просторі у бік покрівлі за схемою вертикального клинового врубу та управління сейсмічним ефектом масового вибуху.

Другий розділ присвячено аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень механізму зародження і розвитку детонаційних процесів у трубчастому детонуючому хвилеводі, завданням якого є передача стійкого ініціюючого імпульсу від стартера до промислового заряду в безпечному низькошвидкісному режимі.

Вивчено механізм розвитку в детонуючому хвилеводі специфічних хвильових явищ і підтримання їх у стабільному режимі. Теорія будується на основі концепції формування в трубчастій пластиковій оболонці під дією ініціюючого імпульсу сукупності пружних хвиль, що генерують ударні деформації для відділення напилених часток ВР від поверхні внутрішнього каналу хвилеводу з утворенням у каналі хвилеводу вибухової пилоповітряної суміші. Розглянуто подовжений заряд, що складається з циліндричної оболонки, на внутрішню поверхню якої рівномірно нанесено шар вибухової речовини з товщиною менше критичного діаметра. Такий шар вибухової речовини практично не має впливу на механічні властивості оболонки. Для дослідження хвиль пружних деформацій у стінці оболонки, під дією яких розпорошується вибухова речовина, використано рівняння руху циліндричної оболонки для осесиметричного випадку. Одержано систему рівнянь з частковими похідними щодо двох невідомих функцій (U_1 і U_n):

$$\begin{aligned} \rho_1 h U_1 - \left[\frac{Eh}{1-\nu^2} \right] \cdot \left[U_1'' - \frac{\nu}{R} \cdot U_n' \right] &= 0 \\ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} U_n^{IV} - \frac{\rho_1 h^3}{12} \left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)} \right] U_n'' + \rho_1 h \left[1 + \frac{Eh}{12(1-\nu^2)GR} \right] U_n + \\ + \frac{\rho_1 h^3}{12G} U_n - \left[\frac{E^2 h^3}{12(1-\nu^2)GR^2} \right] U_n'' + \left[\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2} \right] U_n + \left[\frac{E^2 h^2 \nu}{12(1-\nu^2)GR} \right] U_1''' - \\ - \left[\frac{\rho_1 E h^3 \nu}{12(1-\nu^2)GR} \right] U_1' - \left[\frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)} \right] U_1' &= P_n + \frac{\rho_1 h^2}{12G} P_n - \left[\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)G} \right] P_n'' \end{aligned} \quad (1)$$

Система, що описує динаміку циліндричної оболонки під дією осесиметричного навантаження P_n , може бути використана для опису складних механічних явищ, зокрема для вивчення хвиль деформацій, які беруть участь у процесі розпилення вибухової речовини.

Для постановки завдання про поширення в циліндричній оболонці поширення гармонійних хвиль, ініційованих рухомим вибуховим навантаженням, введемо фазову координату $X = x - Vt$, що рухається зі швидкістю V .

$$\begin{aligned} h \left(\rho_1 V^2 - \frac{E}{1-\nu^2} \right) u_1'' + \frac{Eh}{1-\nu^2} \frac{\nu}{R} u_n'' &= 0; \\ \frac{Eh^3 \nu}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{E}{1-\nu^2} - \rho_1 V^2 \right) u_1''' - \frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)} u_1' + \\ + \left\{ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho_1 h^3}{12} \left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)} \right] V^2 + \frac{\rho_1^2 h^3}{12G} V^4 \right\} u_n^{IV} + \\ + \left\{ \rho_1 h \left[1 + \frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)GR^2} \right] V^2 - \frac{E^2 h^3}{12(1-\nu^2)GR^2} \right\} u_n'' + \\ + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2} u_n &= P_n + \left[\frac{\rho_1 h^2}{12G} V^2 - \frac{Eh^2}{12G(1-\nu^2)} \right] P_n''. \end{aligned} \quad (2)$$

Тоді:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}; & \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} &= V^2 \frac{\partial u_1}{\partial x}; \\
 \frac{\partial u_n}{\partial x} &= \frac{\partial u_n}{\partial x}; & \frac{\partial u_n}{\partial t} &= -V \frac{\partial u_n}{\partial x}; \\
 \frac{\partial^2 u_n^2}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2}; & \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} &= V^2 \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2}; \\
 \frac{\partial^3 u_n}{\partial x} &= \frac{\partial^3 u_n}{\partial x^3}; & \frac{\partial^4 u_n}{\partial t^4} &= V^4 \frac{\partial^4 u_n}{\partial x^4}; \\
 \frac{\partial^4 u_n}{\partial x} &= \frac{\partial^4 u_n}{\partial x^4}; & \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2 \partial t^2} &= V^2 \frac{\partial^4 u_n}{\partial x^4}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

З урахуванням (3) система (2) приводиться до вигляду

$$\begin{aligned}
 h \left(\rho_1 V^2 - \frac{E}{1-\nu^2} \right) u_1'' + \frac{Eh}{1-\nu^2} \frac{\nu}{R} u_n'' &= 0; \\
 \frac{Eh^3 \nu}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{E}{1-\nu^2} - \rho_1 V^2 \right) u_1''' - \frac{Eh \nu}{R(1-\nu^2)} u_1' + \\
 + \left\{ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho_1 h^3}{12} \left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)} \right] V^2 + \frac{\rho_1^2 h^3}{12G} V^4 \right\} u_n^{IV} + \\
 + \left\{ \rho_1 h \left[1 + \frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)GR^2} \right] V^2 - \frac{E^2 h^3}{12(1-\nu^2)GR^2} \right\} u_n'' + \\
 + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2} u_n = P_n + \left[\frac{\rho_1 h^2}{12G} V^2 - \frac{Eh^2}{12G(1-\nu^2)} \right] p_n''.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Штрихами позначено диференціювання по змінній X .

Система рівнянь (4) описує динаміку циліндричної оболонки під дією рухомого осесиметричного навантаження P_n . Ця система є більш складною порівняно з відомими, тому що містить похідні від інтенсивності навантаження P_n , що дозволяє більш точно описати вплив характеру вибухових і детонаційних хвиль на коливання оболонки.

Після струшування напленої на внутрішній поверхні поліетиленової трубки часток ВР за допомогою електровибуху або вибуху детонатора утворюється пилоповітряна суміш, якою починає поширюватися детонаційна хвиля. Її дія так само струшує напелену ВР і створює умову подальшого просування детонації.

Завдання про динаміку напружено-деформованого стану пружної циліндричної трубки під дією в її каналі рухомого навантаження інтенсивністю P_n описуються системою рівнянь, у свою чергу $x < 0$ $P_n = 0$, тому рівняння є однорідними:

$$h \left(\rho V^2 - \frac{E}{1-\nu^2} \right) U'' + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R} W^I = 0. \tag{5}$$

Розглянемо випадок, коли детонаційна хвиля при $x > 0$ створює поле постійного тиску, тоді $P_n = \text{const}$, $P_n'' = 0$ і справедливі неоднорідні рівняння:

$$h\left(\rho V^2 - \frac{E}{1-\nu^2}\right)U^{II} + \frac{Eh}{(1-\nu^2)}\frac{\nu}{R}\Omega^I = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Eh^3\nu}{12(1-\nu^2)GR}\left(\frac{E}{1-\nu^2} - V^2\rho\right)U^{III} - \frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}U^I + \left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho h^3}{12}\left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2 + \right. \\ & \left. + \frac{\rho^2 h^3}{12G}V^4\right\}W^{IV} + \left\{\rho h\left[1 + \frac{h^2 E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2 - \frac{E^2 h^3}{12(1-\nu^2)^2 GR^2}\right\}W^{II} + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\Omega = P_n \end{aligned} \quad (7)$$

Для спрощення системи (6), (7) зробимо додаткові перетворення.

Рівняння (6) цієї системи має інтеграл, тому з нього слідує:

$$U^I = C_1 - \frac{Ev}{R[\rho(1-\nu^2) - E]}\omega, \quad U^{III} = -\frac{Ev}{R[\rho(1-\nu^2)V^2 - E]}\omega^{II}$$

де C_1 – константа.

У результаті друге рівняння системи (7) приводиться до форми:

$$\begin{aligned} & \left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho h^3}{12}\left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2 + \frac{\rho^2 h^3}{12G}V^4\right\}\omega^{IV} + \\ & + \left\{\rho h\left[1 + \frac{h^2 E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2 - \frac{E^2 h^3}{12(1-\nu^2)^2 GR^2}\right\}\omega^{II} + \\ & + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\left\{1 + \frac{Ev^2}{[\rho(1-\nu^2)V^2 - E]}\right\}W = \frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}C_1 \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогічні перетворення виконуються для системи (7) при $x > 0$

$$U^I = C_2 - \frac{Ev}{R[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}\omega, \quad U^{III} = -\frac{Ev}{R[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}\omega^{II} \quad (9)$$

Підставляючи (9) в (7), отримаємо:

$$\begin{aligned} & \left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho h^3}{12}\left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2 + \frac{\rho^2 h^3}{12G}V^4\right\}W^{IV} + \\ & + \left\{\rho h\left[1 + \frac{h^2 E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2 - \frac{E^2 h^3}{12(1-\nu^2)^2 GR^2}\right\}W^{II} + \\ & + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\left\{1 + \frac{Ev^2}{[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}\right\}W = \frac{Ev^2}{R(1-\nu^2)}C_2 + P_n \end{aligned} \quad (10)$$

Загальний розв'язок $\omega(x)$ рівняння (8) конструємо у вигляді суми загального розв'язку $\omega_{0,0}(x)$ відповідного однорідного рівняння для (8) і його часткового розв'язку $\omega_{rn}(x)$

$$\omega(x) = \omega_{rk}(x) + \omega_{rn}(x). \quad (11)$$

Після подальших перетворень система може бути використана для визначення параметрів хвиль деформацій і вивчення явища струшування й розпилення дрібнокристалічної ініціюючої ВР у каналі хвилеводу. Отримана система рівнянь є більш складною порівняно з відомими, тому що містить похідні від інтенсивності навантаження. Це дозволяє більш точно описати вплив характеру вибухових і детонаційних хвиль на коливання оболонки.

За розробленою методикою в розділі побудовано розв'язок рівнянь задачі динаміки рухомого навантаження, отримано закономірності поширення незатухаючого хвильового процесу у вигляді гармонійних хвиль в осьовому напрямку циліндричної поліетиленової оболонки. Параметри, характер циліндричної трубки, рухливе в її тілі навантаження сприяють механічному струшуванню напленої на внутрішню поверхню ВР і створенню умов для стабільного просування детонаційної хвилі в каналі трубки пилоповітряною вибуховою сумішшю.

Розв'язок системи алгебраїчних рівнянь, у яку як параметр входить тиск у циліндричній порожнині разом з відомими співвідношеннями гідродинамічної теорії детонації, виконано з урахуванням реальних параметрів неелектричної ініціюючої системи й свідчить про відповідність розрахункових даних відомим експериментальним характеристикам.

Отримані результати стабільних процесів детонації при розв'язанні наведеної низки рівнянь, зі введеними параметрами хвильоводу для НСІ:

$$\text{Швидкість детонації} \quad D = [2Q(\gamma^2 - 1)]^{1/2} = 2100 \text{ м/с},$$

$$\text{Масова швидкість} \quad W = D \frac{1}{\gamma + 1} = 1750 \text{ м/с},$$

$$\text{Тиск фронту детонації} \quad P = \rho_0 Q(\gamma - 1) = 18,5 \text{ МПа}.$$

У розділі 3 викладено методичні засади та аналіз результатів лабораторних досліджень динамічних параметрів неелектричної ініціюючої системи, які базуються на використанні чутливих датчиків з п'єзокераміки та осцилографічної реєстрації.

Досліди підтверджують, що після ініціювання шляхом генерації електричного імпульсу механічний процес вибухового перетворення вибухової речовини, напленої на внутрішню поверхню трубки детонуючого хвильоводу, відбувається на ділянці детонуючого хвильоводу довжиною 0,5 м (ділянка розгону) з наростаючою швидкістю, залишаючись далі на постійному штатному рівні. Коливання енергії ініціюючого електровибуху практично не впливає на довжину розгону детонаційної хвилі у хвильоводі, що становить орієнтовно 0,5 м.

Для порівняння на рис. 1 в однаковому масштабі наведено осцилограми деформування трубки ДХ на відстанях 0,28 м (рис. 1, а), 0,4 м (рис. 1, б) і 0,9 м (рис. 1, в) від точки ініціювання. Чітко простежується переддетонаційний процес горіння й утворення детонаційної хвилі в каналі поліетиленової трубки. Амплітудне значення сигналу тензорезистора наростає, фронт стає більш крутим, загальна тривалість сигналу зменшується. На відстані 0,9 м від електророзряду, де процес детонації виразно стабілізується, середнє значення відносної окружної деформації досягає $0,5 \cdot 10^{-3}$, а тривалість імпульсу становила $4 \cdot 10^{-4}$ с.

Експериментально досліджено процес деформування поліетиленової трубки ДХ. Нижня осцилограма (в) на рис. 1 ілюструє деформування зовнішньої поверхні трубки ДХ у процесі поширення детонаційної хвилі. Верхні криві (а, б) відображають залежність деформації поверхні трубки від часу. Оцінка сигналів з урахуванням різної чутливості каналів свідчить про те, що їхні значення відрізняються в 20 разів. Отже, можна зробити висновок, що помилки у вимірах деформацій ДХ, що виникають за рахунок дії електровибуху на відстанях більше 0,44 м від точки ініціювання, не перевищують 5 %.

До того ж, імпульс тиску на протилежному від місця ініціювання кінці хвилеводу (2,0–2,5 МПа) абсолютно достатній для порушення детонації в спеціальних проміжних капсулах. Відносно низька швидкість детонації (1000...2000 м/с) дозволяє використовувати детонуючий хвлевід як елемент коротких уповільнень і формувати вибухову мережу з потрібними змінними інтервалами сповільнень при меншій витраті хвилеводу.

Наступний дослід з визначення швидкості детонації в досліджуваному хвилеводі виконано на трубці довжиною 585 мм (рис. 2).

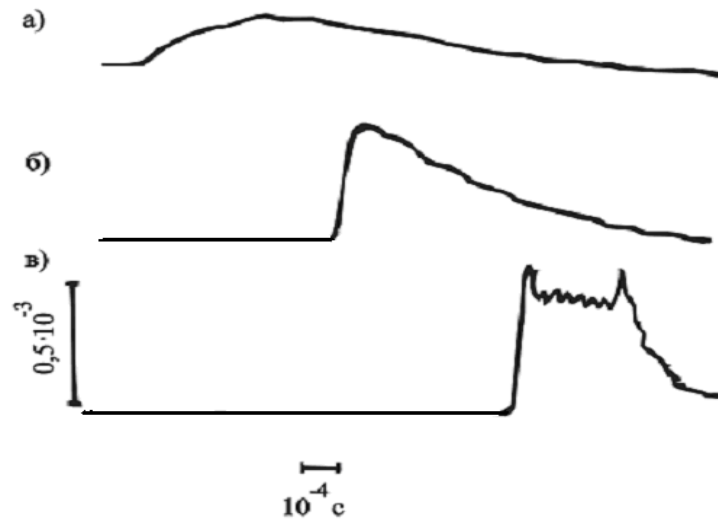


Рис. 1. Осцилограми деформування трубчастого хвилеводу на відстані від точки ініціювання: а – 0,28 м, б – 0,4 м, в – 0,9 м.

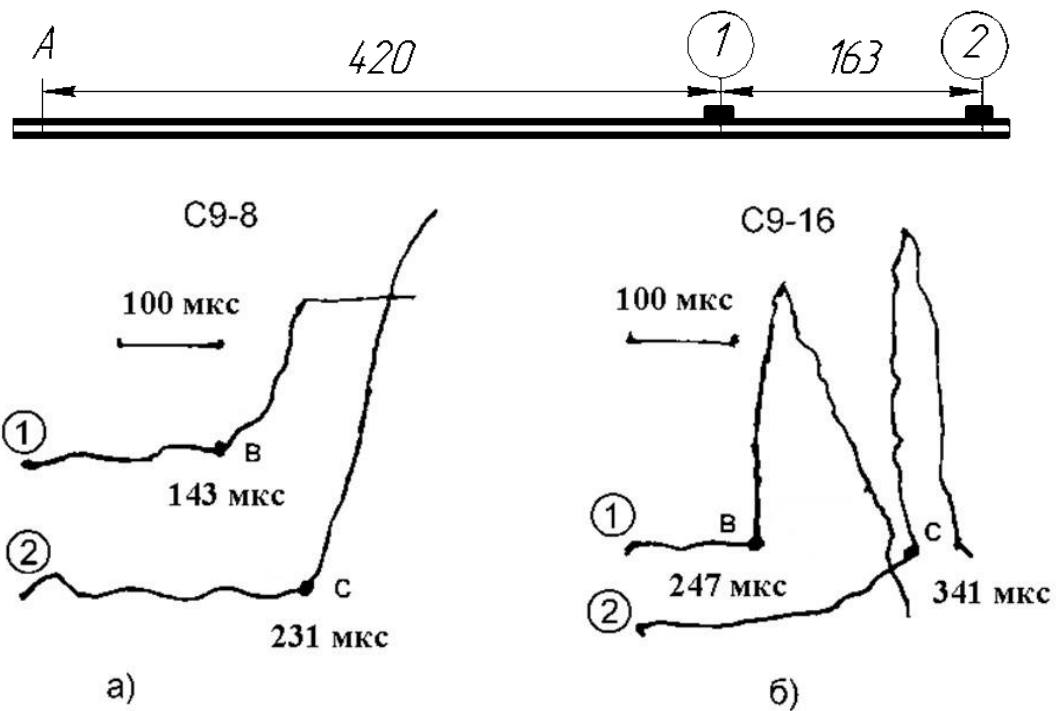


Рис. 2. Схема експериментів та результати випробувань детонуючого хвилеводу: а – п'єзодатчик 1, б – п'єзодатчик 2

Показання датчиків 1 і 2 паралельно виводилися на екрани двох осцилографів. Осцилограми п'єзодатчиків 1 і 2, зареєстровані на осцилографі С 9-8, та на осцилографі С 9-16.

Швидкість детонації між 1 і 2 датчиками становить:

осцилограф С 9-8 $V = 1852$ м/с,

осцилограф С 9-16 $V = 1734$ м/с.

Отже, середня швидкість детонації по двом осцилографам становить $V_{\text{ср}} = 1793$ м/с.

Наступним етапом експериментів було вимірювання тиску, який детонуючий хвилевод передає в камеру розгалужувача. Тиск вимірювався за допомогою датчика тиску, сигнал від якого виводився на екран осцилографа С 9-8. Датчик тиску встановлювався в торці хвилеводу, протилежному електровибухові. Датчик установлювався перпендикулярно осі хвилеводу так, що між торцями й мембраною датчика могло пройти лезо безпечної бритви (0,08 мм). Тарування датчика тиску виконувалося на ударній трубці за раніше описаною методикою. Чутливість датчика тиску під час тарування в ударній трубці становила $P = 2,429$ В/МПа. П'єзодатчики й датчик тиску встановлювалися на випробуваному хвилеводі, як показано на рис. 3.

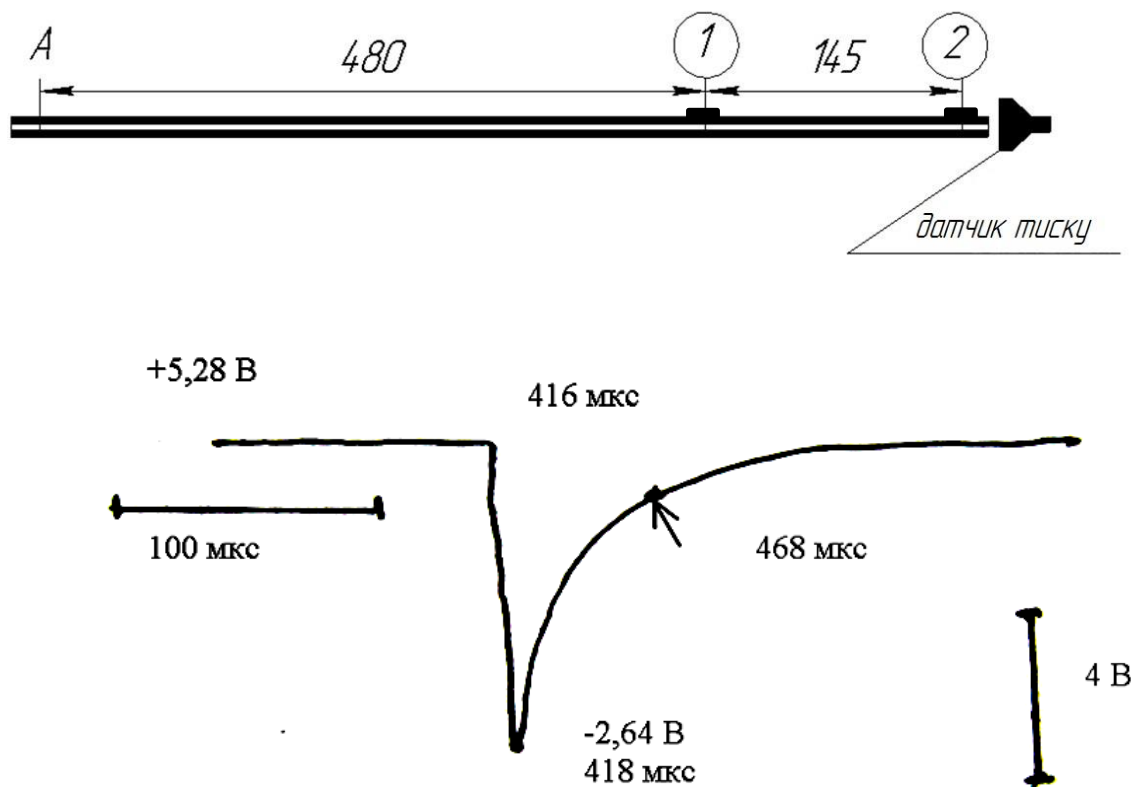


Рис. 3 Схема розташування п'єзодатчиків та датчика тиску і осцилограма тиску

Швидкість детонаційної хвилі вимірювалася за допомогою датчиків 1 і 2, показання яких виводилися на осцилограф С 9-16. Показання датчика тиску фіксувалися за допомогою осцилографа С 9-8 і зображені на рис. 3.

Як видно з осцилограми, наростання ударного фронту до максимального значення відбувається за 2 мкс. Тиск у відбитій хвилі на торці хвилеводу дорівнює:

$$\frac{5,28\text{В} + 2,64\text{В}}{2,429\text{В/МПа}} = 3,26\text{МПа}.$$

Час спадання тиску у відбитій хвилі в «е» раз вирахуємо таким чином: $7,92B/2,7 = 2,9 B$, що на осцилограмі відповідає точці для 489 мкс. Отже, тривалість хвилі тиску дорівнює $468 - 416 = 52$ мкс.

Усереднена швидкість детонації на ділянці між 1 і 2 датчиком дорівнювала 1700 м/с. Це свідчить про те, що детонаційна хвиля поширилася каналом трубки.

Зазначимо, що швидкість поширення збурювань від електророзряду у відпрацьованому хвилеводі дорівнює 1200 м/с.

У процесі виробництва хвилеводу можлива ситуація короткочасного збою процесу дозування або підвищення продуктивності екструдера. У такій ситуації можуть утворюватися місця з малою кількістю детонуючого складу, який напильється на внутрішню поверхню оболонки хвилеводу.

Тому виникає питання, на яку максимальну відстань може передаватися детонація у випадку відсутності напильнення ДС на певній ділянці трубки хвилеводу, і навіть у випадку зниження кількості нанесеного складу. Дослідження, виконані на відстріляних раніше хвилеводах при 10-тикратному повторенні експериментів підтвердили, що максимальна довжина трубки без напильнення, через яку детонація передається, дорівнює 20 см для вітчизняного хвилеводу, і 22 см для хвилеводу фірми «Діно Нобель».

Отже, зрозуміло, що передача детонації відбувається на досить велику відстань. У результаті цього виникло питання, чи може один відрізок хвилеводу передати детонацію через пасивний розгалужувач (рис. 4) двом або більше відрізкам хвилеводу. Виконано дослідження розвитку імпульсу тиску, починаючи з входу в розгалужувач – трійник.

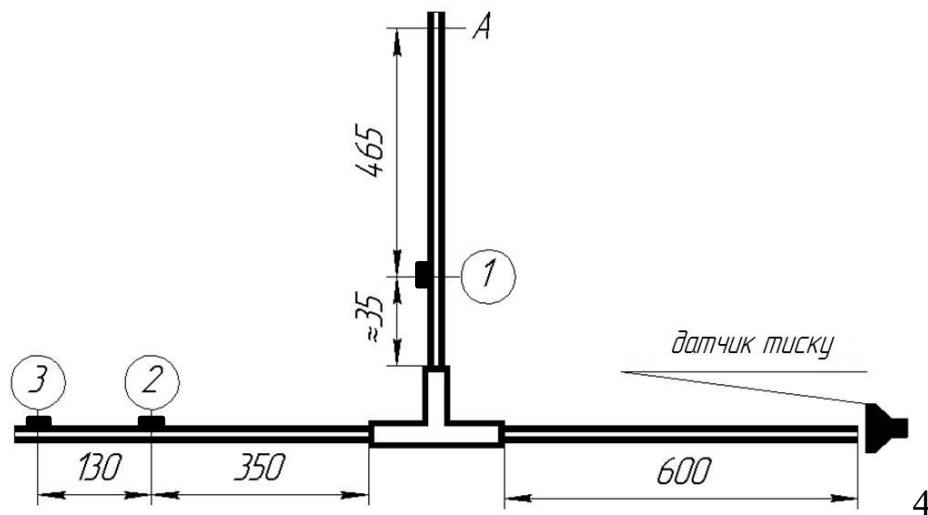


Рис. 4. Схема розміщення датчиків при експериментах з розгалужувачем. 1, 2, 3 – п'єзодатчики, 4 – датчик тиску

Після електровибуху в т. А детонація поширювалася трьома трубками хвилеводу. Перший промінь осцилографа записував показання датчика тиску, а другий – сигнал від п'єзодатчика. На верхній промінь осцилографа подавався сигнал від датчика 2, а на нижній – від датчика 3.

Відповідно до запису датчика тиску, встановленого в торці правого відгалуження, максимальний тиск у хвилі становив 6,5 МПа.

Під час дослідженні процесу передачі детонації в системі хвилеводів за допомогою недетонуючого потрійного розгалужувача встановлено, що процес

детонації формується одночасно в правій і лівій частинах розгалужувача, трохи вповільнюючись на розгалужувачі (до ~ 1200 м/с), і далі у відгалуженнях швидкість процесу встановлюється на середньому рівні ~ 1800 м/с. У ході експериментів встановлено, що під час виготовлення комутаційних блоків – розгалужувачів із різних матеріалів (гуми, міді, сталі, алюмінію, оргскла, полістиролу, ПВХ і фторопласту) вітчизняний хвилевід стабільно передає детонацію за допомогою незаповненого ВР відрізка порожнини сполучного пристрою на відстань не більше 150 мм.

Випробування демонструють, що пристрій дозволяє безвідмовно передавати детонацію в 4 відрізки хвилеводу.

Грунтуючись на експериментах, можна зробити висновок, що такі завдання, як ініціювання розосереджених зарядів, а також виключення підбивання хвилеводу можуть бути вирішені застосуванням безкапсульних комутаційних блоків, які також дають помітне скорочення витрат хвилеводу, особливо в умовах застосування техніки розосередження свердловинних зарядів.

Щодо міцності оболонки хвилеводу і якості напилення ВР на внутрішню поверхню поліетиленової трубки, їх досить високий рівень підтверджується стабільністю отриманих у серії дослідів детонаційних параметрів хвилеводу. Однак порівняно з відомими досліджені зразки хвилеводу характеризуються більш низькою швидкістю детонації. Це пояснюється крупністю часточок напиленої ВР, а також їх формою, які разом суттєво впливають на рівень і стабільність швидкості детонаційного процесу в каналі ДХ. Можна стверджувати, що найбільш раціональна форма часток, які за можливості варто впроваджувати для спорядження ДХ, має бути близькою до сферичної. Це раціонально і з точки зору механізму та стабільності закріплення напилюваних часток на внутрішній поверхні хвилеводу, і з точки зору надійності їх струшування під дією поперечної пружної хвилі, і в аспекті рівномірності розподілу часток ВР у пилоповітряній суміші. Для цього в роботі виконано відповідні дослідження щодо добору енергетично ефективних складів напилюваної ВР, а також розроблено відповідну технологію сфероїдизації кристалів обраної ВР в промисловому масштабі.

У результаті сфероїдизації отримано кристали модифікованого октогену, вилученого з полімерної матриці ТРП, із заданими характеристиками (густина – $1,89$ г/см³, форма кристалів близька до сферичної).

Четвертий розділ присвячено розробці сумішевого складу і конструкції проміжного детонатора на основі вихідних матеріалів, які окремо не є вибуховими речовинами, з метою впровадження в практику БВР техніки безпечного виготовлення бойовиків на місці відкритих гірничих робіт, що є актуальним з економічних і екологічних міркувань. Традиційні промислові вибухові речовини, що застосовуються для виготовлення ПД, у своєму складі містять нітрсполуки. Хоча вони досі широко використовуються, все більше уваги приділяється суттєвим недолікам, які мають більшість з цих ВР. Зокрема, їх виробництво в більшості випадків базується на використанні високоенергоємних процесів із додатковими викидами шкідливих речовин, а також з виділенням шкідливих газів та твердих часток, забрудненням повітря і ґрунтових вод; традиційні вибухові речовини, що використовуються в гірництві, чутливі до ударів і тепла, що робить їх потенційно небезпечними для транспортування і використання. Перспективним напрямком у

цій галузі є розробка вибухових речовин на основі концентрованих розчинів пероксиду водню та гліцерину. Актуальність напрямку пов'язана з такими позитивними рисами суміші, як безпека, екологічність у зв'язку зі зменшенням шкідливих виділень, можливість адаптування композиції до конкретних вимог щодо контролю потужності, швидкості детонації та інших характеристик ВР; зниження витрат на транспортування завдяки нечутливості до зовнішніх впливів; короткий термін придатності, потреба в спеціальних знаннях, обладнанні та контрольованих умовах, що зменшує ризики потрапляння до осіб з негативними намірами. З огляду на вказане вище подальші дослідження та розробки в цій галузі можуть призвести до інновацій у вибухонебезпечних технологіях, що призведе до більш безпечних, ефективних і екологічних методів видобутку корисних копалин.

У лабораторних умовах виконано термогравіметричні дослідження розкладання вибухових сумішей на основі пероксиду водню та гліцерину з використанням додаткових окиснювачів, а саме нітратів кальцію, калію, натрію. Термогравіметричні дослідження проводили за допомогою дериватографа Thermoscan-2 для зразків 200 мг, використовуючи швидкість нагрівання 10 °C/хв для всіх зразків. Випробування проводили у повітряному середовищі у всіх випадках. Вивчався також вплив на процес термічного розкладання сенсibiliзуючої домішки – скляних мікросфер, які в досліді показали значний вплив на процеси розкладання. Рецептури досліджуваних зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Склади досліджуваних у роботі зразків вибухових композицій на основі перекису водню + гліцерин, наведено у мас. %.

Компонент	1А	1В	2А	2В	3А	3В
Нітрат натрію	-	-	-	-	9.9	9.9
Нітрат калію	-	-	9.9	9.9	-	-
Нітрат кальцію тетрагідрат	9.9	9.9	-	-	-	-
Гуаргам	4	4	4	4	4	4
Перекис водню	71	71	71	71	71	71
Гліцерин	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1
Мікросфери	1	-	1	-	1	-

Склад кожної рецептури є сумою часток компонентів, перелічених у відповідній колонці. Мікросфери додано понад 100 %.

Результати досліджень та розрахунків енергії активації термоокисної деструкції свідчать, що вибуховий склад «перекис водню + гліцерин + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ » є найбільш безпечним у використанні, оскільки має найбільше значення енергії активації термоокисної деструкції 7,01 kJ/mol порівняно з двома іншими композиціями.

Зразки даних термічного розкладу, отримані методом термогравіметричного аналізу (ТГА), наведено для сумішей на основі перекису водню, гліцерину, (нітрату натрію 1 або нітрату калію 2 або нітрату кальцію 3), гуаргаму з додаванням мікросфер А та без додавання мікросфер В на рис. 5.

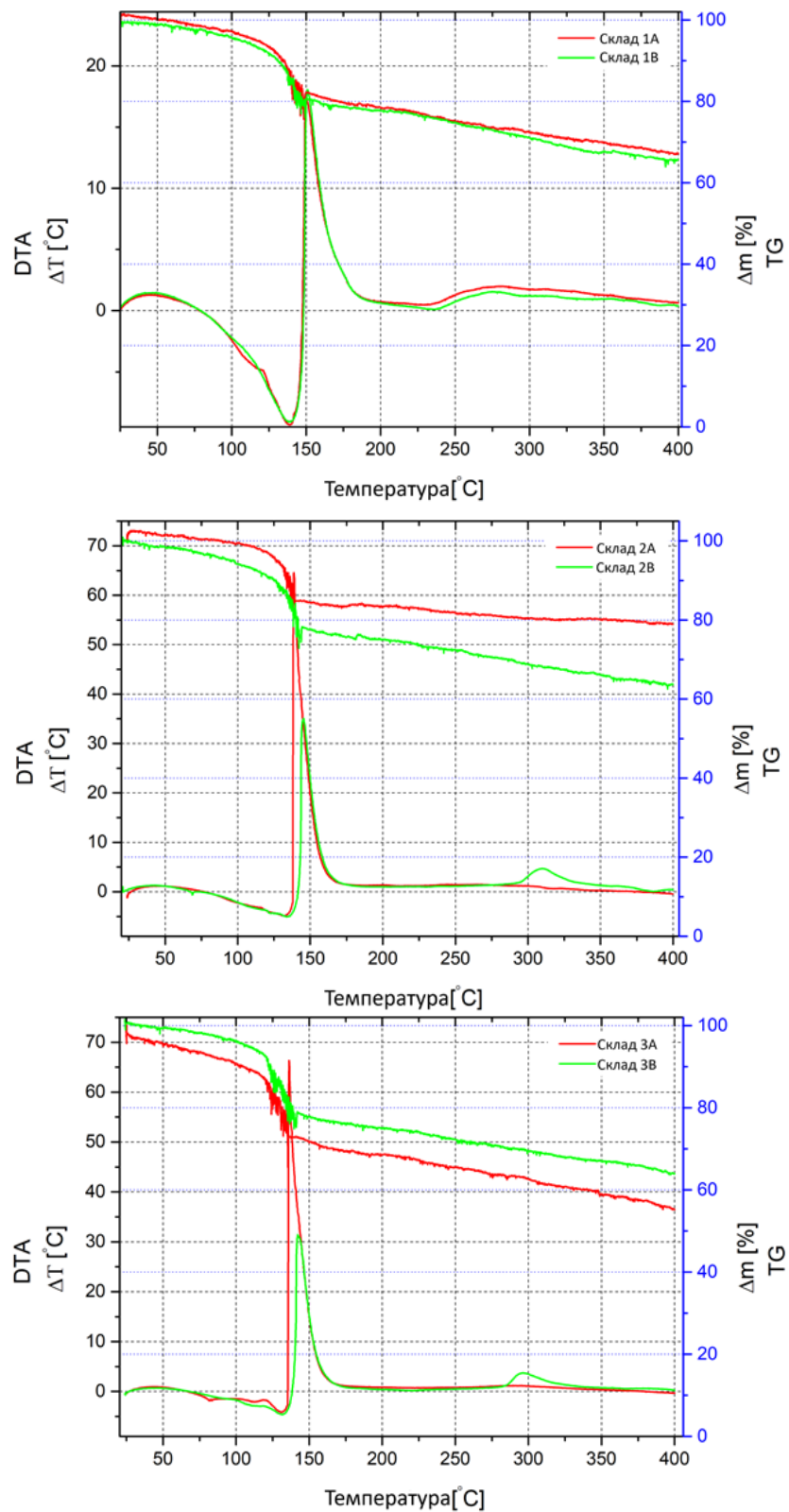


Рис. 5. Термограми розкладання композицій 1А, 1В, 2А, 2В, 3А, 3В

Для порівняння з композицією на основі перекису водню та гліцерину з домішками було розроблено альтернативну вибухову композицію на основі аміачної селітри та нітрометану. Термодинамічні характеристики композиції на основі аміачної селітри та нітрометану наведено на рис. 6.

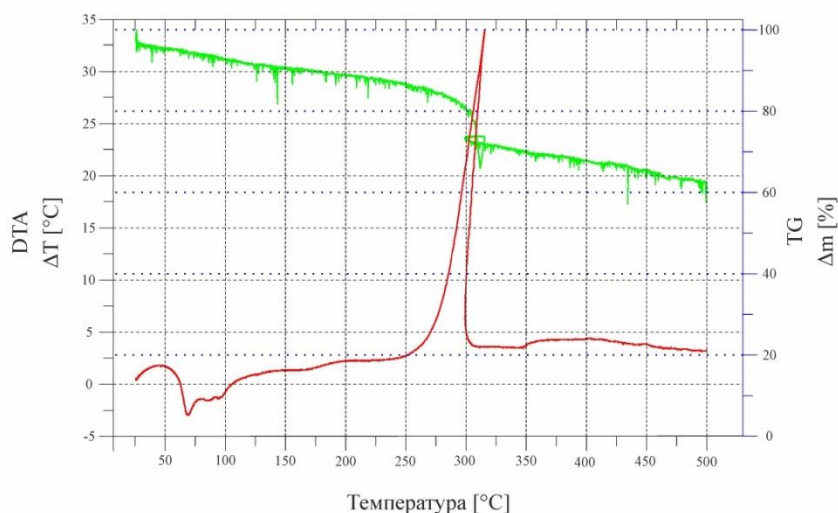


Рис. 6. Термограма розкладання композицій аміачної селітри з нітрометаном

З метою визначення найбільш ефективного за енергетичними характеристиками детонуючого складу для проміжного детонатора (бойовика) з досліджених у лабораторії, проведено розрахунки енергії Гіббса для найбільш перспективних вибухових композицій.

Енергія Гіббса (або ізобарно-ізотермічний потенціал) – це величина, зміна якої у ході хімічної реакції дорівнює зміні внутрішньої енергії. Енергія Гіббса показує, яка частина від повної внутрішньої енергії системи може бути використана для хімічних перетворень або отримана у результаті в заданих умовах (у даному випадку під час вибуху досліджуваної суміші на основі перекису водню та гліцерину) і дозволяє встановити принципову можливість протікання хімічної реакції в цих умовах. Енергію Гіббса можна розуміти як повну потенційну хімічну енергію системи (кристалу, рідини тощо).

Графік залежності енергії Гіббса від температури свідчить про зміну напрямку реакції складу 7 при 6910 °C, тоді як для вибухових композицій на основі перекису водню і гліцерину. Це означає, що хімічний потенціал вибухової суміші аміачної селітри та нітрометану найвищий серед усіх розглянутих у роботі. Це робить проміжні детонатори на її основі найбільш перспективними.

У роботі виконано експериментальні дослідження впливу форми проміжних детонаторів (бойовиків) на їх ініціюючу здатність у свердловинному заряді. Зосереджені заряди на гірничих роботах переважно використовуються у вигляді або як проміжного бойовика в основному свердловинному заряді, або як самостійні заряди при вторинних вибухових роботах. Водночас їх геометричні параметри, детонаційні характеристики і характер просторового розподілу енергії, що випромінюється таким зарядом, враховуються мінімально або ігноруються. Враховуючи, що продукти вибуху (ПВ), які виконують механічну роботу, розлітаються по нормалі до поверхні заряду, побудовано теорію кумуляції, тобто фокусування потоку ПВ для підсилення пробивної дії заряду. Відповідно варто очікувати, що будь-яка зміна форми заряду призведе до зміни форми силового поля. Згідно з цим припущенням розглянуто можливість підвищення ефективності застосування бойовика у формі усіченого конуса. Досліджувалися конструкції

бойовика з кутом конусності від 15° до 45° з переходом у циліндричну форму в усіченій частині бойовика.

У конічному заряді при ініціюванні з широкої торцевої частини детонаційна хвиля поширюється перпендикулярно до бічних твірних конуса, тобто її напрямок практично перпендикулярний похилій бічній поверхні конуса бойовика. Це створює спрямоване поле напружень на кутову зону в дні свердловини. Силкові лінії детонаційної хвилі, звужуючись від кута конуса бойовика, охоплюють весь стовпчик заряду, що підривається, обмеженого стінкою свердловини. Це дозволяє сконцентрувати імпульс детонаційної хвилі проміжного детонатора по всьому перерізу свердловинного заряду вздовж осі. При збільшенні кута конусності діаметр потоку ПВ наближається до діаметра ініційованої вибухової речовини свердловинного заряду, що сприяє ініціюванню всього діаметра заряду. Детонаційний фронт, фокусуючись вздовж осі ПД та пристінкового заряду, охоплює всю його площу і подібно до силових ліній кумулятивного заряду створює підвищений тиск. Таким чином, вся енергія ініціюючого вибухової речовини переходить у робоче тіло заряду ВР і не виходить за його межі.

При випробуваннях конусних зарядів на металевих пластинах встановлено, що хвиля детонації залишає вм'ятину шириною приблизно рівною нижній циліндричній частині конічного ПД, що знаходиться у безпосередньому контакті з пластиною. Навколо цієї вм'ятини спостерігається додаткове пошкодження пластини, співмірне з діаметром широкої конусної частини ПД, (тиск передається повітряним шляхом). Таким чином, конструкція проміжного детонатора забезпечує підвищену ініціюючу енергію при вибуху вздовж осі свердловинного заряду.

Для підтвердження цього висновку проведено випробування заряду 79/21 грануліту насипної щільності діаметром 80 мм і довжиною 600 мм. Заряди ініціювали електродетонатором ЕД-8 спільно з проміжними детонаторами: штатним ТГ-400Г і конусним ПД з кутом конусності 25° і масою 200 г. Вимірювання швидкості детонації здійснювали методом Дотріша на відстані 100 мм від ПД і на відстані 500 мм від ПД. База виміру у всіх випадках становила 120 мм. Під час застосування штатного ПД Т-400Г зі швидкістю детонації 5,8 м/с ініціювання відбувалося у режимі перестисненої детонації (швидкість детонації грануліту 79/21 насипної щільності 3,75 км/с).

При застосуванні конусного ПД як ініціювальний заряд було використано склад на основі аміачної селітри з нітрометаном у співвідношенні 85:15. Швидкість детонації конусного заряду ПД складу «аміачна селітра – нітрометан» у співвідношенні 85:15 становить до 2985 м/с. Отже, ініціювання заряду грануліту 79/21 конічним ПД відбувається в режимі недотислої детонації. Суміші АС-НМ мають високу чутливість до ініціюючого імпульсу, що пов'язано з невисоким значенням критичного діаметра детонації. Діаметр широкої конусної частини заряду ПД підібрано 80 мм, що забезпечило кут конусності 25° і рівність діаметрів ПД та заряду, що ініціюється. Рівність діаметрів ПД і заряду дозволить забезпечити стійку швидкість детонації заряду, що ініціюється, на мінімальній відстані від точки ініціювання. Результати випробувань зображено на графіку рис. 7.

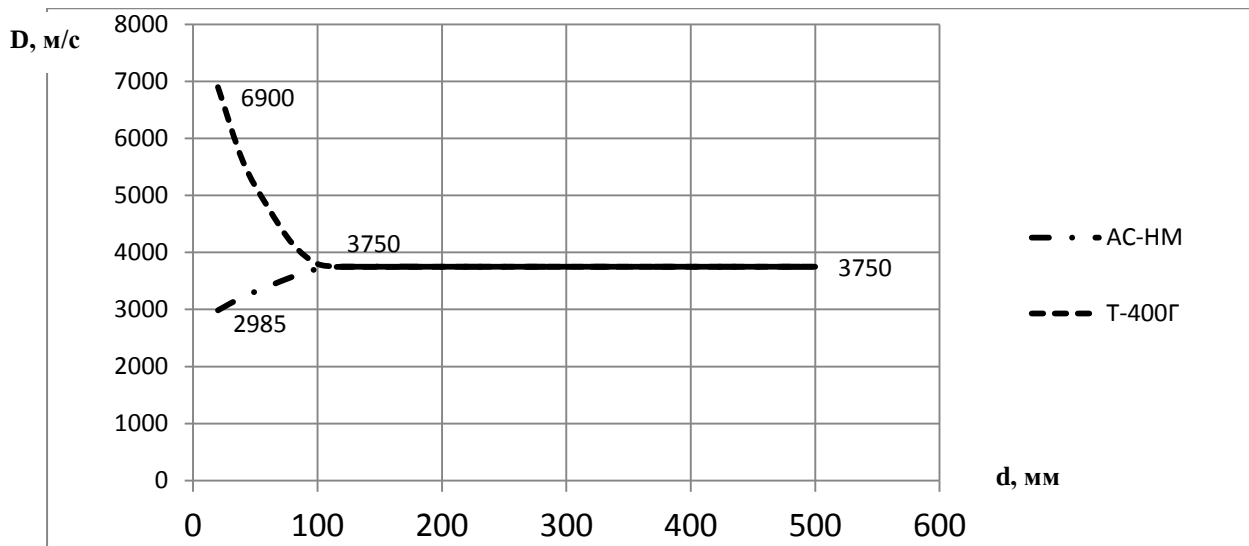


Рис. 7. Вплив форми ПД на стійкість швидкості детонації грануліту 79/21 залежно від ініціатора різного типу : 1 – шашка Т-400Г; 2 – ПД конічної форми масою 200 г.

З графіка видно, що при ініціюванні заряду зерногрануліту 79/21 як потужним ПД шашкою Т-400Г (в режимі перестисненої детонації), так і конічним ПД низької потужності (масою 200 г в режимі недостиглої детонації) вихід на стаціонарну швидкість детонації отримано практично на однаковій відстані від точки ініціювання. Це ще раз підтверджує, що конічний заряд ПД при спрацьовуванні забезпечує підвищений тиск продуктів детонації вздовж осі ініційованого заряду, а відповідно і підвищену ініціюючу здатність. Як наслідок, при використанні ПД конічної форми величина «розгону» до стійкої детонації заряду не змінена, водночас заряд ініціюється ПД масою меншою, ніж при ПД циліндричної форми.

Аміачна селітра не є вибуховою речовиною і застосовується в якості добрива у сільському господарстві. Нітрометан CH_3NO_2 , у чистому вигляді має досить великий критичний діаметр та низьку чутливість до детонації. Нітрометан не є легкозаймистою речовиною, він нечутливий до капсуля-детонатора № 8. Використовується в промисловості як домішка до автомобільних палив з метою підвищення їх енергетичних характеристик (октанового числа), або як паливо в авіамоделльному спорті.

Вибуховий склад для конічних ПД із цих невибухових компонентів пропонується виготовляти безпосередньо на місцях проведення вибухових робіт, тобто на прикар'єрних пунктах. Основною характеристикою такого складу є те, що його компоненти – аміачна селітра та нітрометан окремо не є вибуховими речовинами і лише при змішуванні цих компонентів отримується склад із вибуховими характеристиками. Тому пропонується перевозити невибухові компоненти – аміачну селітру та нітрометан окремо на місця проведення вибухових робіт і на прикар'єрному пункті проводити змішування та засипання у завчасно підготовлені конічні ємності необхідного об'єму та конусності. Це дозволить виключити перевезення вибухових композицій від підприємства – виробника спеціальним транспортом по території країни, що пов'язано з небезпекою для населення, погодження маршруту з правоохоронними організаціями та охорону

небезпечного вантажу і зменшити кількість складських приміщень, що охороняються, на прикар'єрних пунктах.

Розділ 5 присвячено дослідженням у роботах, пов'язаних зі створенням прогресивних вітчизняних промислових речовин як об'єкта прикладання низькодетонаційних засобів їх ініціювання. Дослідження виконувалися в розробці вітчизняних аналогів сучасної емульсійної вибухової речовини в частині досягнення високої фізичної стабільності, підвищеної вибухової здатності, низької токсичності, широкого діапазону умов використання з доступністю сировини та високою безпекою виготовлення і застосування. Дослідження спрямовані на вдосконалення рецептури вітчизняної ЕВР Емульхім-ШМ. Автором спільно з азербайджанськими колегами розроблено ЕВР «Азнітро», яке було запатентовано в Україні та впроваджено у виробництво в Республіці Азербайджан, де розробка може бути використана для вибухових робіт у гірничій інженерії для видобування низки корисних копалин.

В основу розробки було поставлено завдання опрацювати емульсійний вибуховий склад, у якому заміна складових компонентів дозволила б забезпечити підвищення стабільності при тривалому зберіганні. Розроблена ЕВР «Азнітро» вміщує аміачну селітру, індустріальну олію та воду, за складом відрізняється тим, що додатково містить оцтову кислоту, дизельне паливо, газогенеруючу домішку, емульгатор. В якості емульгатора використовується лубризол, який є поверхнево-активною речовиною з амінними і кисневмісними функціональними групами. Виготовлені дослідні зразки емульсійної вибухової речовини («Азнітро» № 1, № 2, № 3) з різним вмістом компонентів у масових відсотках стали основою для трьох можливих типів ЕВР (табл. 2).

Таблиця 2. Вміст компонентів ЕВР «Азнітро»

Назва компонента	Вміст компонентів, %		
	Азнітро № 1	Азнітро № 2	Азнітро № 3
Селітра аміачна	79,92	82,26	84,52
Оцтова кислота	0,23	0,20	0,17
Вода	12,23	10,70	9,17
Емульгатор (лубризол)	1,60	1,40	1,20
Масло індустріальне	4,70	4,13	3,54
Дизельне паливо	1,20	1,20	1,20
Газогенеруючий розчин	0,12	0,11	0,2

Визначено характеристики стабільності заявленої ЕВР і вибухові характеристики (повноту детонації та критичний діаметр детонації).

Стабільність ЕВР оцінювали за відсутністю викристалізації аміачної селітри або розшарування компонентів (за збереження консистенції) після встановленого терміну зберігання. Розроблена ЕВР зберігала свою стабільність впродовж місяця.

Розрахунок графіка зміни енергії Гіббса залежно від температури для ЕВР «Азнітро» свідчить, що за температури 2015 К відбувається зміна знаку енергії

Гіббса. Це означає, що розроблена ЕВР має достатньо стабільні вибухові характеристики та високу потужність.

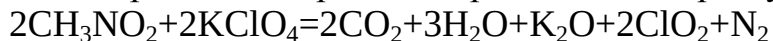
Враховуючи доступність і дешевизну сировини, відсутність у складі ЕВР індивідуальних вибухових речовин, ліквідацію проблеми перевезення та зберігання небезпечних речовин, можливості механізації процесу виробництва ЕВР з регульованими характеристиками та зарядних робіт, у комплексі з низькошвидкісними ініціюючими засобами розроблена ЕВР здатна задовольнити потреби гірництва.

Виконана оцінка ступеня ризику роботи з ЕВР із урахуванням низки факторів (перевезення, завантаження, заряджання емульсії ЕВР), – здатних призвести до смертельних наслідків, поширюється лише по території підприємства або кар'єру і не торкається об'єктів «турботи» суспільства. Соціальний ризик від аварії цього типу ВР дорівнює нулю.

У розділі 6 описуються результати виконаних автором досліджень, спрямованих на створення вітчизняного аналога системи ощадливого відділення блоків декоративного каменю шпуровим методом, в основу якої покладено технологію низькодетонаційних режимів К-зарядів. У переважній більшості застосовуваних динамічних методів проблемою стає не лише вирішення питання оптимізації параметрів робочого імпульсу в шпурі в «м'якому» режимі впливу на оточуючий масив, а й процес виготовлення і транспортування усіх засобів висадження. У дослідженні поставлено завдання, спрямоване на створення гетерогенної вибухової системи, яка гарантує стійкий низькошвидкісний детонаційний режим динамічного навантаження середовища вибухом і забезпечує в площині шпурових зарядів достатні відривні напруження без порушень структури відділюваного кам'яного блока. Система базується на відмові від традиційних у вибуховому складі небезпечних за транспортуванням і технологічним виготовленням та сенсibilізуючих ВР – нітроефірів через їх заміну безпечними компонентами – дизельним паливом або нітрометаном в якості пального і перхлорату калію в якості окисника, а також оксиду марганцю (IV), як каталізатора термічного розкладання.

Досліджувані склади (табл. 3) мають невисокі значення температури вибуху і теплоти вибуху і незначний об'єм газоподібних продуктів. До того ж, дослідно встановлено, що розроблені К-заряди надійно спрацьовують від штатних засобів ініціювання – електродетонаторів ЕД-8 і детонуючого шнура ДШЕ-12.

Розрахунок енергії Гіббса для складу нітрометану та перхлорату калію проведено за реакцією термічного розкладання при нульовому кисневому балансі:



Графік зміни енергії Гіббса для композиції перхлорату калію з нітрометаном свідчить про зміну напрямку реакції вибухового складу перхлорату калію та нітрометану при 5890 °С. Це достатньо високий показник, який значно перевищує стандартні енергії Гіббса для штатних промислових ВР і свідчить про можливість використання суміші для складних вибухових пристроїв типу К-труб, і навіть для проміжних детонаторів.

Враховуючи прийнятний рівень енергетичних та детонаційних параметрів складу ПХК + НМ, наведених в табл. 3, та його низьку чутливість до механічної дії, ця вибухова композиція може успішно конкурувати з традиційною в якості К-зарядів для відбивання блочного каменю.

Таблиця 3. Фізико-хімічні і термодинамічні характеристики складу на основі перхлорату калію (ПХК)

Характеристика	Параметри	
	Сумішева ВР ₃ дизпаливом (ПХК+ДП)	Сумішева ВР ₃ нітрометаном (ПХК+НМ)
Кисневий баланс, %	+25,67	+37,7
Теплота вибуху, кДж/кг	2165,8	858,1
Температура вибуху, К	2003,65	1523
Об'єм газів, л/кг	334,4	374
Щільність складу, г/см ³	0,99–1,02	1,05–1,10
Фугасність, мл	85	95
Тротиловий еквівалент	0,51	0,55
Критичний діаметр детонації, мм	5–19	10–12
Швидкість детонації, км/с	1,8–2,1	1,0–1,55

З метою підвищення енергетичної стабільності кристалів перхлоратів у вибухових сумішах, надання їм раціональної монодисперсної сфероїдальної форми для поліпшення насипної щільності за рахунок рівномірного розміщення кристалічного порошку в К-патроні. Внаслідок цього забезпечується мінімальне значення критичного діаметра сумішей, необхідне для застосування в шпурових К-зарядах.

Технічне завдання отримання сферичних кристалів ізогідричним методом полягало у розробці технології отримання тонкодисперсних кристалів перхлоратів для вибухової галузі гірництва та хімічної промисловості. Технічний результат полягає в змінах у структурному перетворенні в процесі кристалізації, що надає можливість отримувати округлі кристали заданих розмірів та форми в кількості не менше 90 % від маси кристалізованої речовини.

За результатами проведених досліджень запропоновано спосіб, який полягає у розчиненні вхідної сировини та кристалізації сферичних кристалів ізогідричним методом із розчину з використанням трьох зон кристалізації, що доповнюють одна одну і мають різні закони переміщення маси водної суспензії під дією декількох фізичних сил за рахунок керованого зазору між мішалкою і днищем апарату кристалізатора-модифікатора (КМ). Процес кристалізації в КМ полягає у створенні кількох зон кристалізації, мають різні закони переміщення маси водної суспензії, які послідовно створюють при обертанні ротора мішалки значну відцентрову силу. Під дією цієї сили потік суспензії спіралеподібно розтікається вгору по стінкам обичайки. Вектор руху потоку спрямовується вгору. Градієнти векторів швидкостей потоку спрямовуються як уздовж спіралі, так і перпендикулярно їй, що сприяє безперервному різнобічному обертанню кристалів у другій навколостінній зоні кристалізації. За рахунок незначної товщини (кілька міліметрів) спіралеподібного потоку дію сили тертя обмежено товщиною потоку, а відцентрова сила, яка долає силу тяжіння, є рушієм процесу. В результаті фактично різносторонній режим обертання кристалів речовини сприяє округленню багатограних кристалів за рахунок їх обертання в різних площинах. У третій зоні кристалізації завдяки

відсікачам, розташованим по нормалі відносно відцентрового потоку, він змінює закон свого руху, спрямовується нормально (строго вниз) в напрямку донної мішалки. Суспензія потрапляє в отвір роторної мішалки в дезорієнтованому вигляді та цикл повторюється, сприяючи округленню гранул кристалів до сферичної форми.

Спосіб отримання сферичних кристалів високоенергетичних матеріалів у кристалізаторі-модифікаторі апробований у лабораторних умовах для отримання сферичних кристалів перхлорату калію (рис. 8).

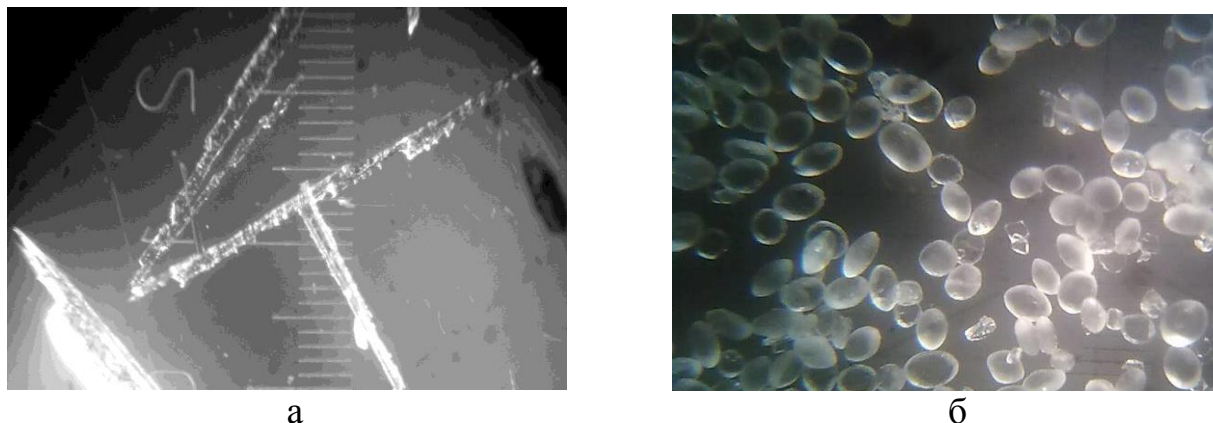


Рис. 8. Кристали перхлорату калію, отримані природним шляхом (а) і в кристалізаторі-модифікаторі (б).

Експерименти зі встановлення вибухових характеристик сумішей на основі перхлорату калію виконано в полігонних умовах (табл. 4).

Таблиця 4. Експериментальні вибухові характеристики складу ПХК + НМ

Найменування компонентів	Номер і склад зразків		
	1	2	3
ПХК з домішкою 0,5 % MnO_2	95	90	85
Нітрометан	5	10	15
Експериментальні характеристики			
Критичний діаметр детонації, мм	27	12	3-5
Швидкість детонації, м/с	~1000	1300	1550
Повнота детонації	повна	повна	повна

З наведених даних є підстави стверджувати, що за базовими детонаційними характеристиками суміші 2 і 3 придатні для застосування в шпурових зарядах, водночас суміш 3 має пріоритет при доборі композиції, оскільки саме ця композиція відрізняється мінімальним критичним діаметром, тобто підвищеною чутливістю на стадії ініціювання.

За теплою вибуху, швидкістю детонації і об'ємом газів розроблені заряди знаходяться на рівні кращих світових зразків, наприклад, «К-труб» фінського виробництва, які мають великий попит у Європі.

До того ж, заряди надійно спрацьовують від штатних засобів ініціювання – електродетонатора ЕД-8 і детонуючого шнура ДШЕ-12. Враховуючи це і низьку чутливість до механічних дій, розроблені заряди можуть застосовуватися в якості засобів відбивання блочного каменю.

У розділі 7 наведено матеріали, пов'язані з прикладними аспектами реалізації результатів дисертаційних досліджень у гірничій практиці.

Удосконалення вибухових технологій і розробка нових у гірництві, будівельній галузі, геоінженерії, при виконанні робіт спеціального призначення значною мірою базується на застосуванні енергії вибуху з метою відділення великих мас чи окремих блоків від масиву, руйнування гірських порід для подальшої переробки відбитої гірської маси, виконання масових земляних робіт в шляховому, меліоративному, гідротехнічному будівництві, ущільненні структурно нестійких ґрунтів для утворення в стисливих ґрунтах камуфлетних порожнин спеціального призначення потребує адекватного прогнозування зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів і відповідного кінцевого результату деформування вибухом середовища з урахуванням низки специфічних явищ. Ці явища притаманні розвитку механічного ефекту вибуху в будь-якому середовищі – скельному, ґрунтовому, водному, газовому та ін. Вони пов'язані не лише зі стадією зародження і зіткнення фронту потужної ударної хвилі з певною ділянкою середовища, а й з наступним протяжним у часі періодом післядії, в якому більше або менше місце займає квазістатична стадія розширення газових продуктів вибуху і подальші деформаційні явища. В розвитку цього процесу пріоритет належить останній стадії, під час якої проявляються реологічні властивості середовища. На першому плані стають неоднозначні деформаційні перетворення в середовищі як реакція середовища на динамічне збурення.

Дослідження закономірностей формування поля напружень з урахуванням крайових явищ виконані шляхом експериментальних вимірів параметрів хвиль напружень.

Торцеві ділянки вертикального заряду свердловин займають вагоме місце у формуванні силового і деформаційного поля при масовому вибуху. Чим коротший подовжений заряд (при постійному діаметрі), тим більше втрачається енергії вибуху через зміну симетрії поля з циліндричної на сферичну.

Ці міркування підтверджуються даними безпосередніх експериментів за записами хвилі напружень (ХВН) під час вибуху в лесоподібному суглинку циліндричного заряду амоніту ПЖВ масою 1 кг/м і довжиною 1,5 м. Тензодатчики в експериментах встановлювалися паралельно осі заряду на лінії, яка розташована на відстані від осі заряду на 0,62 м. Обробка експериментальних результатів дозволила встановити реальну картину розвитку силового поля поблизу торця циліндричного заряду.

На рис. 9 для заряду довжиною 1,5 м, ініційованого з лівого торця, наведено сімейство ізоліній поля напружень у фіксовані моменти часу після вибуху в межах 0...25 Мс.

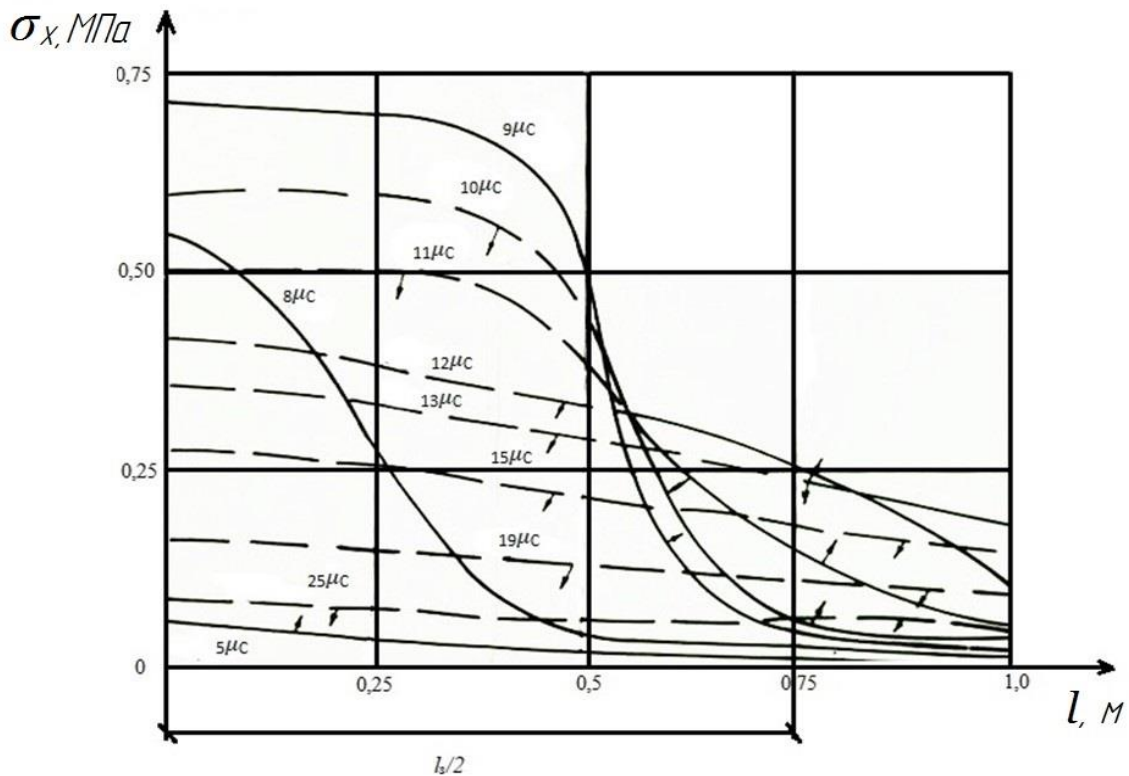


Рис. 9. Динаміка розвитку поля напружень під час вибуху циліндричного заряду у фіксовані моменти часу (в мілісекундах)

Поле напружень у просторі і часі побудовано відносно правої половини заряду. Аналіз цих даних свідчить про те, що:

- умовна циліндричність поля напружень на відстані 0,62 м від осі заряду властива лише центральній половині заряду;

- з наближенням до торцевої частини подовженого заряду напруження різко знижуються, за такої умови час їх приходу та спад у часі відбуваються набагато повільніше порівняно з центральною частиною поля напружень. У центральній частині заряду максимум напруження припав на відстань від осі заряду 0,62 м за 9 мілісекунд (середня швидкість приходу максимуму напруження становила близько 70 м/с, що нормально для лесового ґрунту), тоді як проти лівого торця заряду максимальний імпульс досяг межі на 12-й мілісекунді (середня швидкість приходу становила лише орієнтовно 52 м/с);

- у проміжку 0,2...0,25 м перед торцем заряду розташована найбільш характерна область, де максимальні напруження з наближенням до торця заряду різко знижуються (практично втричі порівняно з максимумом в середній частині заряду);

- при швидкості детонації заряду $D = 3600$ м/с детонаційний фронт від п. $l = 0$ м (середина заряду) до п. $l = 0,75$ м на осі абсцис (правий торець заряду) проходить за 0,208 мілісекунди (208 мікросекунд), а помітні напруження в правому торці, співмірні з міцністю ґрунту ($\sigma_x = 0,25$ МПа), встановлюються лише через 11...12 мілісекунд і вище не піднімаються, переходячи у фазу розвантаження. Це означає, що в торцевій частині заряду максимальні напруження майже втричі менші порівняно з центральною частиною заряду (в п. $l = 0$ м). Таким чином, результати

експериментальних досліджень свідчать про значні енергетичні втрати в торцевій частині заряду, або про деградацію силового поля внаслідок зміни його симетрії.

Для компенсації енергетичних втрат на початковій стадії розвитку силового поля запобіжником виродження фронту хвилі напружень можливе збільшення торцевої частини свердловинного заряду в 1,5...1,7 рази. В якості раціонального способу керування енергетичним потоком в нижньому торці заряду запропоновано підсилення енергетики вибуху через застосування конічного проміжного ініціатора, розташованого в донній частині свердловини. Такий бойовик здатен виконати одночасно два завдання – збудженням у заряді стійкої детонації, а також створити умови для розвитку деформаційних процесів завдяки концентрації енергетичного потоку.

В полігонних умовах виконано дослідження впливу кута конусності на бризантні та фугасні властивості конічного бойовика. Досліджувалися суміші лускованого тринітротолуолу та сумішей тринітротолуол/нітрометан у співвідношенні 95/5, 90/10; 85/15; 80/20; 75/25 з кутом конусності від 15° до 45° . Для оцінки працездатності виготовляли по 3 конічні шашки з кожного складу та з кутом конусності 15° , 30° і 45° . Конічні шашки встановлювали усіченою та широкою частиною на металеву пластину-свідок, виконану зі сталі марки 15ХМ товщиною 5 мм. (рис. 10)



Рис. 10. Конічний проміжний детонатор (бойовик) на 5-тиміліметровій сталевій пластині-свідку

Бризантність конусних шашок вище при розміщенні на пластині-свідку широкою частиною та ініціюванні з вузької частини.

Дослідження фугасності (метальної дії) конічних шашок виконувалися шляхом підривання конічних шашок, заглиблених у ґрунт на їх висоту. Метальний ефект вибуху кожної шашки оцінювався за обсягом викинутого ґрунту, тобто за об'ємом воронки викидання.

З результатів досліджень видно, що збільшувати кут конусності конічних шашок понад 45° недоцільно, оскільки діаметр торцевої частини шашки при зазначеній конусності та при розумних габаритах вже становить понад 100 мм. Знижувати кут конусності нижче 30° також недоцільно, оскільки ефективність роботи шашок знижується.

Встановлено, що застосування конусних проміжних детонаторів із кутом конусності від 30° до 45° сприяє концентрації імпульсу хвилі детонації вздовж його

осі. Це дозволяє забезпечити кращу ініціюючу здатність, що підтверджено встановленням стійкої швидкості детонації свердловинних зарядів на незначній відстані від точки ініціювання. У цьому аспекті конусність компенсує залежність ініціюючої здатності ПД від його діаметра порівняно з циліндричним ПД, тобто конусність знижує цю залежність. Збільшення максимальної енергії ініціювання конічними ПД дозволить вибрати безпечні композиції, основною умовою яких є низькі значення критичного діаметра детонації, що забезпечує надійне «спрацьовування» від штатних ЕД.

Запропоновано такий склад на основі суміші подрібненої аміачної селітри з нітрометаном у співвідношенні 85–80 до 15–20. Склад має швидкість детонації 3,0–3,3 км/сек, критичний діаметр детонації 6–7 мм. Виготовлення вибухового складу пропонується проводити на місцях проведення підричних робіт шляхом змішування невибухових компонентів – аміачної селітри та нітрометану у наведеному співвідношенні. Встановлено, що при ініціюванні свердловинного заряду зерногрануліту 79/21 як потужним ПД шашкою Т-400Г, так і конічним ПД низької потужності (в режимі недостиглої детонації) вихід на стаціонарну швидкість детонації відбувається на однаковій відстані від ініціатора, що підтверджує, що конічний заряд ПД рекомендованого складу при масі меншій, ніж при ПД циліндричної форми, забезпечує стабільну ініціюючу здатність.

Підсилення заряду на рівні верхнього його торця обмежене через небезпеку посиленого розкидання окремих кусків, тому керування крайовим ефектом на рівні набійки можливе лише на основі взаємодії зарядів у групі. Аналізом літературних даних та власними інженерними розрахунками в межах популярних параметрів БВР встановлено, що деформація верхнього шару породи на рівні набійки відбувається послідовно протягом 4-х фаз: хвильової, камуфлетної, воронкоутворення та масових переміщень. Хвильова фаза практично охоплює весь обсяг верхнього породного шару. Однак через значні торцеві та дисипативні втрати енергії верхня половина цього шару піддається лише мікродеформаційним змінам, які створюють передруйнівний стан у породі. Камуфлетна фаза, що реалізується на контакті з торцем, позначена потужними пластичними руйнуваннями, але лише на контакті торця заряду з масивом породи. Фаза воронкоутворення охоплює лише частини масиву навколо набійки. Окремі воронки спущення над суміжними торцями повністю не перетинаються, залишаючи в проміжку між собою не зачеплену воронкоутворенням територію (рис. 11).

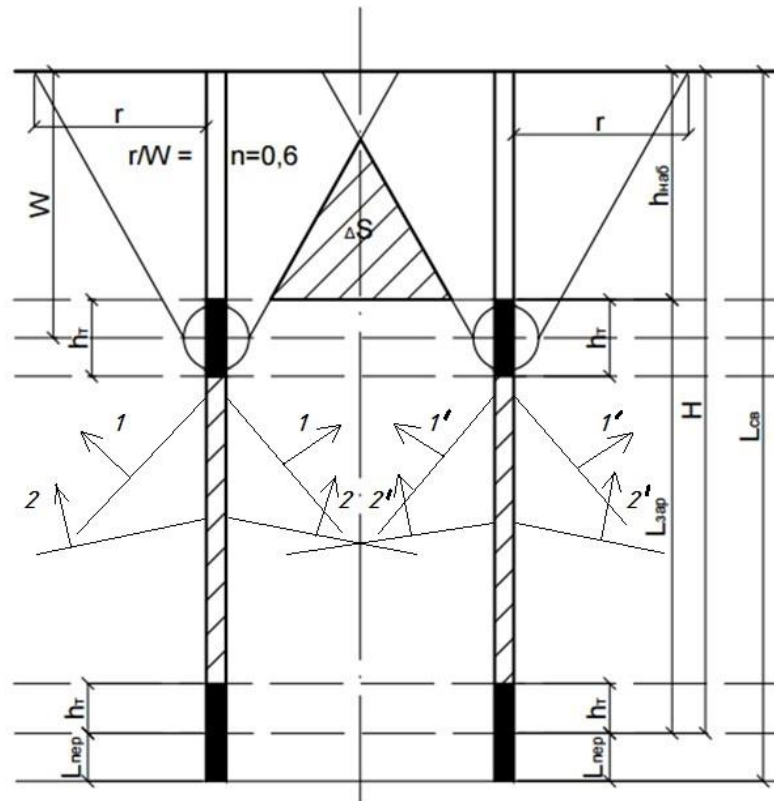


Рис. 11. Схема взаємодії суміжних свердловинних зарядів у верхньому торці:
1,1' – вектор фронту при $D = C$; 2,2' – вектор фронту 2,2' при $D \ll C$.

Аналіз розрахункових даних свідчить, що обсяг неруйнованої території масиву на рівні набійки між воронками спущення при вибуху двох суміжних свердловинних зарядів практично не залежить від висоти уступу, але максимально скорочується в абсолютному вимірі при зменшенні діаметра заряду до 10 мм при мережі зарядів 3x3 м та використанні низькошвидкісної промислової ВР типу ANFO.

Варто зауважити, що картина розвитку силового поля навколо свердловинного заряду більш складна порівняно з ідеалізованою, викладеною вище. В ідеальних теоретичних побудовах вважається, що детонаційний розклад подовженого заряду відбувається миттєво, тобто одночасно по всій довжині. За цієї умови фронт ударної хвилі, дотримуючись симетрії заряду, мав би поширюватися співвісно з ним, тобто циліндрично. В реальних умовах масового вибуху фронт силового поля в породному масиві поширюється протягом певного часу, тому він розвивається не паралельно осі заряду, а починаючи з нижньої частини під кутом до осі. Цей кут залежить від співвідношення швидкості детонації в заряді та швидкості хвилі напружень у масиві. У разі рівності цих швидкостей фронт силового поля або його вектор руху буде формуватися під кутом 45° до горизонту (рис. 11, позиції фронтів 1,1').

Відповідно в цьому ж напрямку чергою за силовим фронтом розвивається деформаційний фронт. Отже, змінюючи згадане співвідношення, можна змінювати напрямок масового руху в деформованому середовищі. Оскільки розглядається підсилення механічного ефекту у надторцевій верхній частині руйнованого масиву, раціонально розвернути фронт силового поля від нижнього торця у бік поверхневого шару. Цьому сприяє нижнє ініціювання, яке стало можливим завдяки впровадженню у вибухову практику неелектричних ініціюючих систем.

Зрозуміло, що швидкість переміщення в масиві фронту хвилі напружень є сталою акустичною характеристикою даного масиву. Це означає, що змінити співвідношення між швидкостями фронтів детонаційної і звукової хвиль можливо лише шляхом зменшення швидкості детонаційної хвилі. Якщо швидкість фронту хвилі напружень становитиме 5000 м/с, а швидкість фронту детонаційної хвилі буде становити 2500 м/с, за одну мілісекунду, детонаційний процес пошириться в заряді від місця ініціювання на 2,5 м (катет, протилежний до визначуваного кута між фронтом хвилі напружень і горизонтом), а силовий імпульс в радіальному напрямку досягне 5 м (катет, прилеглий до визначуваного кута і паралельний горизонту). Відповідно тангенс кута становитиме 0,4, що відповідає значенню кута 22° . Отже, напрямок вектора фронту хвилі напружень, а з ним і масовий рух середовища практично суттєво розвернеться в бік покрівлі руйнованого блоку (рис.11, позиції силового поля 2,2'). Це повинно сприяти більш інтенсивному руйнуванню масиву в надторцевому шарі породного масиву в області ΔS між суміжними зарядами (рис. 11), не охоплений взаємодіючими воронками посиленого спущення.

Отже, за умови нижнього ініціювання свердловинного заряду і застосування низькошвидкісної ВР під час руху детонаційної хвилі в заряді в масив від підосви уступу випромінюється ударна хвиля, фронт якої розвертається в напрямку поверхневого шару на рівні набійки. Однак цього ефекту від переорієнтації силового поля можна досягти лише шляхом одночасного нижнього ініціювання суміжних свердловинних зарядів. Тоді два суміжних фронти полів напружень мають зустрітися в міжзарядному просторі в об'ємі, позначеному на рис. 15 як ΔS , а сумарний вектор силового поля спрямовується по нормалі до вільної поверхні блоку. Фактично в цьому випадку пропонується схема вертикального клинового врубу, генерованого похилими зустрічними фронтами 2,2', генерованими вибухом пари суміжних рядів свердловинних зарядів та переорієнтованими замість вільної бічної поверхні уступу в напрямку його покрівлі. Саме у зв'язку зі зниженням енергетики свердловинного заряду в його верхній торцевій частині внаслідок втрати торцем заряду осьової симетрії породний шар на рівні набійки є одним із суттєвих джерел виходу негабаритної фракції. Завдяки розвороту вектора суміжних фронтів у бік верхнього породного шару досягається підсилення деформаційних явищ на території, позначений як ΔS на рис. 11.

Пропозиції щодо підсилення енергетики масового вибуху на цій території можуть бути реалізовані в пропонованій схемі комутації вибухової мережі (рис. 12) шляхом формування спільного силового фронту одночасним нижнім ініціюванням двох суміжних рядів свердловинних зарядів низькошвидкісних ПВР (типу ANFO).

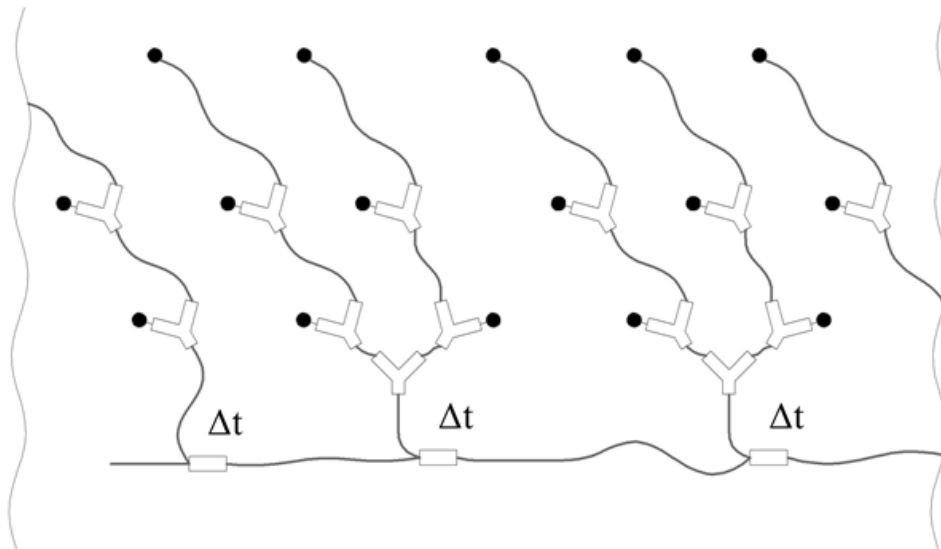


Рис. 12. Фрагмент діагонально-пучкової схеми «вертикальний клин»:

точки – свердловини; трійники – безкапсульні розгалужувачі; Δt – час уповільнення для подвійних рядів свердловинних зарядів

У наведеній схемі комутації вибухової мережі типу «вертикальний клин» одночасно використовуються декілька дисертаційних розробок, пов'язаних із застосуванням вітчизняної низькошвидкісної ініціюючої системи «Хвиля», комплекту безкапсульних розгалужувачів ініціюючого імпульсу та способу переорієнтації спільного силового фронту в бік поверхневого шару висаджуваного блоку на рівні набійки шляхом використання в промислових свердловинних зарядах низькошвидкісних вибухових речовин.

Сумісні польові випробування аналога розробленої схеми на відкритих гірничих об'єктах «Азерпартлайиш» (Республіка Азербайджан) продемонстрували її ефективність, яка полягає в подвійному зниженні виходу негабаритної фракції (з 10 % до 5 %).

Враховуючи певні технологічні недоліки вітчизняної неелектричної системи «Імпульс», за участі автора виконано роботу над технологією вдосконаленого варіанту вітчизняної неелектричної системи ініціювання «Хвиля». Неелектрична система ініціювання розрахована на основних споживачів НСІ – підприємства гірничодобувної промисловості України і придатна для ведення вибухових робіт на земній поверхні, у вибоях підземних виробок (рудниках та шахтах, безпечних за вмістом газу та пилу), дозволяючи створювати схеми миттєвого та уповільненого підривання в діапазоні інтервалів часу уповільнення від 0 мс до 9000 мс. Для ведення вибухових робіт на земній поверхні система складається з поверхневого ініціюючого пристрою з уповільненнями (6 серій уповільнення від 0 до 109 м/с), яке виготовляється у варіантах: НСІ П (поверхневий) зі з'єднувачем під 6 хвилюдовів, свердловинного ініціюючого пристрою з уповільненням (20 серій уповільнення від 25 до 500 м/с); НСІ С і стартового пристрою (НСІ П з детонатором без уповільнення); НСІ Т (тунельний) для ведення робіт у шахтах складається зі шпурових систем ініціювання зі з'єднувачем під 5 хвилюдовів, ініціюючого пристрою з уповільненням (29 серій уповільнення від 100 до 9000 м/с). Температурні режими використання НСІ становлять від мінус 30 °С до плюс 75 °С.

Хвилевід у системі ініціюється від іскророзрядних (пускових) пристроїв, допущених до постійного застосування, від капсуля-детонатора іншого типу НСІ

при з'єднанні їх за допомогою з'єднувача, від детонуючого шнура ДШЕ з наважкою 6 і більше г/м, від електродетонатора ЕД-8-Ж.

Технічні характеристики поверхневих неелектричних систем ініціювання Хвиля-П:

- капсуль-детонатор № 6 (з уповільненням);
- час уповільнення: 0, 17, 25, 42, 67 і 109 мс;
- довжина хвилеводу – відповідно до специфікації замовника $\pm 5\%$ (може становити від 2 до 40 метрів);
- зовнішній діаметр хвилеводу – 3 мм;
- внутрішній діаметр хвилеводу – $1,2 \pm 0,1$ мм;
- маса ВР/ 1м (хвилеводу) – 0, 17 г РЕНТ;
- швидкість детонації у хвилеводі – 2000 м/с;
- діапазон температур – від мінус 24 до +45 °С;
- ударостійкість – >10 Дж;
- міцність на розтягування хвилеводу -> 40 Н;
- з'єднувач на 5 хвилеводів;
- термін придатності – 2 роки з дати виготовлення (зберігання при температурі від мінус 30 до +35 °С) у заводській упаковці;
- клас небезпеки – 1.1 чи 1.4;
- група сумісності – В чи S.

При монтажі вибухової мережі до кожного капсуля-детонатора з уповільненням пристрою типу П (сторона П з поверхневим капсулем-детонатором) за допомогою з'єднувача приєднується до 6 хвилеводів ініційованих пристроїв. Довжина активної частини хвилеводів пристроїв, що ініціюються, не повинна бути менше 600 мм, пасивної – менше 80 мм. Активною частиною хвилеводу пристроїв типу П, С або Т є відрізок хвилеводу від місця ініціювання до місця з'єднання з капсулем-детонатором, пасивною частиною – від місця ініціювання до вільного кінця.

Приклад схеми монтажу вибухових мереж наведено на рис. 13.

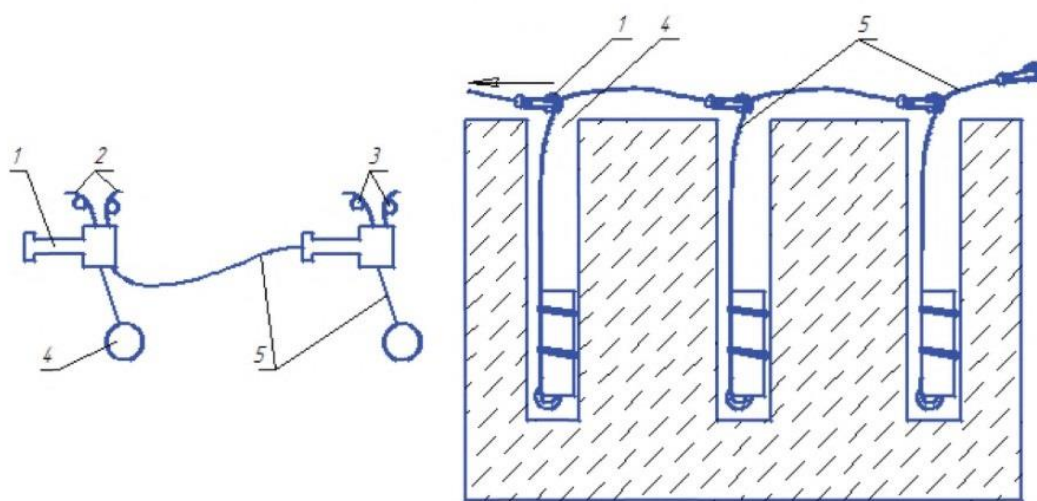


Рис. 13 – Схеми монтажу вибухової мережі:

1 – з'єднувач; 2 – пасивна частина хвилеводу; 3 – фіксуючий вузол; 4 – свердловина; 5 – активна частина хвилеводу

Для забезпечення заданої послідовності підривання свердловинних зарядів внутрішньосвердловинні уповільнення вибирають залежно від поверхневого міжрядового і міжсвердловинного уповільнення. Для більш ефективного використання енергії вибуху свердловинні та шпурові заряди необхідно ініціювати з донної частини заряду. При дубльованому ініціюванні свердловинного заряду використовують дублюючий пристрій з тим же часом уповільнення, що і час уповільнення основного пристрою, і розміщують його у верхній частині свердловинного заряду. Основний та дублюючий пристрій ініціюють від одного джерела.

У розділі розглянуто переваги і недоліки систем ініціювання на основі ДШ і хвилеводу з урахуванням детонаційних характеристик детонуючих елементів цих систем відповідно до завдань короткоуповільненого підривання, наприклад, при каскадному ініціюванні свердловинних зарядів. В цілому масова реалізація методу свердловинних сповільнень до появи детонуючих хвилеводів була практично малоздійсною, оскільки вимагала донного ініціювання частин розосередженого свердловинного заряду. Водночас у випадку технології електричного ініціювання сповільнюючий елемент-капсуль-електродетонатор потрібно розміщувати в нижній частині заряду, що не допускається діючими правилами, а при підриванні з використанням ДШ потрібне застосування малопотужних його різновидів з посиленням в області бойовика для гарантованого ініціювання. Застосування трубчастих детонуючих хвилеводів замість ДШ полегшує завдання донного ініціювання заряду, проте варто порівняти можливості методів з точки зору узгодженості детонаційних процесів в окремих частинах розосередженого заряду, або в ділянках суцільного свердловинного заряду з урахуванням різниці під час застосування окремих ініціюючих імпульсів і відповідно властивой різним методам.

Техніка багатоточкового або каскадного ініціювання подовжених зарядів передбачає оптимізацію кількості пунктів ініціювання в суцільному заряді або у випадку розосередження заряду шляхом застосування інертних проміжків. Результатом застосування методу є багаторазове навантаження неоднорідного породного масиву в різних точках горизонтальної та вертикальної площин об'єму, що руйнується. Заряди каскадного ініціювання є суцільною або розосередженою інертними проміжками колонку, а послідовність і напрямок їх детонації, а отже, і механічний ефект вибуху, пов'язані зі співвідношенням швидкостей детонації ініціатора, моментом прикладання ініціюючого імпульсу і швидкістю детонаційного процесу.

Практика короткоуповільненого підривання систем суцільних свердловинних зарядів при масових вибухах передбачає переважно їх заряджання з розташуванням двох бойовиків у верхній та нижній частинах заряду. Якщо застосовувати бойовики із стандартною довжиною відрізків хвилеводу, тобто виходити з рівності відрізків хвилеводу, що відводять початковий імпульс від магістралі до обох бойовиків, витрата ДХ при двоточковому ініціюванні подвоюється. Так, при глибині свердловини 14 м та довжині заряду 10 м довжина відрізка ДХ становитиме 16 м, а сумарна довжина ДХ – 32 м.

Якщо привести довжину верхнього хвилеводу у відповідність до глибини закладення верхнього бойовика, сумарна довжина ДХ скоротиться до 22 м (рис. 14, а). Однак за таких умов внаслідок суттєвої різниці у швидкостях детонації ДХ та ВР (відповідно 2000 і 4000 м/с) детонаційний фронт у заряді випередить прихід

ініціюючого імпульсу хвилеводом до нижнього бойовика, тобто взаємодія детонаційних фронтів у заряді виключається. Проблема може бути вирішена з застосуванням передаючого пристрою – подвійного розгалужувача (рис. 14, б).

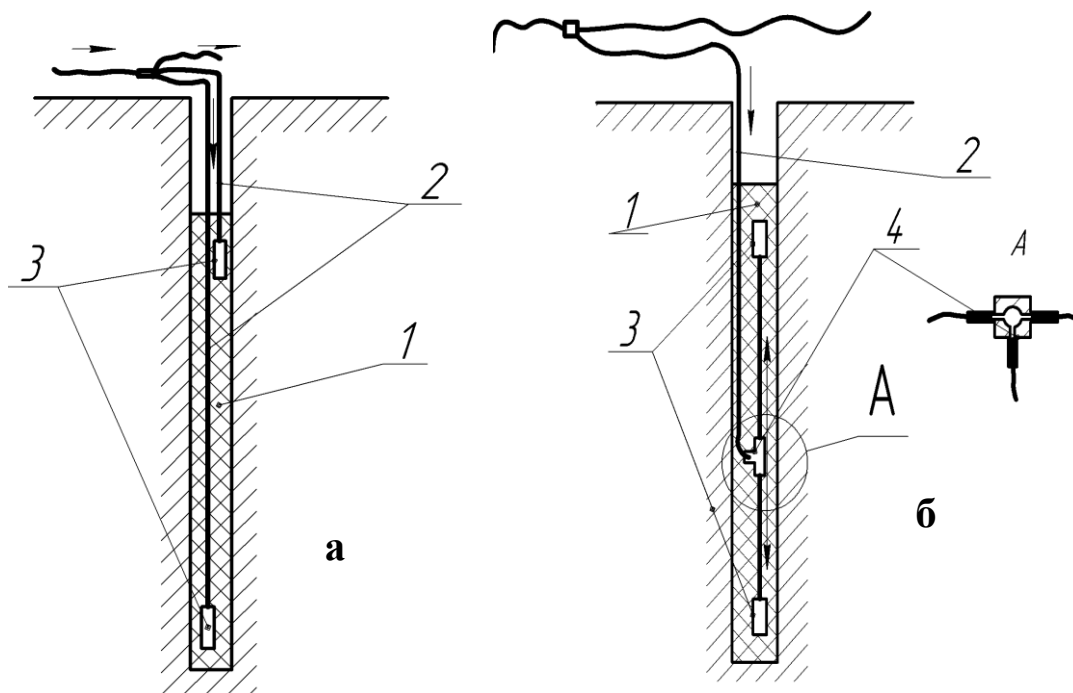


Рис. 14. Схеми ініціювання свердловинного заряду:

а – окремими відрізками ДХ; б – через розгалужувач; 1 – заряд ВР; 2 – ДХ; 3 – проміжний детонатор (бойовик); 4 – розгалужувач

Місце розташування розгалужувача на хвилеводі визначається лише призначеним місцем зустрічі фронтів хвиль детонації по висоті заряду та технічними прийомами його встановлення у комплексі з хвилеводом та бойовиками. Наприклад, якщо місце зустрічі ударних фронтів, що генеруються окремими ділянками свердловинного заряду, передбачити на його середині, розгалужувач встановлюється на цьому рівні, водночас загальна витрата ДХ становитиме орієнтовно 20 м. Значення розгалужувача істотно зростає при каскадному ініціюванні зарядів або їх розосередженні інертними проміжками.

Важливою умовою гармонізації перерахованих факторів у технологічному процесі підривання породного масиву є обґрунтування механізму розвитку процесу детонації зарядів та системи в цілому у поєднанні з елементами прийнятої системи ініціювання.

На відміну від ДШ сучасні неелектричні системи забезпечують технологічну ефективність та безпеку вибуху. Їх універсальність у технологічному плані полягає у можливості застосування внутрішньосвердловинних уповільнень без відомих труднощів та обмежень, пов'язаних з використанням ДШ з одночасним виключенням ймовірності акустичної взаємодії ударних та детонаційних хвиль у системі суміжних зарядів. Водночас зростає значення застосування надійних конструкцій розгалужувачів, що забезпечують одночасну безкапсюльну передачу детонаційного процесу від активної гілки в систему паралельно змонтованих відрізків ініційованого детонуючого хвилеводу за рахунок ефективного використання енергії ДХ на виході з його торцевої частини.

Використання неелектричної системи ініціювання «Хвиля» надає низку переваг. Підвищення надійності мережі ініціювання зарядів досягається насамперед її резервуванням, підвищенням надійності з'єднань провідників силового імпульсу за рахунок застосування вузлових з'єднань замість сполучних блоків, а також використанням компенсаторів механічних натягів детонуючих хвилеводів.

Сутність використання НСІ при відкритих гірничих роботах пояснюється окремими графічними схемами. На рис. 15 наведено приклади виконання схем короткоуповільненого підривання свердловинних зарядів на кар'єрах при діаметрі свердловин 200–250 мм. Цифрами біля свердловин на схемах позначено проєктний час уповільнення вибуху поверхневою мережею у мілісекундах.

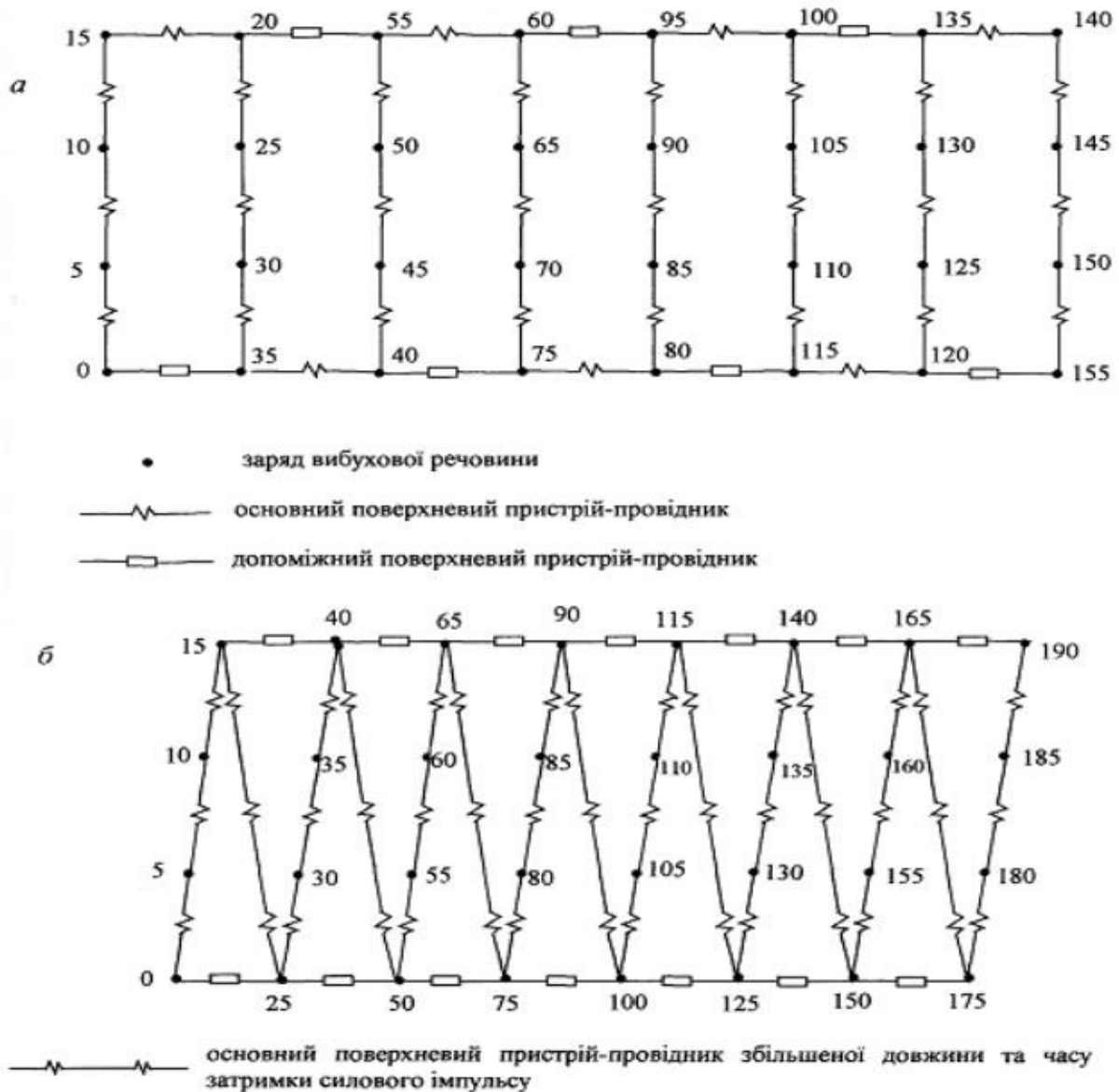


Рис. 15. Приклади виконання схем короткоуповільненого підривання свердловинних зарядів на кар'єрах

На рис. 16, а зображено схему свердловинного заряду вибухової речовини порівняно малої висоти (до 15 м) з повітряним проміжком. На рис. 16, б наведено те ж, але в глибокій свердловині (висота заряду більше 15 м).

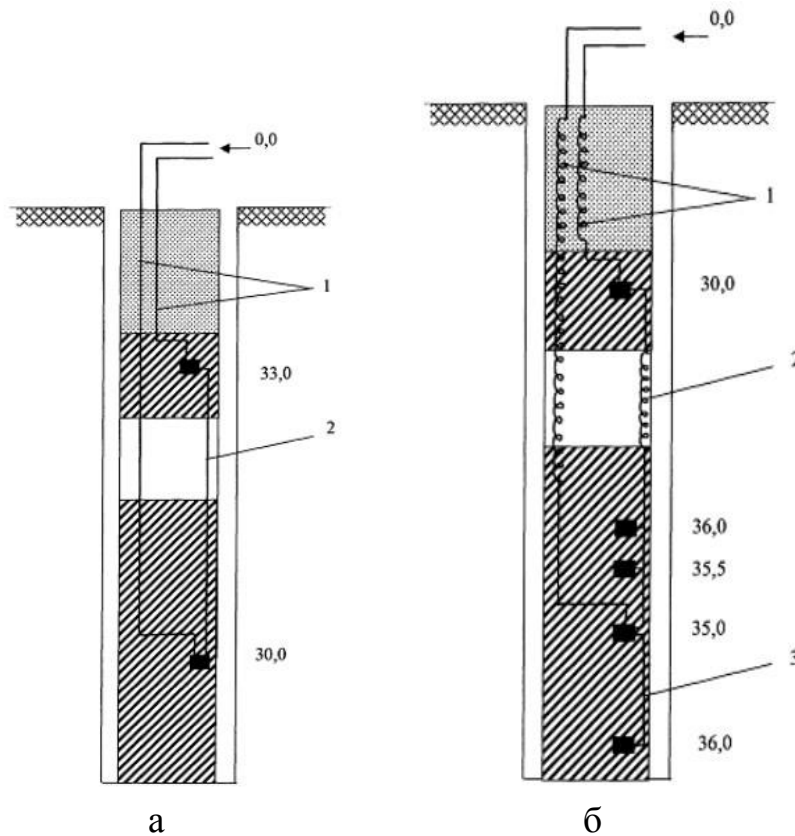


Рис. 16. Схема свердловинних зарядів вибухової речовини: 1 – основні свердловинні пристрої-провідники; 2 – внутрішньосвердловинні пристрої-провідники двоспрямованої дії; 3 – внутрішньосвердловинні пристрої-провідники односпрямованої дії; цифри праворуч означають час спрацювання засобів ініціювання вибуху в заряді.

Кращим для реалізації неелектричної системи ініціювання є варіант, у якому з'єднання між окремими пристроями-провідниками здійснюється за допомогою вузлів. У цьому варіанті менша імовірність підбивання мережі уламками з'єднувачів, система ініціювання менше піддається впливу погодних умов, ніж за вартістю. У якості резервних провідників може бути використаний детонуючий шнур із відповідними піротехнічними пристроями-уповільнювачами.

В гірничодобувній галузі України значне місце займає напрямок, пов'язаний з видобуванням унікального українського декоративного каменю. Разом з низкою механічних способів різання блочного каменю, які відрізняються невисокою продуктивністю, на відділенні монолітів успішно використовуються інтенсивні вибухові методи на основі К-зарядів.

Для забезпечення водостійкості та зручності в обігу вибухова суміш упаковується в тверді пластикові трубки. Зарядження шпурів відбувається шляхом монтажу гірлянди трубчастих К-зарядів потрібної довжини, тобто без контакту з зарядом ВР. Водночас трубки оснащуються опереним фіксатором, що дозволяє фіксувати їх між собою та в шпурах на необхідному рівні. Випробування показали, що К-труб, виготовлені з ПЕВТ 15803-020 методом екструзії, цілком придатні до експлуатації, надійно захищають заряд від вологого середовища, не втрачають цілісності під час транспортування, витримують потрапляння прямих сонячних променів.

Про повноту детонації зарядів у трубах оцінювали за наявністю воронки та відсутності залишків ВР на місці вибуху. В ході полігонних випробувань отримані такі результати: швидкість детонації заряду становила в межах 1,6–1,8 км/с, рівень детонації – повна детонація (усі патрони з ВР для зарядів типу К-труб детонували повністю без залишків поліетилену та зарядів).

За теплою вибуху, швидкістю детонації і об'ємом газів розроблені заряди знаходяться на рівні кращих світових зразків, наприклад, «К-труб» фінського виробництва, які мають великий попит у Європі.

Розроблені заряди мають невисокі рівні температури і теплоти вибуху та незначний об'єм газоподібних продуктів.

Враховуючи ефективність і надійне спрацювання розроблених К-зарядів від штатних засобів ініціювання – електродетонатора ЕД-8 і детонуючого шнура ДШЕ-12, їх низьку чутливість до механічних впливів, розроблені заряди можуть застосовуватися в якості засобів відбивання блочного каменю.

Оскільки вибухова суміш знаходиться в герметичній трубці, зарядження шпурів може виконуватися за будь-яких погодних умов, а працівники кар'єрів не мають прямого контакту з вибуховою речовиною. Це підвищує безпеку під час виконання вибухових робіт і культуру роботи на кар'єрах блокового каменю.

Головною метою виконаних в дисертації досліджень з розробки низькодетонаційних систем ведення висаджувальних робіт є гармонізація силових імпульсних впливів на середовище з його деформативністю. Відмінною рисою більшості цих досліджень є економічність і безпека техніки виготовлення і застосування цих систем за рахунок використання в пропонованих рішеннях простих невибухових речовин, які перетворюються на ВР на місці виконання гірничих робіт. Однак варто оцінити спільний для всіх вибухових технологій сейсмічний чинник безпеки, який проявляється в часі вибуху із застосуванням вибухових мереж на основі сучасних НСІ з відповідним оснащенням. Оцінка рівня сейсмобезпеки порівнюваних ініціюючих систем базувалася на розрахунку показника сейсмічності вибуху, який визначається масою заряду ВР, що припадає на 1 мс уповільнення.

Як свідчать розрахунки, прогресивна неелектрична система типу «Нонель» є найбільш безпечною для ініціювання свердловинних зарядів масового вибуху в аспекті сейсмічної дії. Відповідні значення показника сейсмічності для схеми з ДШ становив $K_{\text{сейсм}} = 17,14 \text{ кг / мс}$, для схеми з НСІ $K_{\text{сейсм}} = 4,077 \text{ кг / мс}$.

Отже, прийнята для розрахунку діагональна схема комутації вибухової мережі засобами НСІ (діагонально-пучкова схема «вертикальний клин») з мілісекундним уповільненням в 17 мс не поступається за параметрами сейсмобезпеки схемі ініціювання із застосуванням високошвидкісного детонуючого шнура в комплекті з сповільнювачами типу КЗДШ з періодом уповільнення 20 мс, припустимим правилами, через повільніше проходження ударної хвилі хвилеводом.

Порівняльна оцінка економічності низькошвидкісної системи ініціювання в масовому вибуху з використанням пропонованих у роботі рішень показала, що під час впровадження низькошвидкісної детонаційної системи НСІ з інертними розгалужувачами в умовах масових вибухів свердловинних розосереджених зарядів за річної продуктивності підприємства в 1,0 млн м³ видобутої гірської маси економічний ефект від впровадження пропонованих розробок становитиме понад 3770000 грн.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну наукову проблему створення наукових основ, засобів і технологічних рішень щодо механізму спричинення, підтримання і регулювання процесів детонаційного розкладання в низькошвидкісних вибухових ланках систем вибухової мережі в умовах масових вибухів на відкритих гірничих роботах. Наукові розробки мають за мету оптимізацію механізму взаємодії вибухового імпульсу і розширюваних продуктів детонації з гірською породою. У дисертаційній роботі виконано добір і вдосконалення композицій для розширення кластера вибухових матеріалів на основі доступних компонентів невибухової природи, що сприяє механізації виготовлення і формування зарядів ВР і виробів на місці виконання вибухових робіт, принципово їх вдосконалює з економічної точки зору, а також з безпекових, екологічних і логістичних міркувань. У дослідженнях отримано такі наукові результати.

1. Аналіз тенденцій розвитку вітчизняної вибухової справи свідчить про прагнення науковців і гірничих фахівців до вдосконалення техніки вибухових робіт при відкритому і підземному способах видобування корисних копалин шляхом забезпечення вітчизняного гірництва низькошвидкісними і безпечними в застосуванні сумішевими та емульсійними вибуховими речовинами (ЕВР) переважно місцевого виготовлення з метою підвищення ефективності, економічності та безпеки вибухових робіт шляхом гармонізації детонаційних процесів із деформаційними властивостями гірського середовища.

2. За відсутності в професійній літературі теоретичних обґрунтувань механізму поширення детонаційного процесу в детонуючому хвилеводі низькошвидкісної системи ініціювання типу «Нонель», в роботі, вперше досліджено динаміку циліндричної оболонки для визначення параметрів хвиль деформацій і встановлені закономірності детонаційного процесу на основі струшування дрібнокристалічної ініціюючої ВР, її розпилення в каналі хвилеводу з подальшою детонацією в низькошвидкісному режимі. Хвильові й детонаційні параметри в циліндричному хвилеводі, характер динаміки рухливого навантаження в його тілі сприяють механічному струшуванню напиленої на її внутрішню поверхню дрібнокристалічної ініціюючої ВР і створенню умов для стабільного переміщення в пилоповітряній суміші детонаційної хвилі каналом трубки зі швидкістю в межах 1000...2000 м/с при стрибку тиску на фронті до 25 МПа,

3. Оскільки ефективність та рівномірність напилування і струшування високочутливої кристалічної ВР в каналі детонуючого хвилеводу визначається гранулометричним складом і формою кристалів, у роботі розроблено і успішно застосовано гідромеханічний спосіб їх сфероїдизації, придатний для виготовлення оптимальних за стабільністю і рівнем робочого детонаційного тиску в каналі хвилеводу, безпечного для його оболонки і достатнього для підтримання сталих детонаційних перетворень в ініціюючій системі.

4. З метою скорочення витрат одного з вартісних елементів НСІ – детонуючого хвилеводу, в умовах підривання розосереджених свердловинних зарядів, розроблено і досліджено конструкцію безкапсульного комунікаційного блоку – розгалужувача детонаційного сигналу, що дозволяє безвідмовно передавати детонацію до 4-х гілок у системі хвилеводів на відстань до 150 мм.

5. Оскільки енергетично визначальним чинником безпосереднього ініціювання заряду промислової ВР є проміжний детонатор або бойовик, дослідження в роботі спрямовано на розробку нових економічно і технологічно ефективних низькошвидкісних вибухових композицій, що базуються на більш доступних невибухових компонентах – аміачній селітрі, перексиді водню і гліцерині з домішками нітратів кальцію, натрію і калію з сенсibilізаторами для виготовлення проміжних детонаторів на місці виконання масових вибухів. На їх основі в ході лабораторних термогравіметричних і мікроскопічних досліджень, підтриманих теоретично розрахунками енергії Гіббса вибухових сумішей, отримано низку закономірностей термічного розкладу низькошвидкісних композицій, з яких виділено і запропоновано для практичного використання суміші аміачної селітри з нітрометаном.

6. Досліджено вплив кінчної форми бойовика місцевого приготування на основі пропонованої низькошвидкісної суміші аміачної селітри з нітрометаном на його ініціюючу здатність та встановлено оптимальний діапазон кута конусності в межах $15...45^\circ$ для концентрації ініціюючого імпульсу.

7. У ході досліджень за участі автора в співпраці з науковцями і гірничими підприємствами Азербайджанської Республіки розроблено емульсійну вибухову речовину «Азнітро» для складних геологічних умов застосування, особливістю якої є стабільність детонаційних властивостей та задана потужність.

8. З метою подальшого вдосконалення вибухової техніки ощадливого відділення монолітів декоративного каменю виконано теоретичне обґрунтування і експериментальне випробування ефективної вибухової композиції, яка не містить нітроефірів, а виготовлена на основі невибухових компонентів – перхлорату калію (окисник), у поєднанні з дизпаливом або нітрометаном (палива) та оксидом марганцю (каталізатор термічного розкладання) для спорядження вітчизняного аналога К-зарядів, безпечного у виготовленні на місці виконання вибухових робіт. У ході досліджень для отримання тонкодисперсних сферичних кристалів перхлоратів різних фракцій, розроблено метод сфероїдизації – формування кристалів солей у кристалізаторі-модифікаторі.

9. Зіставлення характеристик розроблених зарядів із відомими засобами для вибухового відділення монолітів свідчить про спроможність, ефективність та безпеку виготовлення К-зарядів безпосередньо на місці виконання робіт, низькі значення теплоти вибуху і швидкості детонації, що сприяє досягненню техніки «м'якого» вибуху, скорочення витрат на компоненти зарядів ВР порівняно з зарубіжними аналогами, зниження кількості шкідливих газів.

10. У ході досліджень за участі автора розроблено Технічні умови та Директивний технологічний процес отримання вітчизняної НСІ «Хвиля», технологія якої заснована на низькошвидкісному, не руйнуючому оболонку хвилеводу режимі в поєднанні з пропонованими у роботі пасивними блоками-розгалужувачами суттєво скорочує витрати детонуючого хвилеводу і часу на комутацію вибухової мережі.

11. Конструкція і вибуховий склад проміжних детонаторів (бойовиків) на основі місцевих невибухових компонентів (аміачної селітри, перексиду водню, гліцерину) виключає використання вартісних і небезпечних у виробництві та використанні заводських тротилових і тротил-гексогенових бойовиків, сприяючи їх формуванню на місці виконання висаджувальних робіт, а надання бойовикам

конічної конфігурації принципово змінює умови формування ініціюючого імпульсу, орієнтуючи його в потрібному напрямку.

12. Розроблена для складних гірничих умов універсальна промислова ЕВР «Азнітро» в поєднанні з засобами реалізації низькошвидкісних ініціюючих процесів забезпечує фізичну стабільність систем, скорочення витрат на руйнування гірських порід на 10 %, безпеку та екологічну чистоту технологічних процесів.

13. У результаті виконаного комплексу досліджень щодо створення ефективного і конкурентного аналога К-зарядів на основі низькошвидкісних сумішевих вибухових речовин – перхлорату калію і дизпалива (нітрометану) та розробки технології виготовлення циліндричної оболонки К-труб запропоновано вітчизняну безпечну вибухову систему місцевого комплектування безпосередньо в умовах гірничих підприємств з видобування блоків декоративного каменю.

14. У роботі розглянуто перспективи і напрямки застосування низькошвидкісних засобів ведення промислових вибухових робіт із використанням послідовності та особливостей розвитку зони незворотних деформацій під впливом пружних сил післядії, врахуванням специфіки формування в міжзарядному просторі взаємодіючих силових полів з метою підсилення механічного ефекту вибуху в потрібному напрямку в умовах масових вибухів, що принципово піднімає рівень розглянутих технологій.

15. На основі оцінки рівня сейсмічної небезпеки масового вибуху системи свердловинних зарядів за показником сейсмічності вибуху здійснено порівняння варіанта комутації вибухової діагональної мережі з використанням традиційного детонуючого шнура з варіантом комутації за допомогою системи НСІ «Хвиля», з якого видно, що завдяки застосуванню низькошвидкісної системи ініціювання показник сейсмічності порівняно з традиційними засобами короткоуповільненого підривання знижується в 1,9 рази.

Згідно з виконаною оцінкою ризиків під час виробництва ЕВР та інших пропонованих композицій місцевого виготовлення без їх транспортування існуючі небезпеки поширюються лише на територію гірничого підприємства і не торкаються об'єктів «турботи суспільства, тому соціальний ризик від аварій цього типу дорівнює 0.

16. Вибіркові розрахунки економічної ефективності впровадження вітчизняної низькошвидкісної детонаційної системи ініціювання НСІ в комплексі з проміжними ініціаторами та інертними розгалужувачами, які сприяють застосуванню техніки розосередження свердловинних зарядів та їх зворотного ініціювання з донної частини свердловини, в умовах масових вибухів свердловинних зарядів за річної продуктивності підприємства в 1,0 млн м³ видобутої гірської маси, економічний ефект від впровадження пропонованих розробок становитиме понад 3770000 грн. для всіх умов гірничого виробництва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України

1. Желтоножко, А. А., Закусило, В. Р., **Закусило, Р. В.**, Швидько, П. В. Нові проміжні детонатори на основі нітрометану та аміачної селітри для ініціювання свердловинних зарядів. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ»*. Серія «Гірництво». 2008. № 17. С. 92–97.

2. Закусило В. Р., Желтоножко А. А., **Закусило Р. В.**, Бойко Л. В., Узжина Л. Н., Маргарян А. З. Дослідження по розробці вибухових зарядів для відколу блочного каменю та технології їх виробництва. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2005. Т. 34, № 5. С. 88–90

3. Закусило В. Р., Романченко А. М., **Закусило Р. В.** Влияние катализаторов на термическое разложение перхлората калия и взрывчатые характеристики составов на его основе. *Вісник Кременчуцького національного університету*. 2013. Т. 82, № 5. С. 103–107.

4. Закусило В. Р., Романченко А. М., **Закусило Р. В.** Гетерогенные взрывчатые составы пиротехнического типа. *Вісник Національного техн. університету «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2015. № 27. С. 60–66.

5. Закусило В. Р., Романченко А. М., **Закусило Р. В.**, Кравець В. Г. Дослідження по вибору полімерної композиції та методу виготовлення оболонок для К–труб. *Вісник Національного техн. університету «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2014. № 24. С. 49–56.

6. **Закусило Р. В.**, Лукашов В. К., Закусило Д. Р., Маргарян А. З., Слесарева О. В. Дослідження технології виробництва піротехнічного складу у формі тонколистового виробу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2021. Т. 127, № 2. С. 106–111.

7. Закусило Р. В. Определение рисков при транспортировке и зарядке эмульсионных взрывчатых веществ местного приготовления в соответствии со стандартами Евросоюза. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Т. 107, № 6. С. 105–109.

8. Закусило Р. В. Основы побудови вибухобезпечної технології виробництва вибухових матеріалів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Т. 109, № 2. С. 54–59.

9. **Закусило Р. В.**, Банишевський В. В., Комаров В. В. Исследование процесса получения кристаллов сферической формы в кристаллизаторе–модификаторе. *Вісник НТУ «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2015. № 29. С. 50–55.

10. **Закусило Р. В.**, Закусило В. Р. Влияние конической формы промежуточных детонаторов на их инициирующую способность. *Вісник Національного техн. університету «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2017. № 32. С. 27–33.

11. **Закусило Р. В.**, Лукашов В. К., Курганський І. Н. Фракционная кристаллизация октогена. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ»*. Серія «Гірництво». 2003. № 11. С. 20–23.

12. **Закусило Р. В.**, Романченко А. М. Дослідження характеристик і ефективності просторового розташування низькоенергетичних зарядів для видобування блокового каменю. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Серія: Технічні науки. 2018. Т. 81, № 1. С. 246–251.

13. **Закусило, Р. В.**, Романченко, А. М., Закусило, Д. Р. Розробка технології отримання подовжених зарядів для видобування блокового каменю. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Т. 111, № 4. С. 75–80.

14. Шаров Б. І., Банишевський В. В., Чернов Е. Д., **Закусило Р. В.** Создание детонирующего волновода к неэлектрической системе инициирования (Проблемы и

решения). *Артиллерийское и стрелковое вооружение (специальный выпуск)*. 2003. С. 36–37.

15. **Zakusylo R.**, Kravets V., Bojko V. Control the seismic effect of mass explosions using low-speed means of initiation. *Journal «Metallurgical and Mining Industry», Ser. «Materials Science»*. 2016. No. 3. P. 99–104.

16. **Zakusylo R.**, Kravets V. Regularity of low-speed detonation processes in the shock-tubes. *Journal «Metallurgical and Mining Industry», Ser. «Materials Science»*. 2017. No. 4. P. 59–63.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

17. Boiko V., Kravets V., Han A., Han O., **Zakusylo R.** Change of dynamic characteristics of foamed explosive substances under the influence of ultrasonic radiation. *Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*. 2021. No. 13. P. 89–95.

18. Han, A., Boiko, V., Han, O., Khlevni, T., **Zakusylo, R.** Selection of energy-optimal formulations for low-velocity explosive mixtures based on conversion explosives. *Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*. 2023. No. 15. P. 81–85. URL: <https://doi.org/10.22211/matwys/0241>.

19. Kravets V., Shukurov A., **Zakusylo R.**, Kovtun A. Technological applications of border effects by hole charges system explosion. *Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*. 2019. Vol. 2, no. 11. P. 21–30.

20. Zakusylo, R. Emulsion explosives of local preparation and perspectives for their use in open explosive works. *Yer ve İnsan*. 2018. No. 8. P. 23–28.

21. Zakusylo R. Investigation of the initiating ability of conically shaped charges. *Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*. 2018. No. 10. P. 69–76.

22. **Zakusylo R.**, Kravets V., Shukurov A. Structural elements of a low-speed non-electric initiation system in the implementation of downhaul deceleration. *Transaction of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical*. 2017. Vol. 37, no. 6. P. 126–133.

23. **Zakusylo R.**, Romanchenko A. Examining the selection of a fuel component for low energy mixtures. *Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials*. 2021. No. 13. P. 82–88.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science

24. Boiko V., Kravets V., Han O., Han A., **Zakusylo R.** Efficiency of using explosive foam compositions for compacting structurally unstable soil. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2023. Vol. 20, no. 4. P. 442–454. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/176913>.

25. Cheltonov M., **Zakusylo R.**, Ustymenko I. Regularities of Spheroidization of HMX Extracted from Solid Propellant Disposal Products. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 523–534. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/131782>

26. Diky V., **Zakusylo R.**, Trachenko K. An Overview of Ukrainian Thermophysics Research (1926 to 2022). *International Journal of Thermophysics*. 2022. Vol. 44, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03117-7>

27. Fabian M., Skóra P., Polis M., **Zakusylo R.**, Stolarczyk A., Jarosz T. Towards “green” ANFO: Study of perchlorates and inorganic peroxides as potential

additives. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 15. P. 5636. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules28155636>.

28. Fabin M., Stolarczyk A., **Zakusylo R.**, Jarosz T. Following the Decomposition of Hydrogen Peroxide in On-Site Mixture Explosives: Study of the Effect of the Auxiliary Oxidising Agent and Binder. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 16. P. 5957. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules28165957>

29. Kravets V., **Zakusylo R.**, Sydorenko Y., Shukurov A., Sałaciński T., Zakusylo D. Regularities of the Energy of Formation Field in the Explosion of a Conical Charge. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2019. Vol. 16, no. 4. P. 533–546. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/115355>

30. Lysien K., Waśkiewicz S., Stolarczyk A., Mielańczyk A., **Zakusylo R.**, Jarosz T. Traditional vs. energetic and perchlorate vs. “green”: A comparative study of the choice of binders and oxidising agents. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 15. P. 5787. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules28155787>.

31. Polis M., Szydło K., **Zakusylo R.**, Hawelek L., Stolarczyk A., Jarosz T. Study of the Combustion Mechanism of Zn/KMnO₄ Pyrotechnic Composition. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 15. P. 5741. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules28155741>

32. Voitenko Y., Sydorenko Y., **Zakusylo R.**, Boyko V., Artemiev O., Bugaiets V., Zakusylo D. Influence of Liner Form and Explosive on the Velocity and Mechanical Action of a Shaped-Charge Jet. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2024. Vol. 21, no. 3. P. 320–337. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/193819>

33. Voitenko Y., Sydorenko Y., **Zakusylo R.**, Goshovskii S., Zaychenko S., Boyko V. On the Influence of the Liner Shape and Charge Detonation Scheme on the Kinetic Characteristics of Shaped Charge Jets and Explosively Formed Penetrators. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2023. Vol. 20, no. 4. P. 417–441. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/173190>

34. Voitenko Y., **Zakusylo R.**, Zaychenko S. Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2021. Vol. 18, no. 3. P. 405–423. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/142615>

35. Voitenko Y., **Zakusylo R.**, Wojewódka A., Gontar P., Gerlich M., Drachuk A. New Functional Materials in Mechanical Engineering and Geology. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2019. Vol. 16, no. 1. P. 135–149. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/105598>

36. Wojewódka A., **Zakusylo R.**, Kravets V., Romanchenko A., Jarosz, T. Investigation of Metal Oxides as Catalysts for the Thermal Decomposition of Potassium Chlorate(VII). *Central European Journal of Energetic Materials*. 2018. Vol. 15, no. 2. P. 327–338. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/89868>

37. **Zakusylo R.**, Pavlenko O., Jarosz T., Maranda A., Zakusylo D., Stolarczyk A. Study of the Thermal Decomposition Process of Explosive Mixtures Based on Hydrogen Peroxide. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 23. P. 5616. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules29235616>

38. **Zakusylo R.**, Zakusylo D., Sałaciński T. Analysis of Standard Methods for Determining the Properties of Explosive Materials in Ukraine. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2023. Vol. 20, no. 1. P. 75–91. URL: <https://doi.org/10.22211/cejem/162891>

39. Zakusylo V., Romanchenko A., **Zakusylo R.** Explosive composition on the basis of potassium perchlorate and nitromethane. *Journal «Metallurgical and Mining Industry», Ser. «Materials Science»*. 2015. No. 11. P. 170–175.

Патенти на винахід із напрямку, з якого підготовлено дисертацію, що пройшли кваліфікаційну експертизу:

40. Блок з'єднувальний безкапсульний : пат. 81085 Україна. Опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. 3 с.

41. Вибуховий пристрій для відбійки блоків декоративного каменю : пат. 106545 Україна : МПК C06B 29. Опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с.

42. Вибуховий склад : пат. 100445 Україна : МПК C06B 31/28. Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 4 с.

43. Детонуючий хвилевід : пат. 56067 А Україна : МКИ H01P3/00. Заявл. 27.09.2002 ; опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4. 2 с.

44. Емульсійна вибухова речовина : пат. 144696 Україна : МПК C06B 31/28. Опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20. 5 с.

45. Піротехнічний безгазовий склад : пат. 78930 Україна. Опубл. 2012, Бюл. № 7. 3 с.

46. Піротехнічний склад уповільненої дії : пат. 137174 Україна : МПК F42B 3/10. Опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 4 с.

47. Пристрій для мікродозування : пат. 51927 А Україна : МКИ G01F11/00. Заявл. 27.09.2001 ; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12. 2 с.

48. Промислова вибухова речовина Грануліт ШР–1А : пат. 129929 Україна : МПК F42B 3/10. Опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 4 с.

49. Промислова вибухова речовина : пат. 85168 Україна. Опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. 3 с.

50. Проміжний детонатор для свердловинних зарядів : пат. 120046 Україна : МПК C06B 31/28. Опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20. 5 с.

51. Система ініціювання зарядів вибухової речовини : пат. 16300 U Україна : МПК F42D 1/055. Заявл. 16.08.2005 ; опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8. 10 с.

52. Система ініціювання неелектрична комбінована безкапсульна : пат. 102531 Україна : МПК(2015.01) C06C 7/00 F42D 3/00. Опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21. 7 с.

53. Спосіб виготовлення вибухового складу на місцях проведення вибухових робіт : пат. 105003 Україна : МПК C06B 29/00 C10L 1/00. Опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4. 4 с.

54. Спосіб визначення вологості компонентів вибухових речовин за допомогою надвисокочастотного випромінювання : пат. 105430 Україна : МПК H01P 3/00 G01N 19/10. Опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6. 4 с.

55. Спосіб отримання сферичних кристалів ізогідричним методом : пат. 106155 Україна : МПК H01P 3/00 G01N 19/10. Опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с.

56. Спосіб уповільненого підривання зарядів вибухової речовини, система ініціювання зарядів вибухової речовини та пристрій–провідник силового ініціювального імпульсу (варіанти) : пат. 82683 C2 Україна : МПК F42D 1/02. Заявл. 02.01.2007 ; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 5. 10 с.

Монографії та розділи у колективних монографіях, з яких підготовлено дисертацію:

57. **Zakusylo, R.**, Kravets, V., Shukurov, A. Innovative development of resource-saving technologies for mining. Multi-authored monograph. - Sofia: Publishing House "St.Ivan Rilski", 2018. - 439 p.

58. Kravets, V., Zakusylo, R., Shukurov, A., Zakusylo, D., Aliyev, F. Improvement of Explosive Technologies by Using Specific Phenomena in Explosion Geodynamics. *Studies in Systems, Decision and Control*. Cham, 2024. P. 55–65. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_4

59. **Закусило Р.В.**, Кравець В.Г., Коробійчук В.В.. Засоби ініціювання промислових зарядів вибухових речовин : монографія. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 212 с. ISBN 978-966-683-316-0

60. **Zakusylo, R.**, Romanchenko, A. Kravets, V., Topical issues of re-source-saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph. - Petroșani, Romania : Universitas Publishing, 2018. - 270 p.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

61. Edge effects of limited length downhole charge explosion / V. Kravets et al. *Slovak Society for Blasting and drilling Work, Conference Proceedings Blasting techniques*, Banska Bystrica. Banska Bystrica, 2019. P. 207–215.

62. Effectiveness of contact charges in the destruction of metal barriers/ Efektywność kontaktu ładunku podczas destrukcji metalowych przegród / **R. Zakusylo** et al. *15th International Conference IPOEX 2018 EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materiały*, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2018. P. 10.

63. Matching Of Detonation Velocity And Energetic Potential Of Low Detonation Velocity Explosive Charges / M. Polis et al. *18th International Conference IPOEX 2023 EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materiały*, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2023. P. 57–58.

64. Perchlorates and inorganic peroxides as green additives for ANFO / M. Fabin et al. *Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, Шостка, 22–24 October 2023. Суми, 2023. P. 42–45.

65. Properties of solid rocket propellants differing in utilized binder / K. Łysień та ін. *Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 22–24 жовт. 2023 р. Суми, 2023. С. 34–37.

66. Technological applications of border effects of hole charges system explosion / V. Kravets et al. *16th International Conference IPOEX 2019 EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materiały*, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2019. P. 4–5.

67. Zakusylo D., Sereda V., **Zakusylo R.** Analysis Of The Prospects For The Application Of Green Pyrotechnics. Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2023. P. 7.

68. Zakusylo R. Investigation of low-speed nitroammonium explosives of increased water resistance. *Slovak society for blasting and drilling work, conference proceedings blasting techniques*, м. Banska Bystrica. Banska Bystrica, 2018. C. 297–302.

69. **Zakusylo R.**, Romanchenko A. Reflection of block stone by low-speed charges of local production. *Slovak Society for Blasting and drilling Work, Conference Proceedings Blasting techniques*, Banska Bystrica. Banska Bystrica, 2019. P. 222–226.

70. Zakusylo R. Study of intermediate detonators with a truncated conical shape / Badanie detonatorów pośrednich o ściętym stożkowym kształcie. *15th International*

Conference IPOEX 2018 EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materials, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2018. P. 8–9.

71. **Zakusylo R. V.**, Kravets V. G., Zakusylo V. R. Low speed explosive charges for blasting of the decorative block stone. *Slovak society for blasting and drilling work, conference proceedings blasting techniques*, Banska Bystrica. Banska Bystrica, 2017. P. 220–224.

72. Войтенко Ю. І., Гошовський С. В., **Закусило Р. В.** Матеріалознавчі аспекти ефективності вибухової кумуляції. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 23–25 жовт. 2022 р. Суми, 2022. С. 56–59.

73. Войтенко Ю. І., Гошовський С. В., **Закусило Р. В.** Про основні чинники впливу на глибину пробиття і енергію удару кумулятивних струменів і ударних ядер. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 23–25 жовт. 2022 р. Суми, 2022. С. 60–63.

74. Войтенко Ю. І., **Закусило Р. В.** Об энергии кумулятивных струй и компактных элементов и пути увеличения их ударных свойств. *Збірник наукових праць V Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 20–22 жовт. 2021 р. Суми, 2021. С. 51–54.

75. Дослідження впливу форми лайнера на механічну дію кумулятивного заряду / Ю. І. Войтенко та ін. *Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 22–24 жовт. 2023 р. Суми, 2023. С. 30–33.

76. Дослідження характеристик заряду на основі аміачної селітри та нітрометану / **Р. Закусило** та ін. *Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 22–24 жовт. 2023 р. Суми, 2023. С. 38–41.

77. Закусило В. Р., **Закусило Р. В.**, Батуринець А. С. Влияние конструкции промежуточных детонаторов на их инициирующую способность. *Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка. Суми, 2016. С. 46–47.

78. Закусило Д. Р., **Закусило Р. В.** Ризики логистики эмульсійных взрывов речовин в Україні та ЄС. *II international scien.-tech conference «problems of geoengineering and underground urbanistic»*, м. Київ, 16–17 трав. 2019 р. Київ, 2019. URL: https://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conference/problems_geoengineering/170520191242.pdf.

79. **Закусило Р. В.**, Закусило В. Р. Дослідження вибухової суміші нітрометану та аміачної селітри. *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Хімічна технологія та виробництво» Шостка, 2012*, м. Шостка. Суми, 2012. С. 32.

80. Закусило Р. В. Исследование промежуточных детонаторов конической формы. *Матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі»*, м. Кривий Ріг. Кривий Ріг, 2017. С. 45.

81. Закусило Р. В. Логистические и правовые аспекты перехода Украины к стандартам Европейского Союза по перевозке опасных грузов. *Матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі»*, м. Кривий Ріг. Кривий Ріг, 2017. С. 199.

82. Закусило Р. В. Низкоскоростные процессы детонации в тонких трубках. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка. Суми, 2018. С. 20–22.

83. Закусило Р. В. Технологічні основи побудови безпечних процесів виробництва вибухових матеріалів. *Збірник наукових праць XIV наукової конференції «львівські хімічні читання – 2013»*, м. Львів. Львів, 2013. С. 48.

84. Исследование процесса получения кристаллов KNO_3 сферической формы изогидрическим методом / В. В. Комаров та ін. *Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Хімічна технологія та виробництво» Шостка, 2014*, м. Шостка. Суми, 2014. С. 41.

85. Романченко А. М., **Закусило Р. В.** Експериментальне дослідження параметрів низькоенергетичних зарядів кар'єрного виготовлення. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка. Суми, 2018. С. 48–49.

86. Специфічні деформаційні явища в прикладній геодинаміці вибуху / В. Г. Кравець та ін. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 23–25 жовт. 2022 р. Суми, 2022. С. 28–35.

87. Технологічні аспекти керування крайовими явищами в умовах масового вибуху / В. Г. Кравець та ін. *Збірник наукових праць V Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 20–22 жовт. 2021 р. Суми, 2021. С. 83–90.

88. Шукуров А. М., Кравець В. Г., **Закусило Р. В.** Теоретичні дослідження силового поля при вибуху нециліндричних зарядів. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка. Суми, 2018. С. 15–17.

89. Войтенко Ю. І., **Закусило Р. В.** Про енергетичні матеріали для збільшення потужності зарядів вибухових речовин. *Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 27–29 лист. 2024 р. Суми, 2024. С. 58–61.

90. Войтенко Ю. І., **Закусило Р. В.** Оцінка часу розвитку теплового вибуху заряду вибухової речовини в оболонці при інтенсивній тепловій дії. *Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 27–29 лист. 2024 р. Суми, 2024. С. 66–69.

91. Кравець В., **Закусило Р.**, Шукуров А., Закусило Д. Особливості моделювання силового поля вибуху системи суміжних зарядів. *Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 27–29 лист. 2024 р. Суми, 2024. С. 43–48.

АНОТАЦІЯ

Закусило Р.В. Наукові основи впровадження низькошвидкісних процесів детонації на відкритих гірничих роботах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин. - Шосткинський інститут Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України, Державний університет «Житомирська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Житомир, 2025.

Виконання комплексу досліджень, спрямованих на розвиток вибухової техніки на основі низькошвидкісних процесів детонації та керування їх потенційними можливостями в наземному гірництві шляхом добору енергетично ефективних, стабільних за детонаційною здатністю, екологічно необтяжливих вибухових речовин і їх композицій, в т.ч. місцевого приготування.

В роботі теоретично обґрунтовано та експериментально перевірено концепції струсного хвильового механізму формування пилоповітряної вибухової суміші під дією стартового імпульсу, з поширенням в коаксіальному хвилеводі стійкого детонаційного фронту. Досліджено механізм детонації через комутаційний блок в 2, 3 і 4-х відгалуженнях. Науково опрацьовано спосіб безпечного виготовлення бойовиків на місці виконання робіт. Виконано термогравіметричні дослідження розкладання вибухових сумішей на основі невибухових компонентів. Встановлено, що хімічний потенціал суміші аміачної селітри та нітрометану найвищий серед всіх розглянутих у роботі.

Досліджено вплив форми бойовика на ефективність ініціювання детонаційного процесу. Розроблено сімейство ЕВР «Азнітро», яке було запатентовано в Україні та впроваджено у виробництво в Республіці Азербайджан. В розвиток техніки ощадливого відділення блоків декоративного каменю створено гетерогенну вибухову композицію на основі ДП або нітрометану і окислювача-перхлорату калію з стійким низькошвидкісним детонаційним режимом без порушень структури відділюваного кам'яного блока. Встановлено, що показник сейсмічності масового вибуху з варіантом комутації за допомогою системи НСІ «Хвиля» знижується в 1,9 рази порівняно з методом комутації детонуючим шнуром.

Перехід на вибухові системи місцевого приготування, які виготовлено з невибухових матеріалів, кардинально вирішує безпекову проблему, практично виключаючи технологічні ризики поза межами гірничого підприємства; розглянуто перспективи застосування низькошвидкісних засобів ведення вибухових робіт з використанням особливостей розвитку зони незворотних деформацій під впливом пружних сил післядії, врахуванням специфіки формування в міжзарядному просторі взаємодіючих силових полів з метою підсилення механічного ефекту вибуху в потрібному напрямку в умовах масових вибухів. Розрахунки економічної ефективності впровадження вітчизняної низькошвидкісної детонаційної системи ініціювання НСІ в комплексі з проміжними ініціаторами та інертними розгалужувачами свідчать що в умовах масових вибухів свердловинних зарядів за річної продуктивності підприємства в 1,0 млн м³ видобутої гірської маси економічний ефект від впровадження пропонованих розробок становитиме понад 3770000 грн.

Ключові слова: руйнування, консолідація, низькошвидкісні процеси, місцеве приготування, термогравіметрія, детонуючий хвилевод, пилоповітряна суміш, безкапсульний комутаційний блок, розгалуження, бойовик, пероксид водню, гліцерин, нітрати, аміачна селітра, Енергія Гіббса, конічний заряд, емульсійна вибухова речовина, шпуровий К-заряд, перхлорати, оксид марганцю, нітрометан, блочний камінь, неелектрична система ініціювання, короткоуповільнений режим, свердловинний заряд, сейсмічний ефект, технологічні ризики.

ABSTRACT

Zakusylo R. V. Scientific foundations for the implementation of low-speed detonation processes in open-pit mining. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Science in the field of 05.15.03 – open pit mining of mineral deposits. – Shostka Institute of Sumy State University of the Ministry of Science and Education of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University of the Ministry of Science and Education of Ukraine, Zhytomyr, 2025.

The dissertation is dedicated to carrying out a complex of studies focused on the development of explosive technology based on low-speed detonation processes and managing their potential in open-pit mining by selecting energy-efficient, stable detonation ability, environmentally safe explosives, and their compositions, including local preparation. To fulfill the work's tasks, analytical, thermogravimetric, microscopic, and polygonal methods were used to study the conditions of explosive transformation of the proposed compositions, establish rational physical and technological parameters of domestic low-speed blasting systems of local preparation, and ensure their stable and safe functioning in mining engineering.

The studies considered a cylindrical shell elongated charge with an application to the inner surface of an explosive layer with a thickness less than the critical diameter. Such a layer has practically no effect on the mechanical properties of the shell. The theoretical justification and experimental verification were performed for a shock wave mechanism for the dust-air explosive mixture formation under the starting initiating pulse, the genesis, and propagation of a stable detonation front in a coaxial shock tube in a subcritical mode. The equation of motion for the axisymmetric case was used to study the waves of elastic deformations in the shell under which the explosive is sprayed.

In the phenomenon development, the detonation mechanism was researched through a passive splitter (or switching block) in the 2, 3, and 4 branches. During the experiments, it was found that the manufacture of switching blocks (splitters) is possible from various materials (rubber, copper, steel, aluminum, plexiglass, polystyrene, PVC, and fluoroplastic). At this time, the detonation is stably transmitted through an unfilled explosive section of the cavity of the connecting device for a distance of no more than 150 mm. Tests have shown that the device allows failure-free detonation transmission into four shock-tube sections. The maximum pressure in the wave is 6.5 MPa. Based on experiments, it can be concluded that such tasks as initiating dispersed charges, as well as eliminating waveguide bumping, can be solved by using capsule-free switching blocks, which significantly reduce waveguide consumption, especially in conditions of well-charge dispersion.

A significant part of the research is devoted to improving the means of initiating industrial borehole charges to implement in practice the technique of safe production of

intermediate detonators at the mining area, which is relevant for the economy and environment. A promising direction in this field is the development of explosive compositions from non-explosive raw materials. In laboratory conditions, thermogravimetric studies of the decomposition of explosive mixtures based on hydrogen peroxide and glycerin were performed using additional oxidizers (calcium, potassium, and sodium nitrates). Compared with the composition based on hydrogen peroxide and glycerin with impurities, an alternative explosive composition based on ammonium nitrate and nitromethane was developed. Gibbs Energy was calculated for the most promising explosive mixtures.

The work carried out experimental studies of the influence of the shape of intermediate detonators on their initiating ability in a borehole charge. The designs of intermediate detonators with a taper angle from 15° to 45° were studied, and the possibility of increasing the efficiency of an intermediate detonator in the form of a truncated cone while reducing its mass compared to the traditional one was proven.

During scientific research, the focus was on the invention of domestic analogs of modern emulsion explosives in terms of achieving high physical stability, increased explosive capacity, low toxicity, a wide range of use conditions with the availability of raw materials, and high safety of manufacture and application. Together with Azerbaijani colleagues, the Aznitro emulsion explosives were developed. They were patented in Ukraine and introduced into production in the Republic of Azerbaijan, where emulsion explosives can be used for blasting in mining engineering.

The relevance of domestic low-detonation means of blasting development is essential for the direction associated with the growth in Ukraine of the technique of economical separation of decorative stone blocks. Accordingly, the work has researched the heterogeneous explosive system invention that guarantees a stable low-speed detonation mode of dynamic loading of the environment by the explosion and provides sufficient tensile stresses in the plane of the blasting charges without the structure disruption of the separated stone block. The system is based on the rejection of traditional nitro-esters and sensitizers, which are dangerous for transportation and technological manufacture, by replacing them with safe components, such as diesel fuel or nitromethane as a fuel and potassium perchlorate as an oxidant, as well as manganese oxide (IV), as a thermal decomposition catalyst.

The studied compositions have low explosion temperatures, the heat of the explosion, and insignificant volume of gaseous products. In addition, it was experimentally established that the developed K - charges reliably work from standard electric detonators ED-8 and detonating cord DSHE-12. The graph of change in Gibbs energy for the composition of potassium perchlorate with nitromethane indicates the change in the direction of the reaction at 5890°C . This indicator significantly exceeds the standard Gibbs energies for standard industrial explosives. An isohydric method for obtaining spherical crystals of high-energy materials in a crystallizer-modifier was developed.

As a result of the scientific developments carried out, the domestic mining industry received several practical proposals aimed at improving the key points of progress in modern explosives, mainly in open-pit mining, which may be valid for the industry in the coming years. Among these developments is the stable and safe domestic non-electric initiating system, based on a low-speed detonation mode, which, in combination with passive blocks (splitters), exponentially reduces the cost of the shock tube and the time for

switching the explosive network, and mining receives new opportunities to regulate the mechanical effect and exponentially reduce seismic activities during the explosion of borehole charge systems of limited length. It was established that the seismicity index of a mass explosion with the switching method using non electric initiation system "Khvylyya" is reduced by 1.9 times compared to the switching method with a detonating cord. The industrial emulsion explosive mixture Aznitro, with means of low-speed initiation, ensures the physical stability of systems and reduces the cost of rock destruction, safety for people, and the environment of technological processes. Intermediate detonators (booster) based on local non-explosive components (ammonium nitrate, hydrogen peroxide, glycerin) that are fundamentally new in composition, design, and safety eliminate the need for TNT and TNT-hexogen analogs. A domestic safe explosive system of the K-charges type of local preparation based on low-velocity mixed explosives - potassium perchlorate and diesel fuel (nitromethane) for the extraction of valuable stone raw materials has been developed; the transition to locally prepared explosive systems made of non-explosive materials fundamentally solves the safety problem, practically eliminating technological risks outside the mining enterprise. The prospects and directions of the application of low-speed means for conducting industrial blasting operations are considered, using the sequence and features of the development of the irreversible deformations zone under the influence of elastic aftereffect forces, taking into account the specifics of the formation of interacting force fields in the inter-charge space to enhance the mechanical effect of the explosion in the desired direction under conditions of mass explosions, which fundamentally raises the level of the technologies under consideration.

The study of the application feasibility of the domestic initiating system in a mass explosion using the solutions proposed in the work showed that in combination with inert splitters in conditions of mass explosions of borehole charges with an annual productivity of the enterprise of 1.0 million m³ of mined rock mass, the economic effect of the implementation of the proposed developments will be over 3.770.000 UAH.

Keywords: fragmentation, mine consolidation, low-speed detonation processes, local preparation, thermogravimetry, shock tube, dust-air mixture, capsule-free switching block, branching, booster, hydrogen peroxide, glycerin, nitrates, ammonium nitrate, Gibbs Energy, conical charge, emulsion explosive, borehole K-charge, perchlorates, manganese dioxide, nitromethane, block stone, non-electric initiation system, short-delay blasting, borehole charge, seismic effect, technological risks.

