

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Факультет будівництва
Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
дипломної роботи магістра

Галузь знань – 18 «Виробництво та технології»

(шифр і назва галузі знань)

Спеціальність – 184 «Гірництво»

(код і назва спеціальності)

Освітній рівень – магістр

(назва освітнього рівня)

кваліфікація – 2147.2 «Інженер з гірничих робіт»

(код і назва кваліфікації)

на тему: Закономірності ініціювання світлочутливих вибухових речовин лазерним випромінюванням.

Виконавець: Забора Вячеслав Юрійович

Студент 6 курсу, групи 184 м -17-3

Забора В.Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
роботи	Соболев В.В.		
розділів:			
Аналіз літератури за темою магістської роботи			
Експериментальна установка оптичного квантового генератора			
Ініціюючі вибухові речовини для вибухових лазерних систем			

Рецензент			
------------------	--	--	--

Нормоконтроль			
----------------------	--	--	--

Дніпро
2018

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри будівництва,
геотехніки і геомеханіки

«___» _____ Гапєєв С.М.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи магістра
спеціальність 184 «Гірництво», спеціалізація «Вибухові технології та
матеріали»

(код і назва спеціальності)

студенту 184 м -17-3 Заборі Вячеславу Юрійовичу
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи: Закономірності ініціювання світлочутливих вибухових речовин лазерним випромінюванням.

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора Державного ВНЗ НТУ «ДП» від _____ № _____

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Мета роботи. Експериментальні дослідження залежності енергетичних параметрів ініціювання детонації від характеристик лазерного випромінювання та вихідних даних зарядів світлочутливих вибухових речовин.

Об'єкт дослідження. Вплив лазерного випромінювання на фізичні та хімічні перетворення у енергонасиченій речовині.

Предмет дослідження. Закономірності ініціювання детонації світлочутливих вибухових речовин лазерним імпульсним випромінюванням.

3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наукова новизна..

Вперше встановлено, що поглинаючі домішки у світлочутливі ВР не сприяють підвищенню їх чутливості.

Експериментально встановлено, що при ініціюванні світлочутливих ВР лазерним випромінюванням виявляється розмірний ефект – залежність порогу ініціювання від розміру і геометрії зони дії, який не залежить від довжини хвилі випромінювання, тривалості і потужності.

4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Магістерська робота виконана згідно наукових досліджень кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», відповідно до Кодексу України про надра, Гірничому закону України, Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» та інших актів законодавства, які видаються відповідно до перелічених вище законів.

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Розділ	Найменування етапів роботи	Строки виконання робіт (початок – закінчення)
I	Аналіз літератури за темою магістерської роботи.	05.09.-25.09.2018
II	Експериментальна установка оптичного квантового генератора.	25.09.-25.10.2018
III	Ініціюючі вибухові речовини для вибухових лазерних систем.	25.10.-29.11.2018

6 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Магістерська робота оформлюється з вимогами ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К. : Держстандарт України, 1995. – 38 с.

Завдання видав _____

(підпис)

Соболев В.В.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Забора В.Ю.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 05.09.2018

Термін подання дипломної роботи до ДЕК _____

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 63 с., 14 рис., 5 табл., 3 додатки., 105 джерел.

Предмет дослідження. Закономірності ініціювання детонації світлочутливих вибухових речовин лазерним імпульсним випромінюванням.

Об'єкт дослідження. Вплив лазерного випромінювання на фізичні та хімічні перетворення у енергонасиченій речовині.

Мета роботи. Експериментальні дослідження залежності енергетичних параметрів ініціювання детонації від характеристик лазерного випромінювання та вихідних даних зарядів світлочутливих вибухових речовин.

Використано методику визначення функції розподілу щільності енергії в перетині лазерного пучка, заснована на вимірі лазерних відбитків на матеріалі, що зазнає фазового перетворення при світловому впливі.

Перший розділ містить огляд літературних джерел за темою магістерської роботи, аналіз історії та сучасного стану в розвитку світлочутливих ініціюючих ВР. Показуються часові характеристики ініціювання вибухових речовин лазерними імпульсами. У другому розділі досліджуються технічні характеристики оптичного квантового генератора та вимірювання енергетичних характеристик лазерного пучка, розмірний ефект. Третій розділ стосується безпосередньо ініціюючих вибухових речовин для лазерних систем ініціювання. Приводяться приклади найбільш підходящої вибухової речовини (ВР) та переваги її застосування.

Практична цінність полягає у створенні нових світлочутливих вибухових композицій для оптичних детонаторів з використанням таких фізичних характеристик як час затримки запалювання світлочутливих ВР, вплив розміру зони дії лазерного випромінювання на чутливість первинних ВР та підтвердження прояву розмірного ефекту при лазерному ініціюванні.

Ключові слова: вибухова речовина, світлочутливість, лазер, випромінювання

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТРСЬКОЇ РОБОТИ	
1.1 Чутливість вибухових речовин до дії лазерного випромінювання.....	8
1.2 Особливість ініціювання вибухових речовин вузькими лазерними пучками.....	18
1.3 Часові характеристики ініціювання вибухових речовин лазерними імпульсами.....	26
2. РОЗДІЛ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ОПТИЧНОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.	
2.1 Технічні характеристики оптичного квантового генератора.....	31
2.2 Вимірювання енергетичних характеристик лазерного пучка.....	33
3. РОЗДІЛ. ІНІЦІЮЮЧІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ ДЛЯ ВИБУХОВИХ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ	
3.1 Критерії ініціювання бризантних вибухових речовин та перехідні процеси в бризантних вибухових речовинах.....	45
3.2 Світлочутливі вибухові речовини для лазерного ініціювання.....	47
4. РОЗДІЛ.	
ВИСНОВОК.....	55
5. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57

ВСТУП

Підвищення рівня безпеки, прецизійності і ступеня надійності проведення вибухових робіт в різноманітних галузях промисловості сприятимуть організації і розвитку науково-технічних досліджень в області створення сучасних світлочутливих вибухових композитів і систем їх ініціювання, побудованих на нових фізичних принципах.

Однією з таких систем, що володіють високою стійкістю до різноманітних електромагнітних впливів, являється оптична система ініціювання, що використовує лазерний імпульс в якості фактора ініціювання ВР. Важливим елементом оптичної системи є первинні ініціюючі вибухові речовини (ВР). Так штатні первинні ВР, що характеризуються низькою чутливістю до дії лазерного випромінювання і високою небезпекою їх використання в детонаторах лазерних систем є неприйнятними елементами для створення прецизійних оптичних систем ініціювання, стійких до зовнішніх електромагнітних впливів.

Основна проблема, від вирішення якої залежить створення, застосування і розвиток оптичних систем ініціювання, полягає в розробці технології виробництва високочутливих до дії лазерного імпульсу вибухових речовин. Синтез світлочутливих ВР, які володіють досить високою потужністю для ініціювання бризантних ІВР, відносно низькою чутливістю до механічних і теплових впливів, що не перевищують чутливість вторинних ВР, є першочерговою актуальною задачею.

Мета – експериментальні дослідження залежності енергетичних параметрів ініціювання детонації від характеристик лазерного випромінювання та вихідних даних зарядів світлочутливих вибухових речовин.

Об'єкт дослідження. Вплив лазерного випромінювання на фізичні та хімічні перетворення у енергонасиченій речовині.

Предмет дослідження. Закономірності ініціювання детонації світлочутливих вибухових речовин лазерним імпульсним випромінюванням.

Відповідно до мети було визначено наступні задачі досліджень:

1. Провести аналіз результатів досліджень чутливості вибухових речовин до дії лазерного імпульсного випромінювання.

2. Встановити залежність часу затримки займання ВС-2 від щільності енергії лазерного випромінювання.

3. Встановити вплив розміру зони дії лазерного випромінювання на чутливість ртутної солі 5-гідразинотетразола в інертній матриці полімеру (ВС-2).

Наукова новизна. Вперше встановлено, що поглинаючі домішки у світлочутливі ВР не сприяють підвищенню чутливості вибухових речовин.

Експериментально встановлено, що при ініціюванні світлочутливих ВР лазерним випромінюванням виявляється розмірний ефект – залежність порогу ініціювання від розміру і геометрії зони дії, який не залежить від довжини хвилі випромінювання, тривалості і потужності.

Встановлено, що залежність часу затримки запалювання світлочутливих вибухових композитів (на прикладі ВС-2) від щільності енергії лазерного випромінювання має експоненційний характер: час затримки збільшується зі зменшенням щільності енергії.

Практична цінність полягає у створенні нових світлочутливих вибухових композицій для оптичних детонаторів з використанням таких фізичних характеристик як час затримки запалювання світлочутливих ВР, вплив розміру зони дії лазерного випромінювання на чутливість первинних ВР та підтвердження прояву розмірного ефекту при лазерному ініціюванні.

1. ЧУТЛИВІСТЬ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ДО ДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Аналіз літератури за темою магістерської роботи.

Систематичні дослідження процесу запалювання ВР імпульсними потоками світла відносяться до початку шестидесятих років минулого століття. Як джерело світла використовувалися кварцові імпульсні лампи, сильноточний іскровий розряд в повітрі, фронт ударної хвилі. Довжина світлових імпульсів перебувала в межах $10^{-3} - 10^{-6}$ с. Вивчалася дія світла на азиди срібла, свинцю, нітрид срібла, ТЕНа, стифнат свинцю та інші речовини. Результати досліджень найбільш детально викладені в роботах Ф. Боудена, А. Йоффе [1] і Д. Росса [2].

Для дослідження механізму запалювання були виміряні спектри поглинання ряду ВР на спеціально приготовлених для цих цілей зразках. Так, азид срібла використовувався у вигляді тонких прозорих пластинок товщиною 0,1 - 0,01 мм. Результати вимірювань [1] показали, що при кімнатній температурі ця речовина сильно поглинає світло з довжиною хвилі менше $\lambda = 0,35$ мкм. Коефіцієнт поглинання при $\lambda = 0,3$ мкм складає приблизно 10^3 см^{-1} і різко збільшується при подальшому зменшенні довжини хвилі. При $\lambda > 0,385$ мкм, аж до ближньої інфрачервоної області спектра, поглинання невелика. Подібні результати отримані і для інших вибухових речовин, таких як азиди талію, свинцю, фульмінат срібла, стифнат свинцю, ТЕН.

Дані з вимірювання спектральних коефіцієнтів поглинання ВР дозволили запропонувати тепловий механізм запалювання, який полягає в тому, що світло синьої і ультрафіолетової частини спектра, поглинаючись в тонкому шарі ВР (товщиною 10^{-3} - 10^{-4} см), викликає його розігрів, достатній для ініціювання хімічної реакції. На важливу роль короткохвильового випромінювання в запалюванні ВР вказують експерименти по запалюванню стифнат свинцю світлом від іскрового розряду [1]. Між іскровим проміжком і ВР

встановлювався кварцовий екран або водяний фільтр. Енергії запалювання в обох випадках виявилися близькими, незважаючи на те, що інфрачервоне випромінювання послаблювалося водяним фільтром в значно більшій степені, ніж кварцевою пластинкою.

Висновок про визначальну роль в процесі запалювання тонкого поверхневого шару речовини підтверджується рядом інших результатів. Наприклад, в [2] повідомляється, що ініціювання азида свинцю не залежить від чистоти матеріалу, дисперсності, щільності зразка. Крім того, в даній роботі відмічено вплив розльоту продуктів розкладання речовини на параметри запалювання, що характерно для більших показників поглинання ВР [3]. Вивчалася також мінімальна енергія запалювання в залежності від початкової температури зразка ВР [1]. Показано, що між енергією запалювання і температурою ВР існує лінійна залежність. Збільшення температури призводить до зниження енергії ініціювання, що узгоджується з теорією поверхневого теплового запалювання [4].

Більш детальні дослідження, зокрема вимірювання фотопровідності, показали, що на початковій стадії процесу ініціювання поряд з чисто тепловим розкладанням речовини можливе протікання фотохімічної реакції при впливі випромінювання, спектр якого відповідає області поглинання речовини. Так, при запалюванні азидів металів спочатку відбувається фотохімічні розкладання поверхневого шару речовини, а потім тепло, що виділилося при розкладанні, прискорює розвиток реакції по тепловому механізму [1].

Таким чином, в результаті проведених експериментальних і теоретичних досліджень ініціювання ВР імпульсними джерелами світла суцільного спектра встановлено, що процес запалювання розвивається в поверхневому шарі речовини в результаті його розігріву ультрафіолетовим і синім випромінюванням. З появою оптичних квантових генераторів почалися дослідження процесу запалювання ВР лазерним випромінюванням. Більшість експериментів проведено з використанням наносекундних (тривалість імпульсу

$\tau = 20\text{-}50$ нс), мікросекундних ($\tau = 0,5 - 0,7$ мкс) і мілісекундних ($\tau \sim 1$ мс) імпульсів неодимового (довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм) і рубінового ($\lambda = 0,69$ мкм) лазерів.

Аналізуючи отримані результати, зупинимося на питаннях, що мають відношення до проблем механізму запалювання ВР і практичних застосувань методу лазерного ініціювання.

Незважаючи на те, що велика частина досліджених ВР слабо поглинають випромінювання неодимового і рубінового лазерів, отримані в ряді робіт значення критичних густин енергії запалювання виявилися порівняно меншими відповідних щільності енергій, виміряних при ініціюванні джерелами світла суцільного спектра. Це видно з табл. 1.1, в якій наведено відомі в наш час літературні дані. Крім цього, можна було очікувати, що результати досліджень покажуть, що чутливість до дії лазерного імпульсу ініціюючих ВР значно вище, ніж чутливість вторинний ВР. Іншими словами, загальновизнаний ряд чутливості ВР, в основному, корелює з чутливістю до лазерного впливу.

Таблиця 1.1 - Критичні щільності енергії запалювання ВР імпульсом ОКГ

Найменування ВР	Довжина хвилі випромінювання λ , мкм	Тривалість імпульсу τ , с	Порогова густина енергії запалювання $E_{л}$, Дж/см ²	Коментарій	Джерело інформації
Азид срібла	1,06	$5 \cdot 10^{-8}$	0,02	Пуста поверхність. Тиск при пресуванні $P_{пр}=0,5$ кбар	[8]
—"	—"	10^{-3}	2,1	—"	[8]
Азид свинцю	—"	$5 \cdot 10^{-8}$	0,1	—"	
—"	—"	10^{-3}	3,0	—"	
Гримуча ртуть	—"	$5 \cdot 10^{-8}$	1,0	—"	
—"	—"	10^{-3}	3,0	—"	
ТНРС	—"	$5 \cdot 10^{-8}$	0,4	—"	

—"	—"	10^{-3}	2,2	—"	
Азид свинцю	—"	10^{-3}	0,8	$P_{пр}=15$ кбар	[9]
—"	—"	$3 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	—"	
—"	—"	$6 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	—"	[10]
—"	—"	10^{-7}	0,8	Насыпна густина	[11]
β -азид свинцю	0,69	$8 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Монокристали 40 мкм×200 мкм×10 мм	
ТЕН	—"	$4 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10$	Тиск при нажатті: $P_{ВН}=20$ кбар	[6]
—"	—"	—"	10^3	$P_{ВН}=100$ бар	
—"	0,69	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$P_{ВН}=14$ кбар	
—"	1,06	$3 \cdot 10^{-9}$	10^3-10^4	Вільна поверхність	[13]
Октоген	0,69	$3 \cdot 10^{-8}$	15	$P_{ВН}=100$ бар	
Гексоген	—"	—"	30	—"	[6]
Піроксилін	1,06	—"	60	—"	
$0,45Si + 0,55P_3O_4$	—"	10^{-3}	10,6	—"	
—"		$2 \cdot 10^{-8}$	2,9	—"	[14]
$0,25Al+0,75KC10_4$	—"	10^{-3}	6,6	—"	
—"	—"	$2 \cdot 10^{-8}$	5,0	—"	

Викликає інтерес особливість ініціювання вторинних вибухових речовин, яка полягає в тому, що процесу ініціювання сприяє наявність поблизу поверхні ВР скляної пластинки, що затрудняє розльот продуктів розпаду речовини. Так, в роботі А.А.Волкової та ін. [5] не отриманий підрив ТЕНа з відкритої поверхні при енергії лазерного випромінювання, яка в 40 разів перевищує порогову енергію ініціювання зі скляною пластинкою.

Тривалість лазерного імпульсу дорівнювала 50 нс. У цій же роботі вивчена залежність порогової енергії ініціювання ТЕНа від товщини контактуючої з ним прозорої Δ підкладки Δ : ця енергія не залежить від товщини підкладки при $\Delta > 0,06$ мм і зростає при $\Delta < 0,06$ мм. Ефект зниження порогу запалювання при наявності прозорої перешкоди поблизу поверхні ВР, на думку авторів [6,7], досягається за рахунок зменшення енерговитрат при розвантаженні речовини в хвилі розрідження.

Створені останнім часом потужні лазерні системи дозволили провести експерименти з перевірки можливості лазерного ініціювання вторинних ВВ з вільної поверхні [8]. Дослідження показали, що флегматизований ТЕН може бути ініційований імпульсом неодимового лазера тривалістю 4 нс з щільністю енергії $10^3 - 10^4$ Дж / см². У цій роботі повинен бути таким механізм ініціювання: в результаті випаровування матеріалу в твердій речовині збуджується ударна хвиля, інтенсивність якої достатня для ініціювання детонаційного перетворення речовини.

В роботі [3] отримано чисельне рішення рівнянь газової динаміки і хімічної кінетики, що описують процес лазерного ініціювання ТЕНа з відкритої поверхності. Показано, що основні втрати енергії обумовлені розльотом випаруваної речовини. За рахунок імпульсу віддачі парів в об'ємі ВР формується хвиля навантаження, яка при певній амплітуді може стати причиною підриву ВР. Уявлення про процес запалювання з відкритої поверхності вторинних ВР, що розвиваються в роботах [3,13], корелюють і взаємно доповнюють один одного.

З табл.1.1 випливає, що існує залежність чутливості ВР від тривалості лазерного імпульсу. Для всіх досліджених речовин відмічено, що збільшення тривалості імпульсу призводить до зростання порогу запалювання [8-11,14]. На жаль, це питання вивчено недостатньо добре. Тільки в роботі [10] проведено вимірювання порогової щільності енергії ініціювання азиду свинцю при плавній зміні тривалості імпульсу в діапазоні (7,5-100) нс. Експеримент

показав, що збільшення тривалості впливу призводить до підвищення порогу запалювання. Зазначеному діапазону зміни тривалості впливу відповідає діапазон щільності енергії ($5 \cdot 10^{-3}$ - $3 \cdot 10^{-2}$) Дж / см².

До факторів, що впливає на ініціювання ВР випромінювання третьому ОКГ, слід віднести і початкову температуру зразка. Так, в роботі [9] зазначено на незначне підвищення чутливості зарядів азида свинцю при збільшенні початкової температури на 150 °С, якщо використовується режим вільної генерації лазера (імпульс загальною тривалістю ~ 1 мс, що складається з окремих окремих $\tau \sim 0,6$ мкс, що слідує один за одним з періодом в декілька мікросекунд). У режимі гігантського імпульсу ($\tau = 30$ нс) вплив температури нагріву зразка на чутливість не виявлено.

Цілком логічне припущення про можливість зниження енергетичних порогів займання конденсованих середовищ променистою енергією при введенні добавок з високим коефіцієнтом поглинання, наприклад, таких як сажа. Для з'ясування цього питання в роботі [7] досліджено ініціювання моноімпульсом рубінового лазера модельних сумішей ТЕНа з різними добавками. Як добавки використовувались порошки металів (Al, Be, Zn, Ti, Sn, Si, Mg, W, V, Pb, Hf, Cr, Cu), окислювачів (FeO, MgO, SiO, PbO) і сажі. Частку енергії, що поглинається сумішшю, оцінювали з урахуванням експериментально визначеного показника ослаблення випромінювання, величина якого визначається, в першу чергу, оптичними властивостями добавки, розмірами її частинок і процентним вмістом. Експерименти показали, що запалювання, в значній степені, визначається взаємодією парів речовини добавки з ТЕНОм. Сліди випаруваної речовини спостерігаються на поверхні оптичного екрану при впливах, що не викликають займання.

Більш детальні дослідження суміші ТЕНа з дрібнодисперсним алюмінієм (середній розмір часток 2,2 мкм) [15] показали, що введення 1-3 % алюмінію різко збільшує чутливість до дії моноімпульса, але не змінює детонаційних характеристик суміші. На думку авторів, це пов'язано з надзвичайно високою

ефективністю хімічної взаємодії газофазного алюмінію з активним середовищем.

Результати дослідження [7] свідчать, що введення добавок С, Cu, MgO, SiO знижує чутливість ТЕНа, тобто добавки цих матеріалів грають роль флегматизатора. Цей ефект пояснюється тим, що пари цих речовин є інертними по відношенню до ТЕНу. Однак в роботі [16] отримано збільшення чутливості ТЕНа до дії лазерного моноімпульса при введенні добавки сажі в межах 0,1 – 1%. На відміну від [7], в цих експериментальних випромінюваннях лазера фокусувалася в пляму діаметром 0,6 мм на зразки ВР, поміщені в збірку (пресовану форму) разового користування, де вони підтискають пуансоном до оргскла товщиною 5 мм до тиску 1,76 кбар. Високий тиск пресування дозволив різко знизити початкову газопроникність системи, а значно більша товщина скла в порівнянні з наведеною в [7] і менша площа впливу обумовлювали можливість отримання в сформованому вогнищі тиску, істотно перевищує досягнуті в [7].

Автори [17] показали, що низькопористі зразки ТЕНа з добавками алюмінію підтискалися, як і в роботі [16], до тиску 2 кбар, при цьому, добавка порошку алюмінію до 1 % майже на три порядки збільшує чутливість до лазерного імпульсу зразків ТЕНа низької пористості при атмосферному тиску і приблизно в 30 разів при тиску ≈ 2 кбар. Ступінь впливу тиску залежить від змісту порошку алюмінію. Збільшення тиску від атмосферного до 2 кбар призводить до зменшення критичної щільності енергії ініціювання в 125 разів для випадку займання чистого ТЕНа і тільки в 3 рази для сумішей з вмістом алюмінію 5-10 %. Мінімальні щільності енергії запалювання, досягнуті в роботі [17], становили величину $\leq 0,1$ Дж / см².

Закономірності ініціювання системи окислювач-пальне при впливі лазерного моноімпульса досліджувалися в [18]. Виявлений в роботі ефект хімічної взаємодії компонент проявляється в тому, що на залежностях критичних параметрів від складу суміші спостерігається мінімум їх значень

поблизу стехіометричного співвідношення. Такий мінімум має місце практично для будь-якої пари - перхлорат алюмінію - пальне. Однак, коли в ролі пального виступає ВР з індивідуально високим рівнем реакційної здатності (ініціюючі ВР), процеси хімічної взаємодії компонентів не вносять помітного внеску в ініціювання, яке в даному випадку визначається поведінкою самої ВР.

Можливим фактором, що впливає на чутливість ВР, може бути довжина хвилі лазерного випромінювання. Експерименти, які описані в роботі [18], показують, що чутливості ВР до дії випромінювання рубінового і неодимового лазерів, в межах точності експерименту, збігаються. Дослідження, присвячені вивченню впливу модової структури через випромінювання на чутливість азиду свинцю, вказують на незначне підвищення чутливості ВР при ініціюванні лазером, що працює в одномодовому режимі, в порівнянні з багатомодовим [19].

Вплив тиску пресування на поведінку ВР в полі лазерного випромінювання вивчено в основному для азиду свинцю [20]. Було встановлено, що в інтервалі тисків $(1,0-15) \cdot 10^3$ бар в режимі вільної генерації чутливість азиду свинцю несуттєво підвищується з ростом тиску пресування. Зовсім інший характер носять ці ж залежності при дії моноімпульсу: існують дві чітко виділені області, в межах яких чутливість майже постійна - область низької чутливості, відповідна малим тискам пресування ($P_{пр} < 300$ бар), і область високої чутливості, відповідна високим тискам ($P_{пр} > 1500$ бар). У дуже вузькій перехідній зоні тисків пресування чутливість змінюється на два порядки.

Чутливість ВР залежить також від тиску прижаття $P_{вн}$ зразка до оптичного скла. Так, в [6,8] показано, що для всіх досліджених речовин (гримуча ртуть, ТНРС, азиди свинцю, срібла, кадмію, ТЕН, октоген, гексоген, піроксилін) з ростом зовнішнього тиску критична густина енергії запалювання знижується. Для азидів срібла і свинцю, крім того, виявлено гістерезис залежності $E_{кр}(P_{вн})$, яка полягає в тому, що при скиданні тиску і поступовому впливі величина $E_{кр}$ залишається на рівні, відповідному максимальному тиску

притиснення. Для інших ВР гістерезис залежності $E_{кр}$ ($P_{вн}$) невиявлений, при скиданні зовнішнього тиску чутливість відновлюється.

Для практичних цілей, а також для розуміння механізму запалювання важливе значення мають дослідження оптичних властивостей ВР. В [2, 8,21-27] виміряні показники ослаблення k_λ і коефіцієнти дифузного віддзеркалення R_λ ряду ВР, результати яких представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Показники ослаблення і коефіцієнти відображення деяких ВР.

Найменування ВР	Густина ρ , г/см ³	Довжина хвилі, мкм	k_λ , см ⁻¹	R_λ , %	Коментарій	Джерело
ТЕН	1,0	1,06	155	–	Дисперсність 3000 см ² /г	[2120]
ТЕН	–	0,69	–	79	–	[22]
ТЕН	–	1,06	–	81	–	[22]
ТЕН	1,0	0,69	40	–	–	[8]
Октоген	1,7	0,36	–	87	–	[23]
Октоген	1,7	1,06	6,6	75	–	[22]
Октоген	–	0,69	20	–	–	[8]
Октоген	–	10,6	120	–	–	[22]
Октоген+ 1% сажі	1,7	0,36	–	87	–	[23]
Октоген+ 1% сажі	1,7	1,06	–	75	–	[22]
Гексоген	–	1,06	5,7	71	–	[22]
Гексоген	–	10,6	175	3,5	–	
Азид свинцю	1,5–2,8	0,7	1200	>90	–	
Азид свинцю	–	0,69	–	78	9–20 мкм	
Азид свинцю	–	1,06	–	85	–	[24]
Тетрил	1,5–1,6	10,6	163	5,7	–	
Тетрил	1,62	1,06	18,4	–	–	
Тротил/гексоген (40/60)	1,67	10,6	196	5,2	–	
Тротил/гексоген (40/60)	1,67	1,06	4,3	–	–	

Коефіцієнти відбиття вимірювалися за допомогою інтегруючої сфери кульового фотометра. Для визначення абсолютного значення R_λ застосовувалися еталонні зразки з відомим коефіцієнтом відображення. Як правило, в якості еталона використовувалися баритові зразки. Значення поглинальної здатності k_λ визначалися за величиною пропускання випромінювання таблетками пресованого ВР товщиною 0,1-5 мм.

Як видно з табл. 1.2, велика частина випромінювання на довжині хвилі неодимового і рубінового лазерів відбивається від зразків ВР, а на довжині хвилі CO_2 лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) ситуація зворотна. Поряд з цим, видно, що випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 10,6$ мкм послаблюється в значно більшій степені, ніж випромінювання з довжинами хвиль $\lambda = 1,06$ мкм і $\lambda = 0,69$ мкм. Розкид даних для k_λ , отриманих в різних експериментах, свідчить про важливу роль процесів розсіювання випромінювання в зразках ВР, які залежать від простоти, щільності та дисперсності матеріалу.

В роботі [28] досліджувався вплив лазерного моноімпульса ($\lambda = 1,06$ мкм) на зразки ТЕНа, октогена, тротила при щільності енергії меншої за критичну щільність енергії ініціювання. В цьому випадку спостерігалось утворення кратерів при подачі на ВР енергії E більшої за деяку порогову E_p . При цьому коефіцієнт ослаблення випромінювання зростає при збільшенні E . Цей ефект проявляється в більшій мірі при збільшенні дисперсності ВР. Це говорить про те, що в поверхневому шарі ВР при деяких значеннях щільності енергії, своїх для кожної дисперсності, виникає зона сильного світлопоглинання (так як і коефіцієнт відображення ВР при цьому знижується). На думку авторів [28], відбувається зміна лінійного режиму взаємодії лазерного випромінювання з речовиною нелінійною, що обумовлено фотоіонізацією ВР в поверхневому шарі.

Роль повітря в порах ВР при лазерному впливі незначна. Про це говорять проведені дослідження з заповненням зразків аргоном при тиску 10^5 Па і зразків, вакуумованих до 2,7 Па, не показали різниці в характері кратероутворення. У

разі ж визначальної ролі в ініціюванні оптичного пробою газу відмінні ознаки повинні бути істотними, так як пробійні густини потоку енергії в аргоні і повітрі при атмосферному тиску відрізняються більш ніж на порядок, а при зниженні тиску повітря на п'ять порядків відміну становить два порядки.

1.2. Особливість ініціювання вибухових речовин вузькими лазерними пучками.

До теперішнього часу проведено порівняно невелика кількість досліджень, присвячених вивченню розмірного ефекту, - залежність критичної (порогової) E_k щільності енергії ініціювання від розміру опромінювання (від діаметра лазерного пучка d). Вперше розмірний ефект був виявлений А.А. Брішем, І.А. Галеевим та ін. В роботі [29] на якісному рівні була представлена залежність $E_k(d)$ для азида свинцю (рис.1.1).

Як видно з малюнка, E_k практично не залежить від діаметра пучка, якщо $d > d_0$. Характер залежності $E_k(d)$ для азида свинцю і ТЕНа аналогічний; відмінність у чисельному значенні необхідної для підриву щільності енергії випромінювання і в точці зміни характеру цієї залежності (d_0). Для азида свинцю $d_0 > 0,1$ мм, для ТЕНа дисперсністю $5500 \text{ см}^2 / \text{г}$ - близько $0,6$ мм і зменшується при збільшенні дисперсності. Критична щільність енергії ініціювання (для широких пучків) при підриві азида свинцю була близька до $0,4 \text{ Дж} / \text{см}^2$, для ТЕНа - близько $53 \text{ Дж} / \text{см}^2$. Зазначена залежність критичної щільності енергії від діаметра променя практично зберігається при переході від довжини хвилі $1,06 \text{ мкм}$ (неодимовий лазер) до $0,63 \text{ мкм}$ (рубіновий лазер), що узгоджується з результатами вимірювання коефіцієнта відбиття ВР на цих довжинах хвиль, які виявилися приблизно рівними 80% для азида свинцю і ТЕНа.

Отримані в цій роботі значення d_0 , як буде показано нижче, значно менше виміряних іншими авторами. Можливо, це пов'язано з тим, що досліджувані зразки суттєво різнилися: в роботі [29] і тих же авторів в [11] вибухову

речовину насипної щільності (для ТЕНа це $\sim 1 \text{ г / см}^3$) помістили в прозору оболонку з оргскла з внутрішнім діаметром 10 мм, висотою 5 мм і товщиною стінок 5 мм; інші дослідники використовували пресовані у вигляді таблеток ВР без оболонки.

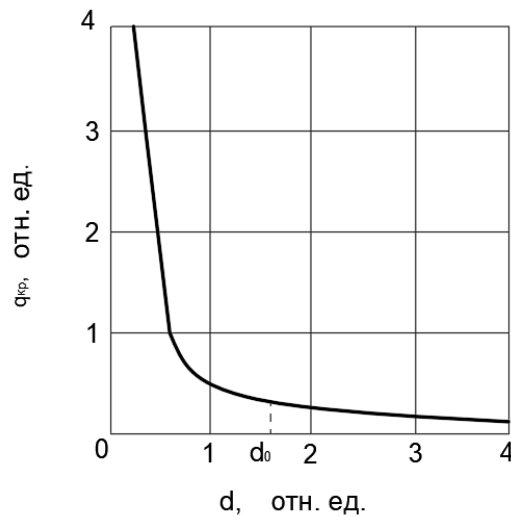


Рисунок 1.1 - Залежність критичної щільності енергії випромінювання $q_{кр}$ від діаметра лазерного пучка d_0 .

Александров В.Є., Долголаптев А.В. та ін. звернули увагу, що існування розмірного ефекту не дозволяє провести зіставлення наявних даних для різних конденсованих середовищ в зв'язку з тим, що досліди проведені при різних значеннях діаметра пучка. Як показав виконання ними аналіз робіт [9, 11, 29, 30], коректне порівняння результатів можна здійснювати, використовуючи узагальнену залежність [7]:

$$\frac{E_{кр}}{E_{кр}^0} = 1 + \frac{1}{(d/d_{кр})^3},$$

де $E_{кр}^0$ - мінімальне (асимптотичне) значення критичної щільності енергії, відповідної $d \rightarrow \infty$, а $d_{кр}$ - критичний діаметр детонації, що характеризує здатність середовища до високошвидкісного хімічного перетворення. Тоді за відносним розташуванням в ряду займистості променистою енергією такі речовини як

гексоген і тетрил повністю відповідають ряду, отриманого для тих же речовин при запаленні їх нагрітим газом [3131].

Найбільш повно розмірний ефект досліджений Є.І. Александровим з співробітниками [28, 3232, 33] на прикладі азида свинцю, пропресованого тиском ≈ 20 кбар. Коефіцієнт відображення зразків ВР дорівнював $R \approx 88$ %. У експериментах використовувався одномодовий одночастотний ОКГ на неодмовому склі, що складається з генератора, що задає, зовнішній підсилювач і двох ідентичних каскадів. Це продиктовано тим, що застосовуються зазвичай багатомодові генератори через наявність складної просторової структури світлового пучка, які не дозволяють вирішити поставлену задачу досить коректно. Загальна енергія випромінювання ОКГ становила 0,5 Дж. Загальна тривалість імпульсу на піввисоті інтенсивності щільності енергії випромінювання в дальній зоні добре описувалася розподілом Гаусса.

Для ініціювання використовувалася центральна частина випромінювання, вирізана круглою діафрагмою, зменшене зображення якої проектувалося за допомогою лінзи з фокусною відстанню $f = 10$ см на поверхню випробуваного зразка. Площина зображення перебувала: грубо - візуально за допомогою свити, точно - по відбитку на фотоплівці, якість кордонів і розмір якого оцінювалися за допомогою мікроскопа. Розчин конуса променів, які формують зображення діафрагми на поверхні азида, не перевищував $8 \cdot 10^{-2}$ радій.

На рис. 1.2 представлені результати вимірювань залежності порогової щільності енергії ініціювання E_k азида свинцю і затримки спалаху τ від діаметра опроміненої зони. Видно, що при зменшенні діаметра пучка критична енергія ініціювання азида свинцю зменшується, але, починаючи з $d \sim 4 \cdot 10^{-3}$ см, спостерігається виположування цієї кривої, тобто $W_k \rightarrow W_{\min}$ при $d \rightarrow 0$. З іншого боку, спостерігається насичення порогової щільності енергії при $r \rightarrow \infty$. Слід звернути увагу, що отримана в цій роботі мінімальна критична енергія $W_{\min} \approx 6$ мкДж при $d_0 \approx 2 \cdot 10^{-3}$ см може вважатися рекордно низькою.

В [10, 34, 35] відзначається важливий для вирішення завдання створення оптичного детонатора факт: статистичний розкид величин $E_{кр}$, $W_{кр}$, на відміну від результатів дослідження оптичної міцності прозорих діелектриків [36], що не залежить від площі опромінювача. Підвищення оптичної міцності середовищ при зменшенні розмірів зони взаємодії пов'язано зі зменшенням числа поглинаючих мікронеоднородностей "небезпечною" величини, що супроводжується різким збільшенням статистичного розкиду експериментальних даних. В даному ж випадку середовище є дифузнерозсіюючим, тому, як буде показано нижче, ініціювання відбувається на деякій глибині, де встигає сформуватися ореол розсіювання. Ця обставина і визначає дану особливість ініціювання азида свинцю.

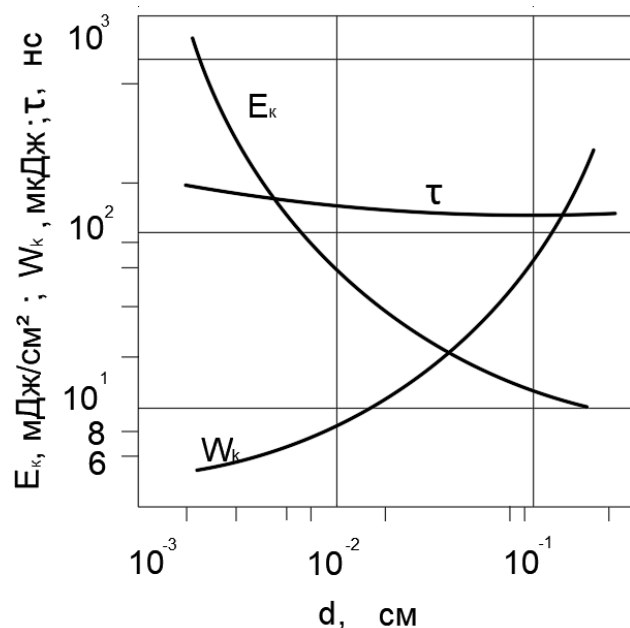


Рис. 1.2 - Результати експериментальних досліджень розмірного ефекту азида свинцю.

Александровим Є.І. і Ціпілевим В.П. приведені вивчення впливу розподілу світлової енергії на поверхні ВР на розмірний ефект [33]. Було проведено ініціювання пресованого азида свинцю випромінюванням одномодового неодимового лазера, сформованим на опроміненій поверхні проекційним методом в круглу пляму і пляма прямокутної форми довжиною

$9 \cdot 10^{-2}$ см і змінної ширини при розподілі щільності енергії $E(r) = E_0 \exp(-r^2/2\sigma^2)$, де $\sigma = 3,6 \cdot 10^{-2}$ см. Результати експериментів представлені на рис. 1.3.

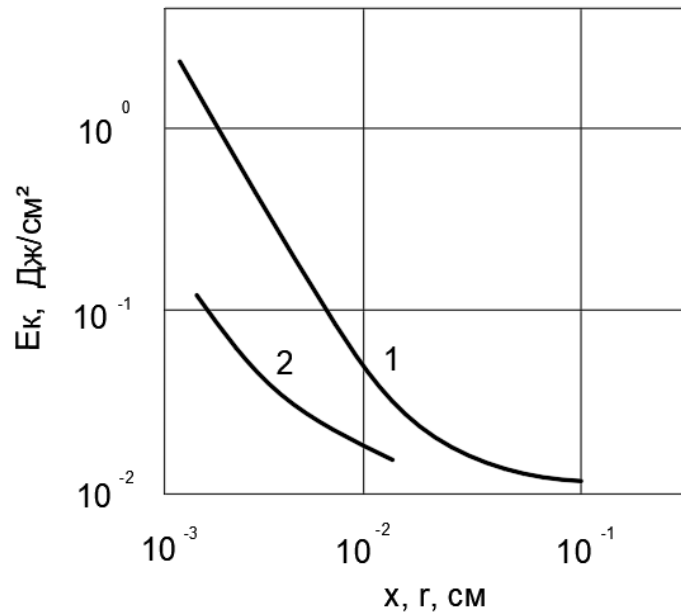


Рис. 1.3 - Залежність критичної щільності енергії ініціювання азиду свинцю від розмірів опроміненої зони: 1- коло радіуса r ; 2- прямокутник довжиною $9 \cdot 10^{-2}$ см і шириною $2x$

З рис. слід, що ініціювання високочутливих вибухових речовин істотно залежить від світлового режиму в обсязі світлорозсіюючої речовини.

В роботі [34] досліджувалися статистичні особливості ініціювання вибухових речовин лазерним моноімпульсом. При виборі в якості об'єкта дослідження азиду свинцю враховувалося, що поглинають центри в азидній матриці представляють собою металевий продукт розливання вихідного ВР [18] (свинець), неминуче присутній в силу термодинамічної нестабільності $Pb(N_3)_2$. Для помітної зміни статистики запалювання був здійснений термоліз речовини протягом 16 год при температурі $80^\circ C$. Цікаво, що зміни оптичних властивостей азиду свинцю в результаті подібної обробки не виявлено. У подальшому готувалися дві партії зразків одного синтезу з розміром мікрокристалів $(10 \times 1,5 \times 1,5) \cdot 10^{-9} \text{ мм}^3$, які піддавали вакуумній обробці при тиску 10 Па тривалістю часу $t = 16$ год при температурі $T_1 = 20$ і $T_2 = 80^\circ C$. На рис.

1.4 показані результати досліджень на стійкість цих зразків до дії випромінювання одномодового неодимового лазера з тривалістю моноімпульсу на напіввисоті інтенсивності $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ с при точці впливу $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ с.

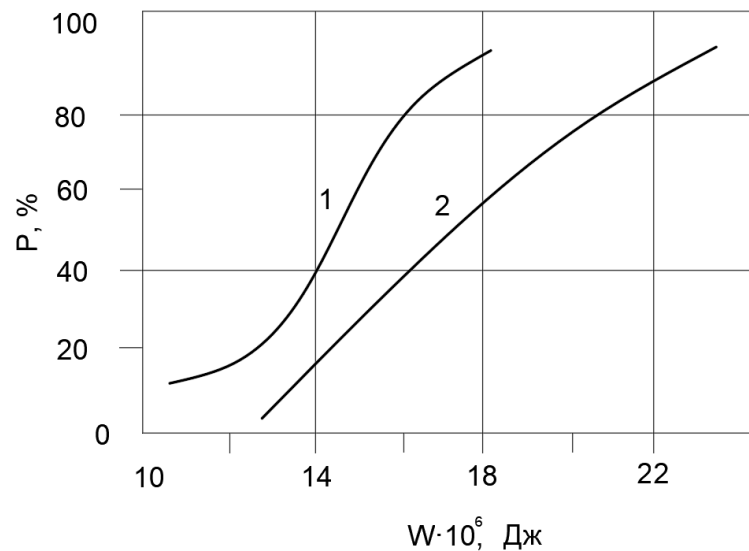


Рис. 1.4 - Залежність ймовірності ініціювання азиду свинцю (P) від енергії лазерного випромінювання (W): 1- для азиду свинцю, прогрітого при температурі 80 °C; 2- для азиду свинцю, який не піддавався додатковому нагріванню.

Викладені результати представляються дуже важливими з точки зору встановлення механізму запалювання вибухових речовин. По-перше, можна зробити висновок, що розсіювання світла в таких речовинах відбувається в основному на гранях мікронеоднородностей речовини. По-друге, при синтезі ВР не слід прагнути використовувати високочисті початкові матеріали, так як при цьому зменшується концентрація мікронеоднородностей, а, отже, знижується ймовірність ініціювання лазерним імпульсом із заданою енергією.

В роботі [28] досліджувався вплив режиму генерації на особливості розмірного ефекту при лазерному ініціюванні пресованого азиду свинцю. З цією метою експериментально вивчена залежність чутливості від діаметра однорідно освітлюваного майданчика в межах $2 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-1}$ см. На рис. 1.5 показані результати експерименту і для порівняння наведені аналогічні

залежності критичної густини енергії $E_k(d)$ і критичної енергії $W_k(d)$ для випадку ініціювання азида свинцю лазерним моноімпульсом .

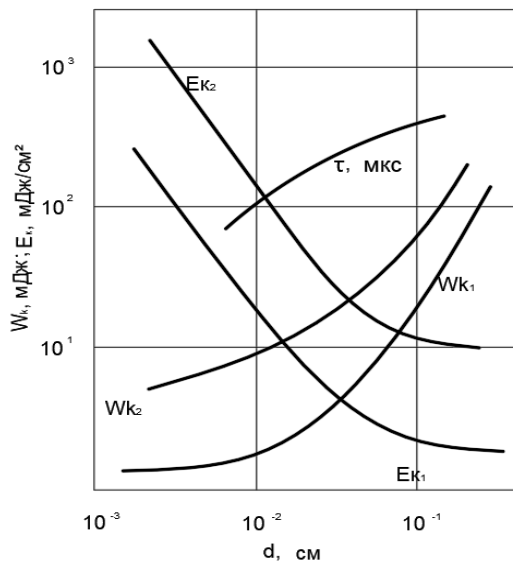


Рис. 1.5 - Залежність критичних світлових потоків (критичної щільності енергії $E_k(d)$ і критичної енергії $W_k(d)$) від розміру опромінювання d : 1-тривалість імпульсу $3 \cdot 10^{-8}$ с; 2 – 0,6 мс.

Головні висновки, які можна зробити з представлених на рисунку залежностей такі:

- щільність енергії та енергія ініціювання азида свинцю цугом лазерних імпульсів значно перевищує відповідні величини для моноімпульсної дії наслідком;
- залежності $E_k(d)$ і $W_k(d)$ для обох видів генерації лазера подібні один одному. Виявлена функціональна незалежність розмірного ефекту від режиму генерації, яка представляє особливий інтерес, оскільки свідчить про його єдину природу в тому і в іншому випадку. Іншими словами, функція розподілу освітленості в обсязі ВР не залежить від щільності потужності лазерного випромінювання.

В [36] досліджувалися плівкові заряди, що складаються з комплексу 5-гідрозілотетразола з перхлоратом ртуті (II) і оптично-прозорого полімеру (ВС-

2) (рис. 1.6). Випробовувалися зразки ВС-2 із вмістом $\sim 10\%$ і розмірів кристалів комплексу ~ 1 мкм.

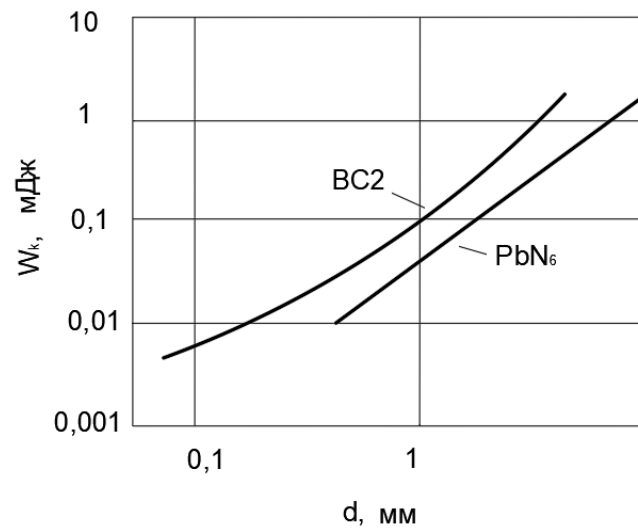


Рис. 1.6 - Вплив розміру зони впливу лазерного променя із зразком ВР на чутливість ВР.

Товщина плівок становила $\sim 1,5$ мм, діаметр - 5 мм. Для отримання коротких імпульсів ($\tau_{\text{и}} \approx 30$ нс) використовувався лазер на неодимовому склі з оптично-механічним затвором, що працює в режимі моноімпульсу (МІ). Дослідження в режимі вільної генерації (СГ) проводилися із використанням лазера з активним елементом з неодимового кристала, який має кристал калій-гадоліній вольфрамату.

Розподіл щільності енергії в площині мішені визначалося за допомогою скануючої діафрагми і апроксимувались розподілом Гаусса. Проведені експерименти показали, що чутливість ВС-2 значно падає при переході від впливу в режимі (МІ) до впливу в режимі (СГ). Так, критичне значення щільності енергії збільшилася з 10,4 до 308,4 мДж / см².

З рис. 1.6 видно, що ВС-2 проявляє більш високу чутливість в порівнянні з азидом свинцю в широкому діапазоні діаметрів лазерного пучка. Крім цього, в роботі [36] вперше було встановлено вплив розміру зони опромінення на чутливість ВР. Дані для пресованих зарядів азида свинцю взяті з роботи [28], а дані для ВС-2 - з [35].

1.3 Часові характеристики ініціювання вибухових речовин лазерними імпульсами

Перші спроби вирішити задачу експериментального визначення часу затримки вибуху зразка ВР відносно часу початку генерації ОКГ були зроблені в роботі [29]. Зразки азида свинцю і ТЕНа, як було сказано вище, мали щільність близьку до насипної, висота зразків - 5 мм. На відміну від інших робіт, автори [29] орієнтуються на затримку займання ВР, а час роботи навісок ВР відрахований від початку роботи лазера. Для цього з тильної сторони зразка ВР розміщувався коаксіальний фотоелемент, електричний сигнал з якого подавався на один вхід двух-променевого запам'ятовуючого осцилографа. На другий вхід подавався сигнал від іншого фотоелемента, який реєстрував лазерний імпульс. Було показано, що час роботи підвісок ВР, отримане в результаті підриву 20 підвісок ТЕНа і 30 азида свинцю, досить стабільно: максимально відхилення часу від середнього значення не перевищувало 5%. Встановлено, що час роботи навішування, в основному визначається часом проходження детонації за зразком. Останнє було підтверджено додатковою серією дослідів з ТЕНОм, в яких послідовно з досліджуваною підвіскою розташовувалася така ж підвіска ВР. Час роботи свідчить про те, що середня швидкість детонації ТЕНа-5500 м / с. Відсутність затримки початку реакції в другій підвісці підтверджує, що і в першій реакція переходить в детонацію. В роботі [11] досліджувалася затримка спалаху зразків азида свинцю при дії моноімпульса ($\tau_n \sim 10^{-3}$ с). В останньому випадку випромінювання складалося з серії тривалістю близько 10^{-6} с. Встановлено, що в інтервалі зміни часу затримки від 10^{-8} до 10^{-4} с необхідна для вибуху енергія практично постійна; вище 10^{-4} с вона зростає.

Перші дослідження затримки спалаху азида свинцю були виконані в [9]. Експерименти показали, що поблизу порога ініціювання час затримки $\tau \approx 0,5$ мкс і швидко знижується при зростанні щільності енергії лазерного випромінювання E .

В [20] Є.І. Александров і В.П. Ципілев досліджували вплив тиску пресування азида свинцю на затримки спалаху при дії моноімпульса тривалістю $3 \cdot 10^{-8}$ с і одиночного імпульсу $6 \cdot 10^{-7}$ с. За допомогою фотозбільшувача були оцінені затримки спалаху при $E = E_k$ для зразків з тиском запресовки 10^6 та $1,5 \cdot 10^9$. Вони склали: для моноімпульса $2 \cdot 10^{-6}$ та $(1 \div 2) \cdot 10^{-7}$ с, для одиночного імпульсу $5 \cdot 10^{-6}$ і $(1,0 - 2,5) \cdot 10^{-6}$ с. При дії цуга імпульсів на зразки з тиском запресовки $1,5 \cdot 10^9$ Н/ м² особливих закономірностей виявити не вдалося. Спалах міг мати місце в будь-який момент опромінення аж до початкового.

Дуже важливим для розробки оптичних детонаторів представляються вимірювання затримки спалаху, проведені паралельно з вивченням розмірного ефекту. Так, в [33] показано, що затримки спалаху азида свинцю практично не залежать від розміру опромінених майданчиків (див. рис. 1.2). Послідовно, температура вогнищ розігріву, що викликають ініціювання, в першому наближенні, постійна. Тому, можна зробити висновок, що вони реалізуються в умовах однакової освітленості.

В роботі [8] зазначено, що для ТНРС і гримучої ртуті в критичних умовах затримка спалаху зменшується з ростом тиску притиснення зразків до оптичного скла від 80 - 100 мкс при впливі по відкритій поверхні, до 1 - 5 мкс при $P_{вн} = 20$ кбар . Збільшення E при постійному $P_{вн}$ в 5 - 10 разів знижує затримку аж до збігу з довгострокового імпульсу. Ініціювання всіх досліджених азидів (свинцю, срібла, кадмію) супроводжується мінімальною затримкою (1 мкс), різким світловим і звуковим ефектом, руйнуванням пластини і пуансона. Запалювання тетразену короткими та довгими імпульсами вимагає притиснення поверхностей зразка до пластини. Вплив по відкритій поверхні навіть при найвищих значеннях E , що досягали 100 Дж / см², призводить до вигорання цього ВР без подальшого розвитку горіння, так само, як це відбувається з вторинними ВР.

Великий інтерес викликають дослідження залежності часу затримки займання від щільності енергії через опромінення вибухових композитів на

основі комплексних ВР, які проявляють високу чутливість до дії лазерного імпульсу. Однак тільки в роботі [36] зроблена спроба вирішити цю задачу, і то тільки для впливу випромінювання ОКГ, що працює в режимі вільної генерації ($\tau_{\text{н}} \approx 30$ мкс). На рис.1,7 представлена залежність часу затримки горіння ВС-2 від щільності енергії випромінювання. Час затримки спалаху, що відраховується від початку генерації, навіть поблизу порога ініціювання, був завжди менше за тривалість цуга світлових імпульсів. Такий результат якісно відповідає картині, отриманій для азида свинцю в роботі [34], а значить, природа займання ВР єдина.

З представленого вище огляду робіт, присвячених проблемам ініціювання вибухових речовин лазерним імпульсом, можна зробити наступні висновки:

- ініціюючі вибухові речовини виявляють більшу чутливість до дії лазерного моноімпульса, ніж бризантні ВР;
- збільшення швидкості енерговводу знижує поріг ініціювання, отже, в оптичній системі ініціювання зарядів ВР - ОПСІН слід використовувати короткі лазерні імпульси;
- підвищення початкової температури ВР не впливає на поріг ініціювання;
- більшість ініціюють вибухових речовин (ІВР) характеризуються великими (60-80%) коефіцієнтами дифузного віддзеркалення і є слабопоглинаючими матеріалами на довжинах хвиль 0,69; 1,06 мкм;
- введення поглинаючих домішок в заряди ініціюючих ВР не сприяє підвищенню їх чутливості;

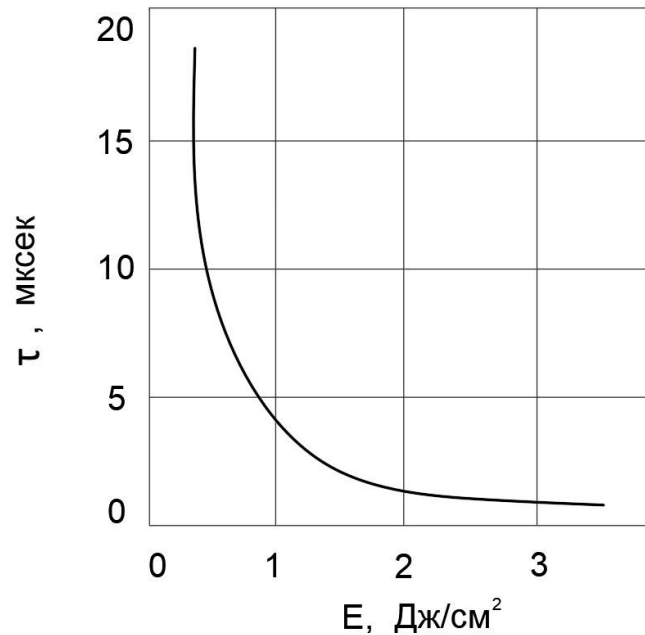


Рис. 1.7 - Залежність часу затримки займання ВС-2 від щільності енергії лазерного випромінювання.

- параметри ініціювання ІВР випромінюванням 1,06 мкм і 0,69 мкм приблизно рівні, так як близькі їх оптичні характеристики;
- при ініціюванні ВР лазерним випромінюванням проявляється розмірний ефект;
- залежність порога ініціювання від розміру і геометрії зони впливу, який не залежить від довжини хвилі випромінювання, тривалості та потужності впливу, модової структури імпульсу;
- при зменшенні діаметра пучка статистичний розкид порога ініціювання ВР не змінюється (на відміну від порогу оптичного пробою прозорих діелектриків);
- збільшення концентрації поглинаючих випромінювання мікронеоднородностей підвищує ймовірність ініціювання ВР;
- затримка ініціювання залежить від природи ВР, тривалості впливу, щільності та потужності лазерного випромінювання.

Узагальнивши зроблені висновки можна зробити висновок:

- традиційні ІВР проявляють високу чутливість до дії лазерного імпульсу тільки при високому тиску пресування (> 10 бар), що не дозволяє використовувати такі їх властивості на практиці;
- не розроблені підходи або хоча б загальні принципи отримання (синтезу) ІВР для ОПСІН;
- роботи, спрямовані на підвищення чутливості ІВР, на відміну від бризантних ВР, практично не проводились;
- розмірний ефект, статистичні особливості ініціювання засновані на уявленнях про дифузне розсіювання випромінювання в середовищі ВР, однак, теоретичні моделі цього процесу не розроблені.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ЗРАЗОК ОПТИЧНОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

2.1 Технічні характеристики оптичного квантового генератора

Мобільна експериментальна установка призначена для отримання попередніх результатів досліджень ініціювання вибухових речовин і світлочувливих вибухових композицій. Невеликі масогабаритні характеристики установки дозволяли використовувати її не тільки в лабораторії, а й швидко монтувати в польових умовах. Маса основного елемента, оптичного квантового генератора (ОКГ), дорівнював 12 кг. Похибка вимірювання порога чутливості не перевищувала 15 %. Експериментальна установка створена на базі першого зразка твердотілого оптичного квантового генератора (рис. 3.1) для оптичної системи ініціювання.

Технічні дані ОКГ:

- Активні елементи (лазери): концентроване фосфатне неодимове скло ЛМР-55, (3 шт.);
- Довжина хвилі випромінювання: 1,06 мкм;
- Режим роботи: пасивна модуляція добротності;
- Модовий склад: багатомодовий;
- Вихідна енергія одного активного елемента: 170 мДж;
- Тривалість імпульсу: 11 нс;
- Час зарядки акумуляторів не більше 3 хвилин;
- Живлення від мережі змінного струму: 220 В, 50 Гц;
- Живлення від акумулятора автомобіля: 12 В;
- Споживана потужність не більше 100 Вт;
- Запобіжник 1 А;
- Габаритні розміри 425×130×300 мм;
- Маса 12 кг

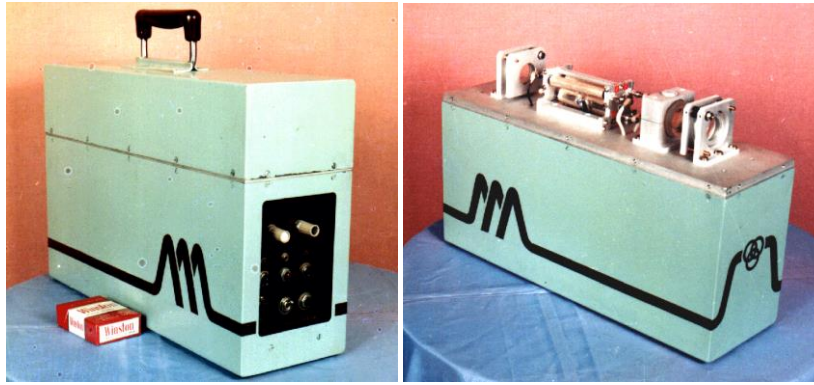


Рис. 2.1 - Загальний вигляд ОКГ і оптична головка

Основним несучим елементом конструкції ОКГ є плита з дюралюмінію, яка має розміри $420 \times 130 \times 18$ мм. Зверху на цій плиті розміщена оптична система лазерної установки. Знизу до плити кріпиться накопичувальний конденсатор Сі, електрична частина і панель управління лазером. У плиті є 9 наскрізних отворів, через які проходять дроти з електричного відсіку для живлення і запалювання імпульсних ламп. Зовні оптичний і електричний відсіки закриті кожухами, які кріпляться до несучої плити. У верхньому кожусі є отвір з різьбовою заглушкою для виведення випромінювання.

На рис. 2.1 показаний ОКГ- загальний вигляд, рис. 2.1, а- оптичний блок ОК, рис.2.1, б - знято верхній кожух. На плиті закріплені дві оправы з дзеркалами резонатора і блок оптичних головок. Активні елементи оптичних головок з фосфатного скла марки ЛМР-55 з концентрацією іонів неодиму мм. Як лампа розжарювання цих стрижнів використовуються імпульсні ксенонові лампи типу стрижнів, використовуються імпульсні ксенонові лампи типу ІФП-100-2А з габаритними розмірами 10×150 мм. Їх осі, рівномірно розташовані на окружності діаметром 33 мм, знаходяться на одному радіусі цієї окружності з віссю відповідного активного елементу.

Кожна пара - активний елемент і лампа оточені відбивачем у вигляді еліптичного циліндра з латунної фольги з полірованим срібним покриттям. Всі три активних елемента поміщені в загальний резонатор, утворений двома плоскими дзеркалами з коефіцієнтами відображення 39% і 99% для довжини

хвилі 1,06 мкм. Кожне з дзеркал закріплено в оправі, конструкція якої дозволяє юстувати дзеркало з точністю 10 ". Відстань між дзеркалами - 256 мм.

Кювету з барвником, що виконує функцію пасивного затвора для всіх трьох лазерів, встановлена усередині резонатора з боку вихідного дзеркала. Кювету заповнена барвником 1055 в розчиннику АЕВП з початковим пропусканням 29% на довжині хвилі 1,06 мкм. Оправу кювети можна повертати щодо плити навколо осі симетрії кювети перпендикулярно плиті на кут 5°. При проведенні експериментів використовувався тільки один активний елемент.

Торці стрижнів з неодимового скла скошені на 5 кутових хвилин до осі стержня. Конструкція резонатора, підібрана в експериментальному лазері, передбачає, що торці активних елементів є частиною складеного резонатора, тобто, перпендикулярні до осі резонатора. Оскільки зовнішні дзеркала резонатора є загальними, то для виконання цієї умови кожен зі стрижнів повертається навколо своєї осі так, щоб торці всіх трьох стрижнів були взаємно паралельні. Після цього дзеркала резонатора встановлюються паралельно торцям стрижнів.

В процесі експлуатації ОКГ були виявлені незначні його недоліки, усунуті після суттєвої модифікації. Зокрема, блок запалювання імпульсних ламп, що забезпечує роботу трьох лазерів в заданому інтервалі часу реконструйований для забезпечення роботи тільки одного каналу, крім того, модифікований блок живлення, блок управління і перетворення напруги.

2.2 Вимірювання енергетичних характеристик лазерного пучка

Для обробки експериментальних даних необхідно знати діаметр лазерного пучка на поверхні вибухової складу. Для вирішення цього завдання уточнимо саме визначення діаметра пучка. Як правило, діаметр пучка відносять до якогось рівню інтенсивності випромінювання, наприклад, до рівня, де щільність лазерної енергії падає в e раз відносно максимального значення. Таке визначення не підходить для опису результатів експериментів

по запалюванню вибухових речовин. Пов'язано це з тим, що при зміні енергії в лазерному імпульсі змінюється і діаметр плями опромінення, однак, абсолютне значення щільності енергії, відповідної границі пучка, залишається постійним.

З огляду на цю закономірність була розроблена методика вимірювання діаметра лазерної плями за відбитками, що виникають при дії лазерних імпульсів на матеріал, зазнає фазове перетворення, що спостерігається візуально або під мікроскопом.

Дослідження збудження детонації в ініціюючих і бризантних ВР особливо активно проводилися в 60-ті - 90-ті роки минулого століття (Бріш А.А., Галеев І.А., Зайцев Б.М. (1968); Александров Є.І., Вознюк А.Г. (1978); Карабанов Ю.Ф., Боболев В.К., (1981); Александров В.Є., Долголаптев А.В., Йоффе В.Б. та ін. (1983); Чернай А.В., Кучугурний Ю.П. (1986); Александров В.Є., Вознюк А.Г., Ципілев В.П. (1989); Лобанов В.М., Ленський Р.Г., Плотніков Ю.І. та ін. (1989); Карабанов Ю.Ф., Карпухін І.А. (1992), Ілюшин М.А., Сударіков А.М., Целінський І.В. та ін. (1980-2016), Чернай А.В., Соколов В.В. (1992-2016) та інші). У нинішньому столітті зусилля вчених сконцентровані на розробках нових світлочутливих ВР, лазерних систем ініціювання (Н.А. Леоненко, 2002) оптичних детонаторів [52] і застосування таких систем в машинобудуванні, гірничій та військовій справі. Так, результати використання лазерного способу ініціювання зарядів ВР в процесах зварювання, зміцнення і маркування металів вибухом представлені в роботі В.А. Чорна, Ю.П. Бунчука і С.Н. Пахомова (2003) в дослідженнях розвитку оптоволоконних систем як перспективних засобів збудження детонації в високоенергетичних речовинах [53], в тому числі, з використанням лазерних діодів [54]. Велика кількість досліджень проведена з різними енергонасиченими світлочутливими композиціями для систем космічних апаратів [55], для засобів ініціювання бризантних вибухових речовин [56], при вивченні властивостей енергонасичених з'єднань [57]. Отримано ряд важливих наукових результатів в дослідженнях чутливості бризантних ВР до ініціювання імпульсу лазерного

діода [58], металокомплексів в енергетичних композиціях, наприклад, di- (3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazol) - copper (II) perchlorate [59]. Показана можливість використання аномально чутливих ВР на криволінійних поверхнях великої площі (більше 1m^2) [60], запропонований метод субмікросекундного навантаження з щільністю $0,08 \dots 1,0 \text{ кПа} \times \text{с}$ на оболонки корпусів ракетно-космічних апаратів [61], розроблений ряд технічних рішень із створення профільованих ударних хвиль [62].

З точки зору практичного застосування отримані результати є свідченням того, що лазерне ініціювання забезпечує високий рівень безпеки, надійності і точності. Ізольованість оптичного детонатора від псевдоімпульсів, що передаються по лінії зв'язку з лазером, обумовлена відсутністю в оптичному діапазоні випадкових джерел з потужністю, достатньої для вибуху детонатора. Крім цього, оптичні детонатори нечутливі до електромагнітних наведень і зарядів статичного струму. Досягнення комплексу таких позитивних і дуже важливих характеристик стало можливим тільки після синтезу світлочутливих енергонасичених композитів і їх випробування в оптичних детонаторах в якості первинних ініціюючих ВР [51,55,57]. Аналогічні результати, отримані в [64], підтверджують висновки, сформульовані в більш ранніх роботах.

Головні завдання, які стоять перед дослідниками в області лазерного ініціювання детонації в зарядах ВР- розробка, синтез і використання нових первинних світлочутливих ініціюючих ВР. Такі речовини отримані вченими і фахівцями Санкт-Петербурзького технічного університету за участю фахівців Національного гірничого університету (Україна) [56,59,63]. Синтез ініціюючих первинних світлочутливих вибухових речовин, які характеризуються аномально високою чутливістю до дії лазерного випромінювання, започаткував розвиток робіт по створенню на основі лазерного способу підривання нових конкурентноспроможних систем лазерного ініціювання зарядів ВР.

Для підвищення безпеки робіт і фізико-технічної ефективності деяких сучасних вибухових технологій використовують такі системи ініціювання

зарядів ВР як, наприклад, NONEL, Magnadet і їм подібні. Повне задоволення досить жорстких вимог промислових технологій і необхідності забезпечення високого рівня безпеки лазерних систем залежить головним чином від оптичного детонатора як найважливішого елемента системи ініціювання [51,64].

Оптичний детонатор містить світлочутливу вибухову речовину, потужність якої дозволяє викликати детонацію в стандартних вторинних ВР. В даний час синтезовано кілька десятків світлочутливих ВР [55,56], проте, для їх використання потрібні розрахункові моделі, які б дозволили визначати параметри лазерного впливу і рекомендувати раціональні фізико-технічні характеристики зарядів світлочутливих ВР в оптичних детонаторах. Для побудови розрахункових моделей потрібно в цілому знання механізму лазерного запалювання і, зокрема, закономірностей освітленості в обсязі ВР. Як свідчать результати досліджень (Александров Є.І., Вознюк А.Г., Ципілев В.П. та ін.). Розрахунок освітленості в обсязі ВР ускладнюється, оскільки ВР є середовищем з великою щільністю розсіювачів, для яких були отримані аналітичні рішення. Перераховані перешкоди усунені шляхом розробки і рішення фізико-математичної моделі поширення світла в дифузно-розсіюючих середовищах з великою щільністю розсіювачів [65]. Для вирішення цієї задачі потрібні були результати експериментальних досліджень, отримані в [59-63]. Завдання поширення світла в розсіюючих середовищах є предметом вивчення багатьох фахівців протягом останніх десятиліть. В кінці другої половини минулого століття цей розділ науки найбільш інтенсивно розвивався в Інституті хімічної фізики АН СРСР (м. Москва) і в створеному Інституті оптики атмосфери (Томськ). Основний напрямок наукових досліджень був пов'язаний з проблемами оптичної локації, забруднення повітря в промислових регіонах країни, а також в медицині. Подібні завдання вирішувалися також в США і країнах західної Європи. Основна увага приділялася вирішенню проблеми ослаблення світлового пучка в середовищах з малою концентрацією

розсіювачів (туман, забруднене повітря і т.д.). Саме невелика концентрація розсіювачів дозволила перетворити нелінійне рівняння розсіювання світла в лінійне. Для побудови оптичних детонаторів не менш важливими є фізичні величини, що характеризують лазерне випромінювання, його енергетичні характеристики, геометричні параметри лазерного пучка і зв'язок між ними. Ці параметри в цілому забезпечують надійність і мінімізацію енергії ініціювання світлочутливих композиційних ВР, визначають раціональні розміри оптичних детонаторів спеціальних конструкцій, в тому числі мікродетонаторів.

Матеріали і методика проведення досліджень. Експериментальний пристрій (рис. 2.2), містить твердотілий оптичний квантовий генератор CFR 200-10 Pulsed Nd: YAG Laser System фірми Big Sky Laser (США). Довжина хвилі випромінювання 1,064 мкм, вертикальна поляризація, максимальна енергія в імпульсі 200 мДж. Лазер працює в імпульсно-періодичному режимі з регулюванням частоти в діапазоні 170 ... 10 Гц. Частота спалаху лампи накачування постійна і дорівнює 10 Гц. Поява першого модулюючого імпульсу здійснюється після генерації 20 імпульсів. Вихід на стабільний режим роботи лазера відбувається після десяти модульованих імпульсів. Діаметр вихідного пучка 6 мм, розбіжність при енергії в імпульсі, що становить 85,5 % від максимальної величини, дорівнює 2,8 мрад. У дослідженнях використовувалися світлочутливі плівки енергонасичених композитів, виготовлених на основі азида свинцю. Введення полімеру дозволяє уникнути агрегації субмікронних частинок ВР, а флегматизація азида свинцю практично не впливає на його детонаційні характеристики.

На рис. 2.2, а показана схема експериментальної установки, розробленої фахівцями Національного гірничого університету. Цифрою 1 позначений оптичний квантовий генератор - лазер (Nd: YAG). Лазерний діод 2 і діафрагма 15 використовувалися для юстування оптичного тракту. За допомогою призми 4 лазерний промінь спрямовувався на вибухову речовину 11, нанесену в вигляді покриття діаметром 5 мм на скляну пластину 10. Зразок світлочутливого

покриття закріплювався на алюмінієвій пластині 9 товщиною 8 мм. Для проходження лазерного випромінювання пластина мала отвір діаметром 8 мм. Лінза 7 використовувалася для регулювання необхідної величини діаметра лазерного пучка. Для ініціювання використовувалася центральна частина випромінювання, яка була сформована діафрагмою з вирізаним в центрі кругом. Зображення проектувалося за допомогою лінзи на поверхню світлочутливого композиційного ВР. Площина зображення перебувала по відбитку на фотоплівці, якість кордонів і розмір яких оцінювалися за допомогою мікроскопа.

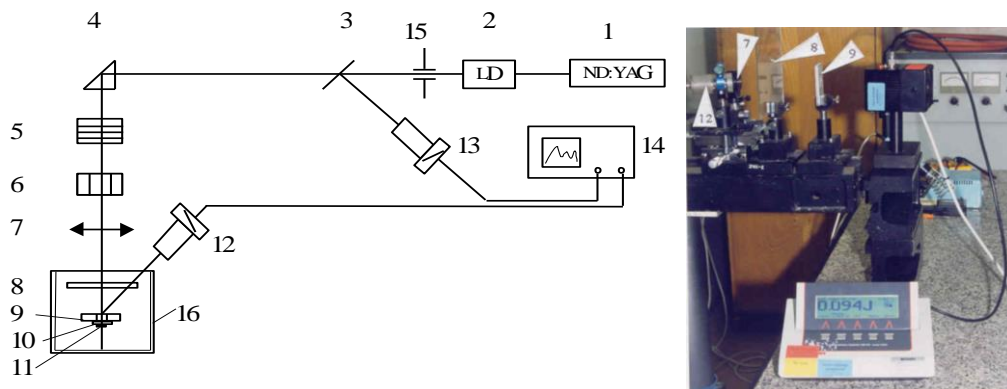


Рис 2.2 - Експериментальна установка: а –принципова схема; б - загальний вигляд стаціонарного оптичного квантового генератора.

Фотодіод 12 реєстрував запалювання світлочутливої вибухової речовини (СВР). Світлофільтри 5 призначалися для вимірювання енергії імпульсного лазерного випромінювання, яке падає на зразок, при фіксованій відстані від СВР до лінзи. Для визначення цієї енергії використовувався вимірювач енергії імпульсного лазерного випромінювання ІЕЛ-300 з вимірювальною голівкою прохідного типу 6. Для вимірювання часу затримки запалювання СВР щодо початку дії лазерного імпульсу використовувалися фотодіоди 12 і 13, що працюють в спектральних діапазонах 0,4 ... 1,2 мкм і 0,8 ... 1,4 мкм відповідно. В процесі експериментів з'ясувалося, що затримку вибуху СВР можна реєструвати одним фотодіодом 12. Використовувався двухканальний цифровий осцилограф TDS-350 фірми Tektronix (США). Максимальна частота вхідного

сигналу (аналогового) 200 МГц. Максимальна частота - 1 ГГц. Мінімальний час розгортки - 2,5 нс / поділ.

Для визначення функції розподілу щільності енергії в лазерному пучку використовувалася методика, основана на експериментальному визначенні діаметрів відбитків, які виникають при впливі випромінювання на поверхню матеріалу. Розподіл енергії в лазерному пучку визначався за допомогою аналізатора лазерного пучка Silicon Camera Model LBA-100A фірми Spiricon). У аналізатор входять камери високої роздільної здатності Pulnix TM- 745, що безпосередньо реєструють випромінювання.

У зв'язку з тим, що при зміні енергії в лазерному імпульсі змінюється і діаметр плями опромінення (абсолютне значення щільності енергії, що на кордоні пучка, залишається незмінним). А.Чернаєм запропонована методика вимірювання діаметра лазерної плями за відбитками на засвіченому фотопапері. У речовині, нанесеній на поверхню фотопаперу, протікають фазові перетворення, які спостерігаються візуально або за допомогою мікроскопа. Фазовий перехід має пороговий характер, тобто виконується при дії лазерного випромінювання з енергією, щільність якої перевищує певну межу величину E^* . У цьому випадку на поверхні матеріалу отримують контрастні відбитки, які можуть бути виміряні з досить великою точністю.

У методику досліджень висунута вимога до умов проведення досліджень, у відповідності з якою, функція розподілу інтенсивності випромінювання по діаметру лазерного пучка не повинна змінюватися від імпульса до імпульса. Ця вимога виконується при стабільній роботі оптичного квантового генератора (ОКГ), який генерує імпульси з однаковою енергією. При необхідності зміна щільності енергії випромінювання здійснювалось за допомогою калібрувальних світлофільтрів.

При визначенні порогів чутливості вибухових речовин центральна частина лазерного пучка виділялася діафрагмою діаметром 4 мм, що

відповідало рівню інтенсивності вдвічі менше, ніж її максимального значення. Надалі такі пучки вивчалися з точки зору їх якості.

На рис. 2.3 показано типовий розподіл інтенсивності по вертикальному і горизонтальному перерізі пучка, отримане за допомогою аналізатора Silicon Camera Model LBA-100A. Нерівномірність розподілу інтенсивності освітлення не перевищувала 30%.

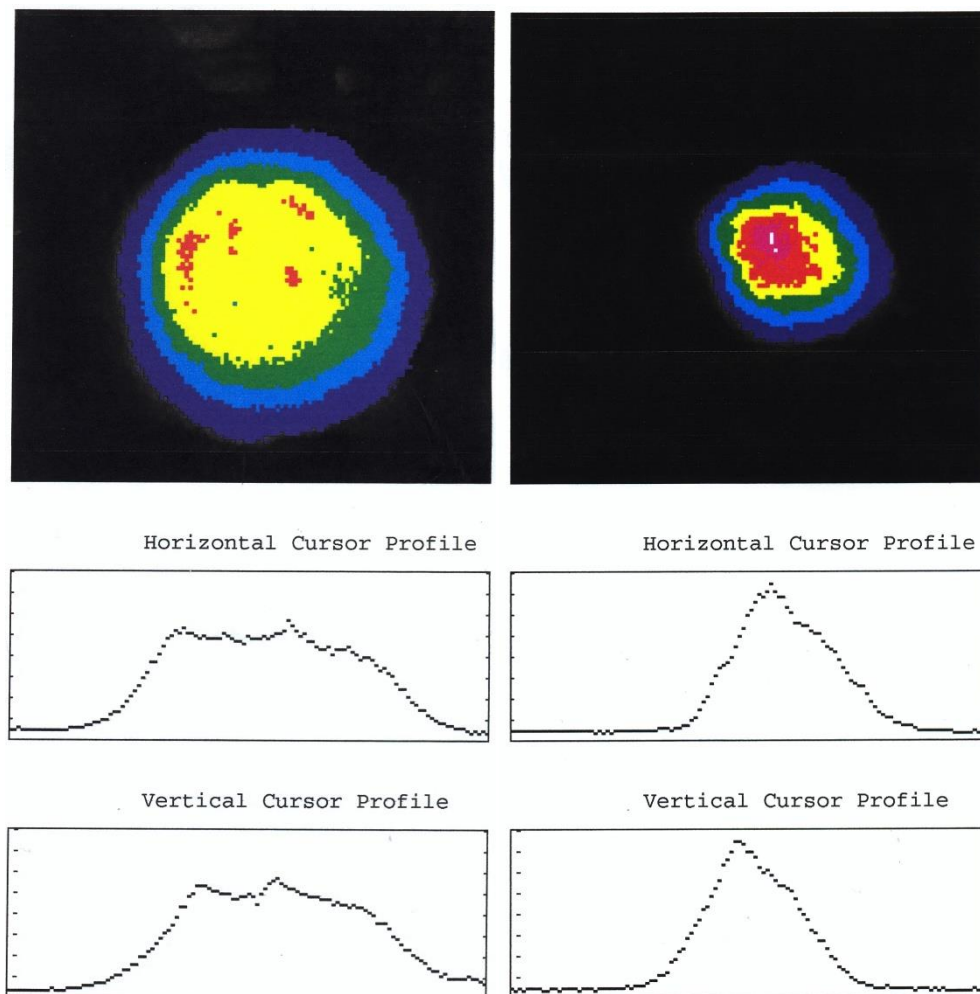


Рис. 2.3 - Розподіл щільності енергії лазерного випромінювання в плямі опромінення: а – діаметр лазерного відбитка 5 мм; б - діаметр лазерного відбитка 2,75 мм.

Розподіл щільності енергії по перетину пучка наближено будемо шукати в наступному вигляді:

$$E(r) = E_0 \omega(r),$$

де E_0 - щільність енергії в центрі пучка; r - радіус кільця шириною d_r , на якому здійснюється пошук величини $E(r)$.

Вивчення функцій щільності енергії у вигляді (1) передбачає радіальну симетрію функції перерозподілу. Проведемо нормування цієї функції на повну енергію в імпульсі W .

Змінюючи пропускання лазерного тракту слід очікувати отримання серії відбитків, діаметри (d) яких можна виміряти за допомогою мікроскопа. Межа відбитків відповідає пороговій енергії зміни забарвлення E^* . На рис. 3.4 показаний зовнішній вигляд відбитків лазерного випромінювання на фотопапері з вимірними діаметрами.

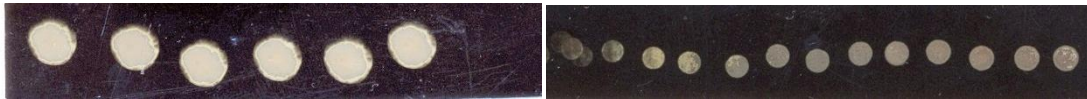


Рис. 2.4 - Відбитки лазерного променя на поверхні активного шару фотопаперу: а - діаметр відбитка 6 мм; б - середній діаметр 2,7 мм

Відбитки на рис. 2.4 а отримані при безпосередньому впливі вихідного лазерного пучка. У всіх експериментах використовувалися діафрагми, за допомогою яких лазерний промінь «обрізався» таким чином, щоб через отвір діафрагми проходила тільки центральна частина випромінювання.

Результати вимірювань відбитків використовуються для запису рівнянь у вигляді:

$$E^*(r)/W_i = \omega(r_i)/2\pi k, \quad i=1, \dots, n,$$

де n - кількість вимірювань; W_i - енергія випромінювання, при якій радіус відбитка дорівнює r_i .

Після побудови залежності $W(r)$ методом екстраполяції була знайдена енергія $W(0) = 2$ мДж, при якій радіус відбитка дорівнює нулю.

Далі визначалася порогова енергія фазового перетворення матеріалу покриття на фотопапері:

$$E^*/W(0) = \omega(0)/2\pi k = 1/2\pi k.$$

Розділивши рівняння (3.3) на (3.4), отримаємо:

$$\omega(r_i) = W(0)/W_i, \quad i=1, \dots, n.$$

Знання функції розподілу $\omega(r)$ цілком достатньо для вирішення поставленого завдання. Для визначення щільності енергії в центрі пучка E_0 , а також E^* шляхом графічного інтегрування була знайдена величина $k = 4,96 \times 10^{-3} \text{ см}^2$.

Щільність енергії в центрі пучка E_0 розраховується за формулою:

$$E_0 = W/(2\pi k).$$

Як характеристики чутливості обрана середня щільність енергії лазерного імпульсу:

$$E_{\text{ср}} = 4W/\pi d^2$$

або щільність енергії в центрі пучка E_0 .

Відома порівняно невелика кількість досліджень, пов'язаних з вивченням залежності критичної (порогової) щільності енергії ініціювання E_k від діаметра лазерного пучка d , тобто від розміру опромінювання (з урахуванням розмірного ефекту). Вперше розмірний ефект був виявлений для азида свинцю [66].

Величина E_k практично не залежить від діаметра пучка, якщо $d > d_0$, де d_0 - значення діаметра, при якому змінюється характер залежності. Для азида свинцю $d > d_0$ мм, для вторинного ВР - ТЕНа дисперсністю $5500 \text{ см}^2 / \text{г}$ - близько $0,6$ мм і зменшується при збільшенні дисперсності. Критична щільність енергії ініціювання (для широких пучків) при вибуху азида свинцю близька $0,4 \text{ Дж/см}^2$, для ТЕНа - $\approx 53 \text{ Дж/см}^2$. Зазначена залежність критичної щільності енергії від діаметра променя практично зберігається при переході від довжини хвилі $1,06$ мкм (неодимовий лазер) до $0,63$ мкм (рубіновий лазер), що узгоджується з результатами через виміри коефіцієнта відображення ВР на цих довжинах хвиль, які виявилися приблизно рівними 80% для азида свинцю і ТЕНа.

В роботі [67] показано, що існування розмірного ефекту не дозволяє провести зіставлення наявних даних для різних конденсованих ВР у зв'язку з тим, що дослідження проведені при різних значеннях діаметрів лазерного пучка. Коректне порівняння результатів можна проводити в разі використання узагальненої залежності.

$$E_{кр} / E_{кр}^0 = 1 + (d/d_{кр})^{-3}$$

де $E_{кр}$ - мінімальне (асимптоічне) значення критичної щільності енергії, відповідної $d \rightarrow \infty$, $d_{кр}$ - критичний діаметр детонації, що характеризує здатність вибухової речовини до високошвидкісного хімічного перетворення.

Найбільш повно розмірний ефект досліджений в [59] на прикладі зразків азида свинцю, отриманих у вигляді таблеток під тиском 2×10^9 Па. Коефіцієнт відображення зразків ВР дорівнює $R = 88\%$. На рис. 3.5 і 3.6, представлені результати вимірювань залежності порогової щільності енергії ініціювання E_k і критичної енергії ініціювання W_k від діаметра лазерного променя.

Аналогічні дослідження проведені на зразках азида свинцю в полімерній матриці, у яких середнє значення коефіцієнта відображення склало 82% .

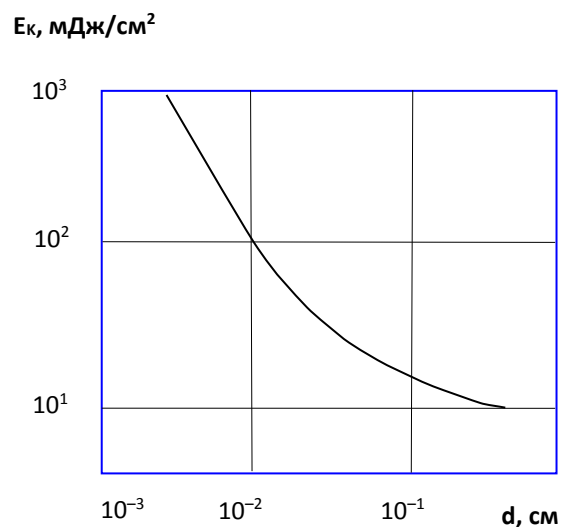


Рис. 2.5 - Залежність порогової щільності енергії ініціювання E_k від діаметра лазерного променя d [59].

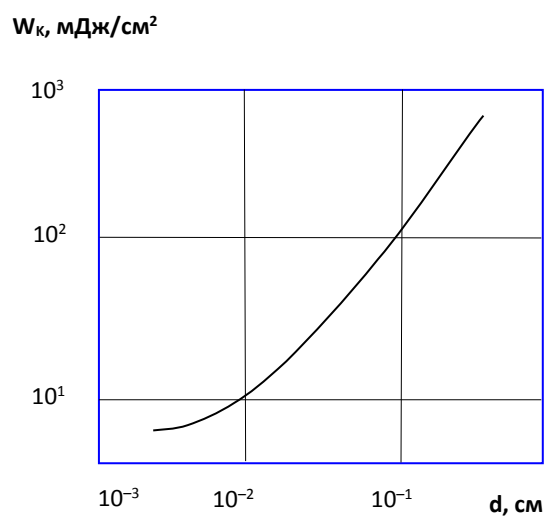


Рис. 2.6 - Залежність критичної щільності енергії ініціювання W_k від діаметра лазерного променя d [59].

3. ІНІЦІЮЮЧІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ ДЛЯ ВИБУХОВИХ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ

3.1 Критерії ініціювання бризантних вибухових речовин та перехідні процеси в ініціюючих вибухових речовинах

Ініціюючі вибухові речовини (ІВР) та ініціюючі вибухові композити (ВС), що застосовуються в оптичних системах ініціювання пірозасобів (вибухових зарядів), повинні проявляти якості, властиві для ІВР, що застосовуються в традиційних системах ініціювання, і, крім того, володіти високою чутливістю до дії лазерного випромінювання [70]. Природно, що для отримання нових матеріалів з більш широким спектром властивостей, в порівнянні з їх аналогами, потрібні нові наукові ідеї і підходи.

Ініціюючі (первинні) вибухові речовини, в основному, служать для збудження вибуху в зарядах потужних бризантних (вторинних) вибухових речовин (БВР). Під ініціюючою здатністю ІВР розуміють здатність зарядів цих ВР при порушенні від простого початкового імпульсу (механічний удар, тертя, полум'я і т.д., тобто будь-якого впливу, крім ударної хвилі), викликати детонацію зарядів БВР.

Першою стадією впливу на БВР ударної хвилі, що виникає при вибуху ІВР, є адіабатичне зжаття і розігрів деякого шару або окремих ділянок в ньому ("гарячих точок"). Ініціююча здатність ударної хвилі визначається тиском у фронті займання РКР і тривалістю фази стиснення.

У БВР детонація збуджується при повідомленні йому певної кількості енергії на одиницю ініціюючої поверхні. Для засобів ініціювання, що мають обмежені розміри, $E_{кр}$ залежить від діаметра заряду. Було знайдено, що критичний тиск ударної хвилі ініціювання гексогену в детонаторах зменшується зі збільшенням третього діаметра заряду від 1,6 до 0,9 ГПа, а критична енергія ініціювання становить близько 46 Дж / см², що еквівалентно величині $p^2 \cdot \tau = 460$.

По відношенню до БВР заряд ІВР виділяється комплексом своїх властивостей, від яких залежить його ініціюючі можливості. Основним фактором, що визначає ініціюючу здатність зарядів ІВР, є довжина їх ділянки переходу горіння в детонацію. Вважається, що перехід горіння твердих високощільних ВР в детонацію включає наступні стадії: стійке пошарове горіння, конвективне горіння, режим повільної детонації, стаціонарну детонацію. Існування і просторова протяжність кожної стадії залежать від структури заряду, фізико-хімічних властивостей ВР, умов його функціонування.

Перехід горіння в детонацію відбувається при наростанні тиску і при наявності біжучої хвилі стиснення. У міру збільшення швидкості процесу зростає інтенсивність хвиль стиснення, що рухаються попереду фронту запалювання, і при деякій граничній швидкості хвиля стиснення здатна ініціювати екзотермічну хімічну реакцію розпаду ВР. Відбувається зміна механізму процесу і конвективне горіння переходить в хвильовий режим повільної детонації, швидкість якого близька до поздовжньої швидкості звуку ІВР при даній щільності заряду.

За іншою моделі переходу горіння в детонацію при підпалюванні заряду вибухової речовини відбувається поширення фронту горіння по заряду з одночасним зростанням тиску на місці підпалювання. Виникає надлишковий тиск, який переміщається по продуктам горіння у вигляді вторинної хвилі стиснення, яка наздоганяє фронт горіння, і, різко прискорюючи його, викликає детонацію.

Виходячи зі сказаного вище впливає, що ІВР, що використовуються в системах ініціювання (у тому числі і в оптичних), повинні проявляти такі властивості:

- малий час переходу від горіння до високошвидкісної детонації;
- високі параметри детонаційного перетворення (РКР або $E_{кр}$).

Це означає, що для оптичних систем ініціювання необхідно знайти (розробити) такі вибухові речовини, які, поряд з високою чутливістю до лазерного впливу, проявляли б себе як потужні ініціюючі речовини. Крім того, не слід забувати про рівень безпеки виробництва, зберігання, транспортування і експлуатації цих ВР.

3.2 Світлочутливі вибухові речовини для лазерного ініціювання

Фахівці ряду науково-дослідних інститутів України і Росії, аналізуючи аварійні ситуації і нещасні випадки на підприємствах гірничо-видобувної та інших галузей промисловості, встановили, що більше чверті з них пов'язані з проведенням вибухових робіт і носять переважно організаційно-технічний характер. Наприклад, порушення монтажу підривної мережі; недотримання елементарних вимог безпеки при перевірці засобів ініціювання та ін. Основна причина аварійних ситуацій це людський фактор.

Штатні ініціюючі вибухові речовини задовольняють головним чином по надійності, вибуховим властивостям і експлуатаційними характеристиками. Але при цьому вони мають ряд суттєвих недоліків. Так небезпека зумовлена токсичністю і отруйними властивостями первинних ініціюючих вибухових речовин - азида і стифнат свинцю, гримучої ртуті, застосування якої заборонено до застосування [57]. Ці вибухові речовини небезпечні, так як високочутливі до удару, тертя, зарядів статичної електрики. Перераховані недоліки надають негативний вплив на навколишнє середовище і здоров'я людей.

В області синтезу нового класу ініціюючих вибухових речовин пріоритетним напрямком є пошук безпечних ВР, що не містять важких металів енергонасичених речовин, високочутливих до лазерного випромінювання як найбільш безпечного і надійного джерела енергетичного імпульсу. Для цивільних засобів ініціювання однією з вимог є обмеження або повне

виключення з застосування солей свинцю, через те, що вони завдають шкоди навколишньому середовищу.

На думку дослідників, ідеальна «зелена» ініціююча вибухова речовина повинна відповідати таким критеріям [57]:

- бути не чутливою до вологи і світла;
- мати низьку чутливість до механічного впливу і зарядів електростатичної електрики;
- бути хімічно стабільним при тривалому зберіганні;
- не містити металів першої групи токсичності;
- бути термічно стабільною не менше, ніж до 500 К;
- бути байдужою до будь-яких зовнішніх електромагнітних наведень.

Синтез світлочутливих ініціюючих вибухових речовин з урахуванням перерахованих вище критеріїв спонукає до створення безпечної, технічно-надійної і багатофункціональної, ефективною і прецезійною оптичної системи ініціювання.

Дані експериментальних досліджень синтезу світлочутливих ініціюючих ВС представлені в табл. 3.1, в якій з майже ста синтезованих світлочутливих композитів показано чотири. Ці ВС по основним показникам найбільш придатні для застосування в середовищах ініціювання.

Таблиця 3.1 - Фізико-хімічні властивості комплексних ВР.

ВС	ρ , г/см ³	D , км/с	Маса заряду по гексогену, г	Чутливість		$T_{\text{нир}}^*$, °С	$E_{\text{кр}}$, Дж/см ²
				до удару, мм (копер Велера)	до тертя, кгс/см ²		
2	3,00	6,5	0,01	60/125	-	180	$2,3 \cdot 10^{-3}$
7	4,6	7,6	0,2	60/100	-	350	$5 \cdot 10^{-3}$
16	1,1	5,1		-	-	139	$12 \cdot 10^{-3}$
17	1,5	6,7	0,05	75/200	-	152	$40 \cdot 10^{-3}$

Встановлено, що сильними сенсibiliзуючими добавками до ВС-1 (до 3%) є вуглецеві фази: сажа, нанотрубки, детонаційні наноалмази, графен. При однаковому способі змішування алотропних форм вуглецю сенсibiliзуюча здатність наноалмазів вище, ніж нанотрубки [56, 57].

Із сотні відомих ВС деякі не вдалося ініціювати лазерним імпульсом з щільністю енергії, перевищуючою $10 \text{ Дж} / \text{см}^2$, не дивлячись на те, що така щільність енергії була достатня для випаровування речовини. Можливо, це обумовлено поверхневим поглинанням енергії.

Найбільшою чутливістю володіють склади ВС-2, ВС-7, ВС-16, ВС-17. Причому, склад ВС-7 під дією лазерного імпульсу детонує, в той час як під дією інших ініціюючих імпульсів (удар, накол, дія вогню і т.д.) - горить. Ця властивість представляється дуже важливою з точки зору безпечного поводження з цим матеріалом.

Критичні щільності енергії запалювання ВС-2, ВС-7, ВС-16, ВС-17 є, на наш погляд, унікальними, так як подібна чутливість при схожих умовах експерименту не розпізнається ні для одного з досліджених раніше матеріалів.

Передбачається, що запалювання високочутливих ВС здійснюється в результаті розпаду реакційно-активних хімічних груп при деформації кристалічної решітки поблизу поглинаючих випромінювання мікронеоднородностей. Квантово-механічні розрахунки підтвердили ймовірність такого механізму. Для підтвердження цього висновку проведені принципово нові експериментальні дослідження: вивчений вплив концентрації сполучного матеріалу і товщини зразків ВС на чутливість до дії лазерного моноімпульсу. Проведення таких експериментів стало можливим завдяки розробленій технології отримання композитних ВС.

У табл. 3.2 і 3.3 наведено залежності часу затримки запалювання ВС-2 від щільності енергії лазерного випромінювання і впливу діаметра лазерного променя на чутливість досліджуваної ВР. З наведених даних видно, що ВС-2

має більш низький поріг ініціювання, ніж заряди азида свинцю в тих же умовах (табл. 3.3)

Таблиця 3.2 - Залежність часу затримки запалювання ВС-2 від щільності енергії випромінювання в режимі вільної генерації (тривалість іпульса 30 мс).

Щільність енергії випромінювання Дж/см ²	Час затримки возгорання τ , мкс
0,26	15
0,35	14,5
1,10	11,5
3,06	1

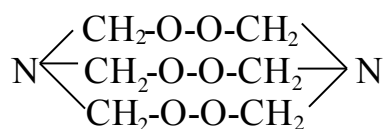
Таблиця 3.3- Вплив розміру зони лазерного променя на чутливість ВС-2 (тривалість іпульсу 30 нс).

Діаметр лазерного променя, d, мм	Критична енергія ініціювання E ₀ , мДж	Критична щільність енергії ініціювання (H ₀), мДж/см ²
0,48	$1,8 \cdot 10^{-2}$	10,14
3,18	0,6	7,48
9,52	1,8	2,57

У зв'язку із зростанням вимог до збільшення потужності засобів ініціювання в поєднанні з їх безпекою, в останні роки відновилися дослідження ініціюючих вибухових речовин (ІВР) серед комплексних солей складу MxLyAz (М-катион металу; L-ліганд; А-аніон кислоти, найчастіше окислювача) [57,75, 76]. Поряд з цим комплексні ІВР викликають інтерес з точки зору перспективи їх використання в оптичних системах ініціювання зарядів ВР. За даними професора М. Іллюшина в даний час досліджено понад сто світлочутливих речовин. Оскільки фізико-хімічні властивості ряду світлочутливих ВР досить докладно описані в декількох монографіях і статтях, в даній роботі звернемо

увагу тільки на деякі ініціюючі ВР, для запалювання яких необхідна найменша енергія лазерного моноімпульса.

Одним з відомих екологічно безпечних ВР є 3,4,8,9,12,13-гексаокса-1,6-Діаза-біцикло [4,4,4] -тетрадекан (гексаметилентрипероксидіамін, пероксид уротропіну або скорочено – ГМТД:



Температура вибуху 2370 °С; обсяг газів 813 л / кг. Фугасність 330 см³ / 10 м. Швидкість детонації при щільності 0,88 г / см³ дорівнює 4510 м / с, при щільності 1,10 г / см³ становить 5100 м / с [103]. Температура спалаху – 200 °С (час затримки 1 с). Температура початку інтенсивного розкладання (Т_{нір}) при швидкості нагрівання 20 К / хв залежить від умов проведення експерименту: для навішування <1 мг при диференціальному скануючому калометричному аналізі Т_{нір} = 170°С, для навісок в десятки міліграмів Т_{нір} знаходиться в межах від 125 до 140 °С. Детонує від удару, променя вогню вогнепровідного шнура. Мінімальний заряд по тетрілу 0,05 м. Дрібнокристалічний ГМТД менш чутливий до механічного впливу, ніж штатні ІВР - азид свинцю, гримуча ртуть; пресується до щільності 1,3 г / см³; більші кристали при спробі пресування вибухають.

Істотним недоліком зарядів ГМТД є невисока термічна і хімічна стабільність, яка є наслідком наявності кислих домішок в продукті. Вступає в реакцію з більшістю звичайних металів, що може привести до детонації. Чутливість підвищується при впливі ультрафіолетового світла. Дослідження показали, що стійкість ГМТД можна збільшити введенням до складу зарядів невеликої кількості оксиду магнію (MgO), що, на жаль, може підвищити їх чутливість [104]. У чистому вигляді хімічно дуже стабільна речовина, при цьому ГМТД є більш потужною ВР, ніж гримуча ртуть. Простота отримання пояснює широке її застосування в терористичних цілях.

Попередні дослідження показали [105], що ГМТД як ініціююча ВР, є чутливою до імпульсного лазерного випромінювання. Поріг ініціювання ГМТД променем неодимового лазера в режимі моноімпульса ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau = 30$ нс) становить близько 40 мДж / см^2 .

Безпосереднє застосування ГМТД як світлочутливого ВР ускладнене через його підвищену чутливість до механічних впливів і високу корозійну активність.

З метою перевірки можливості використання полімеромісних складів ГМТД як світлочутливих ініціюючих ВР була розроблена методика експериментальних досліджень. Вивчалось лазерне ініціювання світлочутливих ініціюючих ВР, виготовлених у вигляді плівок, що містять від 10% до 40% полімеру. Склади наносили у вигляді покриття на алюмінієву фольгу. Покриття представляло собою плівку в формі кола діаметром 1 см. В експериментах реалізувався плоский підрив плівкових зразків, рис. 3.1.

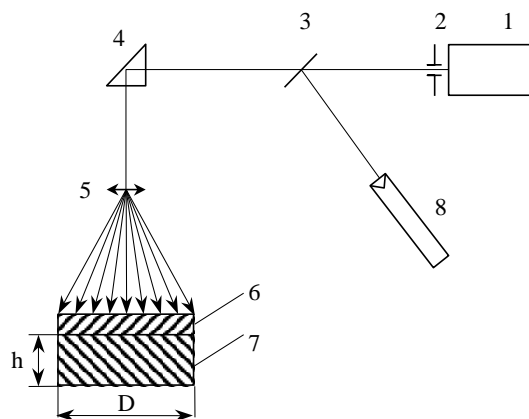


Рис. 3.1 - Схема експерименту: 1 - оптичний квантовий генератор; 2 - діафрагма; 3 - дзеркало; 4 - оптична призма; 5 - лінза; 6 - шар ініціюючої світлочутливої ВР; 7 - металева основа; 8 - лазерний діод для юстування.

Поверхневу щільність маси покриттів змінювали в діапазоні $35 \dots 110$ мг / см^2 . Для юстування обраний лазерний діод з випромінюванням червоного кольору довжиною хвилі $620 \dots 760$ нм. Пучки червоного світла завжди

паралельні один одному і не розсіюються на відстані, володіючи, таким чином, більшою видимою дальністю дії.

Експериментальні дані апроксимували поліномами першого ступеня. Вертикальними відрізками показаний 95 % довірчий інтервал. При зменшенні товщини покриття щільність імпульсу знижується за лінійним законом. Однак отримати малі імпульси представляються можливим, так як, починаючи з деякої товщини покриття не вдається викликати вибух ВС при щільності енергії лазерного випромінювання, відповідних критичним значенням підриву товстих зразків. Подальше зменшення J можливо тільки при збільшенні щільності енергії ініціюючого лазерного імпульсу.

Світлочутливе ВР, що представляє собою когось позитив, що складається з мікрочастинок ГМТД, розподілених в інертній оптично прозорій полімерній матриці, розглядалось проф. М.А. Ілюшиним з колегами як екологічно-безпечне первинне ВР для лазерних засобів ініціювання. За способом збудження детонації, аномально високої чутливості до дії лазерного моноімпульсу та інші характеристики ГМТД можна віднести до нового класу первинних ВР. В цілому результати вивчення властивостей комплексних солей свідчать про перспективність пошуку потужних ініціюючих ВР [57].

Проблема отримання світлочутливих ВР з аномально-високою чутливістю до лазерного моноімпульсу в ряду комплексних солей d-металів на думку проф. М.А. Ілюшина пов'язана з вирішенням наступних завдань; вибір центрального іона комплексу, вибір зовнішнього аніона і вибір лігандів. Оскільки відомий вплив ширини зони на легкість переходу горіння в детонацію [77,78], в дослідженнях і розробці нових світлочутливих ВР вибирають в якості центральних іонів катіони d-металів з високими потенціалами іонізації [79].

Теоретичні оцінки та експериментальні дослідження показують[57, 103, 104], що «Основними летючими продуктами при розпаді комплексів є азот, оксиди вуглецю і азоту, вода, хлороводень і аміак. У газовій фазі виявляються також сліди HCN і HN_3 ».

У роботах, присвячених дослідженню солей перхлоріаміда, відзначається їх висока чутливість до механічних впливів, що може не тільки обмежити, але й заборонити їх використання в практиці проведення вибухових робіт. Однак експериментальні дослідження сполуки $\text{Ba}(\text{NClO}_3)_2$ показали [57, 103, 104], що при механічних впливах цей матеріал горить без переходу в детонацію, проте дія лазерного імпульсу ініціює детонацію в $\text{Ba}(\text{NClO}_3)_2$. Утворення великої кількості газів N_2 і O_2 сприяє швидкому переходу горіння в режим детонації, а високі швидкості енерговідводу при наносекундній дії лазерного моноімпульса ($\tau_{\text{и}} \sim 10^{-8}$ с технічно не можуть бути здійснені ніякими іншими способами).

Висновки: підвищення оптичної міцності середовищ при зменшенні діаметра розмірів лазерного пучка (зони взаємодії) пов'язане зі зменшенням числа поглинаючих мікронеоднородностей "небезпечною" величини, супроводжується різким збільшенням статистичного розкиду експериментальних даних середовище є дифузно-розсіюючим, тому ініціювання відбувається на деякій глибині, де встигає сформуватися ореол розсіювання.

Показано, що лазерне ініціювання енергетичних світлочутливих матеріалів є безпечнішим способом збудження детонації, ніж відомі не-електричні. Ця обставина пов'язана насамперед з тим, що композиційні високоенергетичні речовини являють собою флегматизировані первинні і вторинні ініціюючі ВР і характеризуються при цьому аномально високою чутливістю до лазерного імпульсного випромінювання. Спосіб перспективний для застосування в різноманітних засобах ініціювання лазерних систем; можливе підривання зарядів від мікроскопічних мас і обсягів. Низькі значення чутливості композиційних ВР до лазерного імпульсу дозволяють порушувати детонацію шару вибухової речовини одночасно на всій його поверхності незалежно від конфігурації.

ВИСНОВОК

Отримані результати спрямовані на отримання світлочутливих вибухових речовин (ВР) для оптичних детонаторів лазерних систем і визначення їх характеристик запалювання дозволяють розвивати теоретичні дослідження механізму лазерного ініціювання. Отримані наступні результати:

1. На основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлений комплекс вимог, яких необхідно дотримуватись при вирішенні завдань отримання високочутливих до дії лазерного імпульсу потужних комплексних ІВР.

2. Дослідження розмірного ефекту на прикладі Cu (АГТр) ClO_4 показали, що енергетично вигідно використовувати в оптичних системах ініціювання вузькі лазерні пучки діаметром менше 500 мкм. Отримані результати є науковою основою для розробки оптичних детонаторів - основного елемента лазерних систем ініціювання зарядів вибухових речовин.

3. У роботі підтверджено, що затримки ініціювання світлочутливих вибухових композитів на 2-3 порядки менше затримок запалювання, які отримані при інших видах впливу. Тому можна зробити висновок, що лазерний метод ініціювання здатний значно підвищити прецизійність, а значить, і якість проведення вибухових робіт в промисловості.

Експериментальні дослідження розмірного ефекту і вимірів затримок часу ініціювання вважаються найбільш важливими у вирішенні проблеми створення прецизійних оптичних детонаторів та ефективних лазерних систем ініціювання зарядів ВР.

Оцінка науково-технічної розробки зводиться до наступного:

- оптичні детонатори можуть бути використані тільки за прямим призначенням, тому відсутні стимули для розкрань таких засобів підривання;

- при використанні лазерної системи ініціювання збільшується безпека проведення підривних робіт, що веде до зниження травматизму та числа людських жертв на підприємствах;
- знижуються фінансові затрати на проведення організаційних і технічних заходів, спрямованих на охорону здоров'я і життя виконавців вибухових робіт.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Боуден Ф, Иоффе А. Быстрые реакции в твердых телах. –М.: ИЛ, 1962.–244 с.
2. Чернай А.В. Об инициировании химической реакции в ТЭНе // Физика горения и взрыва.– 1982.–Т.18, №6.–С.48–53.
3. Вилунов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ.– Новосибирск: Наука, 1984.–188 с.
4. Временные характеристики инициирования ТЭНа лазерным излучением / А.А.Волкова, А.Д. Зинченко, И.В. Санин и др.// Физика горения и взрыва.– 1977.–Т.13, №5.–С.760–766.
5. Карабанов Ю.Ф., Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Зажигание твердых вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем.–Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977.–С.5–8.
6. Исследование особенностей воспламенения конденсированных сред с поглощающими добавками при концентрированном подводе лучистой энергии /В.Е. Александров, А.В. Долголаптев, В.Б. Иоффе и др.// Физика горения и взрыва.–1983.–Т.19, №4.–С.17–20.
7. Карабанов Ю.Ф., Боболев В.К. Зажигание инициирующих взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением // Доклады АН СССР.–1981.–Т.256, №5.–С.1152–1155.
8. Александров Е.И., Вознюк А.Г. Иницирование азидов свинца лазерным излучением //Физика горения и взрыва.–1978.–Т.14, №4. –С.86–91.
9. Александров Е.И. Ципилев В.П. Исследование влияния длительности возбуждающего импульса на чувствительность азидов свинца к действию лазерного излучения // Физика горения и взрыва.–1984.– Т.20, №6.–С.104–109.
10. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора //Физика горения и взрыва.–1966.–№3.–С.132.
11. Hagan J.T., Chaundhri M.M. Low energy Lazer initiation of single crys. of –lead aside // J. Mat. Sci.–1981.–V.16, №9.– P.2457–2466.
12. Иницирование ТЭНа мощным лазерным излучением / А.И. Быхало, Е.В. Жужукало, Н.Г. Ковальский и др.// Физика горения и взрыва.– 1986.–Т.22, №4.–С.110–113.
13. Барановский А.М. Зажигание прессованных смесевых составов лазерным излучением // Физика горения и взрыва.–1983.–Т.19, №3. –С.95–96.
14. Воспламенение алюминий содержащих конденсированных систем лазерным моноимпульсным излучением /В.Б. Иоффе, В.Е. Александров, А.В.Долголаптев. и др.// Физика горения и взрыва.–1985.–Т.21, №3.–С.51–55.
15. Критические условия инициирования вторичных ВВ при импульсных тепловых воздействиях/ В.Н. Лобанов, Р.Г. Ленский, Ю.И. Плотников и др.// Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.– Черноголовка, 1989.–С.25–27.

16. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва.–1989.–Т.25, №1.–С.3–9.
17. Карабанов Ю.Ф., Карпухин И.А. Общие закономерности инициирования систем окислитель–горючее при механических и лазерных импульсных воздействиях // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.–Черноголовка, 1992.–С.59–60.
18. Александров Е.И., Ципилев В.П. Влияние модовой структуры лазерного излучения на устойчивость азид свинца // Физика горения и взрыва.–1983.–Т.19, №4.–С.143–146.
19. Александров Е.И., Ципилев В.П. Влияние давления прессования на чувствительность азид свинца к действию лазерного излучения // Физика горения и взрыва.–1982.–Т.18, №2.–С.100–103.
20. Математическое моделирование инициирования ТЭНа лазерным излучением / А.А. Волкова, В.Ф. Куропатенко, А.В. Першина и др. // Детонация. Критические явления. Физико–химические превращения в ударных волнах.–Черноголовка, 1978.–С.46–50.
21. Галеев И.А., Зайцев Б.Н. Об отражательной способности ВВ // Физика горения и взрыва.–1969.–Т.5, №3.–С.447.
22. Кузнецов В.Т., Скорик А.И. Зажигание октогена световым потоком // Физика горения и взрыва.–1977.–Т.13, №2.–С.271.
23. Страковский Л.Г., Фролов Е.И. Особенности зажигания полупрозрачных летучих ВВ монохроматическим световым потоком // Физика горения и взрыва.–1980.–Т.16, №5.–С.140–147.
24. Страковский Л.Г. Об очаговом механизме зажигания некоторых ВВ монохроматичным световым импульсом // Физика горения и взрыва.–1985.–Т.21, №1, С.41.
25. Страковский Л.Г., Уляков П.И., Фролов Е.И. Роль испарения в процессе зажигания взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва.–1980.–Т.16, №6.–С.59–64.
26. Страковский Л.Г., Уляков П.И., Фролов Е.И. Воспламенение некоторых вторичных ВВ лазерным излучением // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем.–Черноголовка, 1977.–С.8–12.
27. Лазерное воздействие на пористое ВВ без его инициирования / А.Д. Зинченко, В.И. Сдобнов, В.И. Таржанов и др. // Физика горения и взрыва.–1991.–Т.27, №2.–С.97–100.
28. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. О механизме инициирования ВВ излучением ОКГ // Физика горения и взрыва. –1969.–Т.5, №4.–С.475–480.
29. Переход горения конденсированных систем во взрыв/ А.Ф.Беляев, В.К.Боболев, А.И.Коротков и др. – М.: Наука, 1976,. – 458с.
30. Александров Е.И., Ципилев В.П. Размерный эффект при инициировании прессованного азид свинца лазерным моноимпульсом // Физика горения и взрыва.–1985.–Т.17, №5.–С.77–81.

31. Александров Е.И., Ципилев В.П. Исследование размерного эффекта при лазерном иницировании прессованного азида свинца. Влияние распределения световой энергии на поверхности ВВ на критические световые потоки // Физика горения и взрыва.–1983. –Т.19, №1.–С.78–80.
32. Александров Е.И., Ципилев В.П. Влияние режима генерации на особенности размерного эффекта при лазерном иницировании прессованного азида свинца// Физика горения и взрыва.–1982.– №6.– С.60–62.
33. О взаимодействии импульсного лазерного излучения с химически активными средами / М.А.Илюшин, Ю.В.Павутницкий, В.И.Ховайко, И.В.Целинский //Высокоэнергетическая обработка материалов.–Днепропетровск: Арт–Пресс.–1997.–С.80–82.
34. Александров Е.И., А.Г.Вознюк. Влияние статистики поглощающих неоднородностей на лазерное иницирование взрывчатого разложения // Физика горения и взрыва.–1988.–№6.–С.98–100.
37. Соболев В.В., Чернай А.В., Чернай В.А., Білан Н.В. Фізична модель запалювання лазерним моноімпульсом світлочутливих речовин з великою густиною розсіювачів // Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників –2007”.– Д.: Національний гірничий університет, 2007. С.174-181.
38. Соболев В.В., Чернай А.В. Использование метода монте-карло для решения задачи возбуждения детонации в заряде ВВ лазерным моноимпульсом // Информационный бюллетень Украинского союза инженеров-взрывников. – 2013. – № 1.– С. 3-8
40. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия.–М.: Наука, 1968.– 232 с
41. К вопросу о механизме зажигания взрывчатых составов лазерным моноимпульсом / А.В.Чернай, В.В.Соболев, М.А.Илюшин, Н.Е.Житник, Н.А.Петрова// Химическая физика.–1996.–Т.15, №3.–С134–139
42. . Чернай А.В. О механизме зажигания конденсированных вторичных ВВ лазерным импульсом// Физика горения и взрыва.–1996.–Т.32, №1.–С.62–69.
43. Соболев В., Чернай В. Явище аномально великої чутливості вибухових сполук до детонаційного перетворення при дії лазерного випромінювання // Наукові записки.–1998.–К.:Хрещатик.–Вип.1.–С.289–296.
44. Соболев В.В., Яркової Г.О., Чернай А.В. Синтез алмаза III. Теоретические исследования с применением квантово–механических методов расчета // Минералогический журнал. –1994. –№5/6. –С.23–30.
46. Соболев В.В. Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда // Доп. НАН України. – 2010. – №4. – С. 88-95
48. Нелинейное рассеяние лазерного излучения и кинетика химических реакций в микрообъемах вещества / А.А.Ковалев, Б.И.Машканцев и др. // Квантовая электроника. – 1984. – Т.11, №1. – С.119.
- 49.Илюшин М.А., Соболев В.В., Чернай В.А. Светочувствительные взрывчатые составы // Тез. докл. междунар. научн.– практич. конф., г.Павлоград, 14–15 мая 1997 г. – Павлоград, 1997. –С.36.

50. Чернай А.В., Соболев В.В. Аномальная чувствительность к детонационному превращению при воздействии лазерного моноимпульса – новое свойство взрывчатых составов // Сб. науч. тр. / Запорожье. – 1997. – С. 223–226.

52. Физико-математическая модель лазерного детонатора / С.Е. Куратов, А.А. Серёжкин, А.А. Чесноков // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2015. – Т.16, №1. – С. 1-9.

53. Sazonnikova N.A. Laser initiation of detonation of high-energy substances. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&CO.KG, 2013. – 257 p.

54. Hand C.F. Novel 300-watt single-emitter laser diodes for laser initiation applications // Proc. SPIE 7795, Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing and Firing VI, 779507. September 03 2010.

55. Илюшин М.А., Котомин А.А., Душенюк С.А. и др. Лазерное инициирование светочувствительных энергетических материалов, перспективных для систем пиротехники космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2017. – №1 (35). – С. 43–52.

56. Илюшин М.А., Целинский И.В., Котомин А.А. и др. Энергонасыщенные вещества для средств инициирования. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2013. – 176 с.

57. Илюшин М.А., Смирнов А.В., Судариков А.М. и др. Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях: монография / под ред. И.В.Целинского. – Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С.Пушкина, 2010. – 188 с.; ISBN 978-5-8290-0953-3.

63. Воздействие лазерного излучения на перхлорат (1,5-диаминотетразоло-N₂) пентаамминкобальта (III) // Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн. Тверьянович А.С., Аверьянов А.О., Илюшин М.А., [и др.]. – 2015. – № 12. – С. 3-7.

66. Таржанов В.И. Предвзрывные явления при быстром инициировании бризантных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т.39, №6. – С. 3-11.

67. Александров В.Е., Долголаптев А.В., Иоффе И.И. и др. Исследование особенностей воспламенения конденсированных сред с поглощающими добавками при концентрированном подводе лучистой энергии. – Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 17. – С. 17–20.

68. Чернай А.В., Соболев В.В. К вопросу о механизме зажигания взрывчатых материалов лазерным моноимпульсом // Физика и техника высоких давлений. – 1994. – Т. 4, № 2. – С. 111–115

69. Александров Е.И., Ципилев В.П. Размерный эффект при инициировании прессованного азид свинца лазерным моноимпульсом // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т.17, №5. – С.77–81

70. Илюшин М.А., Соболев В.В., Чернай В.А. Иницирующие взрывчатые вещества и составы в оптических системах инициирования пиротехнических средств // Вісник НГАУ. – 2001. – №1. – С.73–76

71. Иллюшин М.А., Целинский И.В. Иницирующие взрывчатые вещества. Состояние и перспективы // Российский химический журнал. – 1997. – Т. 41, № 4. – С. 3–13

90. Колесников И.В., Росоловский В.Я. О продуктах термического разложения перхлориламидов // Ж. неорг. хим. – 1969. – Т. 14, № 11. – С. 2917–2921.

91. Горбунов В.А., Шмагин Л.Ф. О горении перхлоратов и нитратов аммиакатов переходных металлов // Вопросы теории взрывчатых веществ. Тр. МХТИим. Менделеева. – 1974. – Вып. 83. – 95 с.

101. Данилов, Ю.Н., Илюшин, М.А., Целинский, И.В., Промышленные взрывчатые вещества. Ч. 1. Иницирующие взрывчатые вещества. – Санкт-Петербург: ИК “Синтез”, 2004. – 113 с.

102. Смирнов А.В., Илюшин М.А., Васильев В.П. Изучение механизма реакции атаки в катионе аквапентаамминокобальта (III) // Тез. докл. XVII Всесоюзн. Чугаевского совещания по координационной химии. – Минск: БГУ, 1990. – Т. 2. – 363 с.

103. методе получения механических импульсов нагружения, основанном на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов/ А.В.Чернай, В.В.Соболев, М.А.Илюшин, Н.Е.Житник // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, № 2. – С. 106–111.

104. Соболев В.В., Чернай А.В., Илюшин М.А. Высокочувствительные к лазерному воздействию взрывчатые составы // Химическая физика процессов горения и взрыва. ЧИХФ РАН. Черногоровка – Т. 2. – 1996. – С. 89–90

105. Чернай А.В., Соболев В.В. Лазерный метод получения профилированных детонационных волн для обработки материалов взрывом // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – № 5. – С. 120–123.

ДОДАТОК А

Відгук керівника дипломної роботи магістра
студента групи 184м-17-3
Забори Вячеслава Юрійовича

на тему «Закономірності ініціювання світлочутливих вибухових речовин
лазерним випромінюванням»

ДОДАТОК Б

Відгук рецензента на дипломну роботу магістра

студента групи 184м-17-3

Забори Вячеслава Юрійовича

на тему «Закономірності ініціювання світлочутливих вибухових речовин
лазерним випромінюванням»