ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Закусило Роман Васильович

УДК 622.271

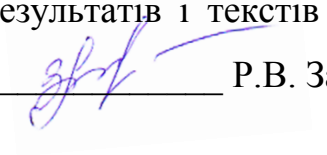
ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ НИЗЬКОШВИДКІСНИХ ПРОЦЕСІВ ДЕТОНАЦІЇ НА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБОТАХ

Спеціальність 05.15.03 − відкрита розробка родовищ корисних копалин

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



_____ Р.В. Закусило

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

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

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

У роботі як напрям наукового пошуку обрано виконання комплексу досліджень, спрямованих на розвиток вибухової техніки на основі низькошвидкісних процесів детонації та керування їх потенційними можливостями в наземному гірництві шляхом добору енергетично ефективних, стабільних за детонаційною здатністю, екологічно необтяжливих вибухових речовин і їх композицій, у т. ч. місцевого приготування. Для виконання поставлених у роботі завдань залучено аналітичні, термогравіметричні, мікроскопічні та полігонні дослідження для вивчення умов вибухового перетворення пропонованих композицій, встановлення раціональних фізичних та технологічних параметрів вітчизняних низькошвидкісних систем підривання місцевого приготування, забезпечення їх стабільного та безпечного функціонування в гірничій інженерії.

У дослідженнях розглянуто подовжений заряд у вигляді циліндричної оболонки з рівномірним нанесенням на внутрішню поверхню шару вибухової речовини з товщиною менше критичного діаметра. Такий шар практично не впливає на механічні властивості оболонки. Виконано теоретичне обґрунтування та експериментальну перевірку концепції струсного хвильового механізму формування пилоповітряної вибухової суміші під дією стартового ініціюючого імпульсу, зародження і поширення в коаксіальному хвилеводі стійкого детонаційного фронту в докритичному режимі. Для дослідження хвиль

пружних деформацій у стінці оболонки, під дією яких розпорошується вибухова речовина, використано рівняння руху для осесиметричного випадку.

Після струшування напиленої на внутрішній поверхні поліетиленової трубки часток ВР за допомогою електровибуху або вибуху детонатора в каналі хвилеводу утворюється пилоповітряна суміш, в якій зароджується і поширюється детонаційна хвиля. Її дія зі свого боку створює умову подальшого просування детонації. Розвиток процесу перетворення вибухової речовини, напиленої на внутрішню поверхню трубки детонуючого хвилеводу, відбувається на ділянці детонуючого хвилеводу довжиною 0,5 м (ділянка розгону) з наростаючою швидкістю, залишаючись далі на постійному штатному рівні.

У процесі виробництва хвилеводу можлива ситуація короткочасного порушення процесу дозування. У такій ситуації можуть утворюватися місця з малою кількістю детонуючого складу, який напилюється на внутрішню поверхню оболонки хвилеводу. Для встановлення максимальної відстані передавання детонації виконано дослідження, які показали, що максимальна довжина трубки без напилення з умовою передачі детонації складає 20 см для вітчизняного хвилеводу, і 22 см для хвилеводу фірми «Діно Нобель».

У розвитку цього явища досліджено механізм детонації через пасивний розгалужувач або комутаційний блок в 2, 3 і 4 відгалуження. У ході експериментів встановлено, що виготовлення комутаційних блоків – розгалужувачів, можливе з різних матеріалів (гуми, міді, сталі, алюмінію, оргскла, полістиролу, ПХВ і фторопласту), водночас детонація стабільно передається через незаповнений ВР відрізок порожнини сполучного пристрою на відстань не більше 150 мм. Випробування показали, що пристрій дозволяє безвідмовно передавати детонацію в 4 відрізки хвилеводу. Максимальний тиск у хвилі становить 6,5 МПа. Ґрунтуючись на експериментах, можна зробити висновок, що такі завдання, як ініціювання розосереджених зарядів, а також виключення підбивання хвилеводу, можуть бути вирішені застосуванням безкапсульних комутаційних блоків, які помітно скорочують витрати хвилеводу, особливо в умовах розосередження свердловинних зарядів.

Значну частину досліджень присвячено вдосконаленню засобів ініціювання промислових свердловинних зарядів з метою впровадження в практику БВР техніки безпечного виготовлення проміжних детонаторів (бойовиків) на місці виконання робіт, що є актуальним з економічних і екологічних міркувань. Перспективним напрямком у цій галузі є розробка вибухових композицій з невибухових вихідних речовин. Актуальність напрямку пов'язана з перевагами таких композицій, як безпека, екологічність у зв'язку зі зменшенням шкідливих виділень, можливість адаптування композиції до конкретних вимог щодо контролю потужності, швидкості детонації та інших характеристик ВР; зниження витрат на транспортування завдяки нечутливості до зовнішніх впливів; короткий термін придатності, потреба в спеціальних знаннях, обладнанні та контрольованих умовах, що зменшує ризики потрапляння до криміналу. В лабораторних умовах виконано термогравіметричні дослідження розкладання вибухових сумішей на основі пероксиду водню та гліцерину з використанням додаткових окиснювачів, а саме нітратів кальцію, калію, натрію. Для порівняння з композицією на основі перекису водню та гліцерину з домішками було розроблено альтернативну вибухову композицію на основі аміачної селітри та нітрометану. Для найбільш перспективних вибухових сумішей в лабораторії проведено розрахунки енергії Гіббса, зміна якої в ході хімічної реакції дорівнює зміні внутрішньої енергії та показує, яка частина від повної внутрішньої енергії системи може бути використана для хімічних перетворень, дозволяючи в заданих умовах встановити принципову можливість протікання хімічної реакції. Встановлено, що хімічний потенціал вибухової суміші аміачної селітри та нітрометану найвищий серед всіх розглянутих у роботі, що робить проміжні детонатори на її основі найбільш перспективними.

У роботі виконано експериментальні дослідження впливу форми бойовиків на їх ініціюючу здатність у свердловинному заряді. Досліджувалися конструкції бойовика з кутом конусності від 15° до 45° і доведено можливість підвищення ефективності бойовика у формі усіченого конуса при зменшенні його маси порівняно з традиційним.

У ході наукових досліджень приділено увагу розвитку напрямку, пов’язаному з опрацюванням вітчизняних аналогів сучасної емульсійної вибухової речовини в частині досягнення високої фізичної стабільності, підвищеної вибухової здатності, низької токсичності, широкого діапазону умов використання з доступністю сировини та високою безпекою виготовлення і застосування. Спільно з азербайджанськими колегами розроблено сімейство ЕВР «Азнітро», яке було запатентовано в Україні та впроваджено у виробництво в Республіці Азербайджан, де розробка може бути використана для вибухових робіт у гірничій інженерії для видобування низки корисних копалин. В основу розробки було поставлено завдання опрацювати емульсійний вибуховий склад, у якому заміна складових компонентів дозволила б забезпечити підвищення стабільності під час тривалого зберігання. Розрахунок графіка зміни енергії Гіббса залежно від температури для ЕВР «Азнітро» свідчить, що при температурі 2015 К відбувається зміна знаку енергії Гіббса. Це означає, що розроблена ЕВР має достатньо стабільні вибухові характеристики та високу потужність.

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

Актуальність розробки вітчизняних низькодетонаційних засобів ведення вибухових робіт важлива для напрямку, пов’язаного з розвитком в Україні техніки ощадливого відділення блоків декоративного каменю. Відповідно в роботі виконано дослідження зі створення гетерогенної вибухової системи, яка гарантує стійкий низькошвидкісний детонаційний режим динамічного навантаження середовища вибухом і забезпечує в площині шпурових зарядів достатні відривні напруження без порушень структури відділеного кам’яного блока. Система базується на відмові від традиційних у вибуховому складі небезпечних за транспортуванням і технологічним виготовленням та

сенсибілізуючих ВР – нітроефірів через їх заміну безпечними компонентами – дизельним паливом або нітрометаном в якості пального і перхлорату калію в якості окисника, а також оксиду марганцю (IV), як каталізатора термічного розкладання. Досліджувані склади мають невисокі значення температури вибуху і теплоти вибуху і незначний об’єм газоподібних продуктів. Крім того, дослідно встановлено, що розроблені К-заряди надійно спрацьовують від штатних засобів ініціювання – електродетонаторів ЕД-8 і детонуючого шнура ДШЕ-12. Графік зміни енергії Гіббса для композиції перхлорату калію з нітрометаном свідчить про зміну напрямку реакції вибухового складу перхлорату калію та нітрометану при 5890 °С. Це показник, який значно перевищує стандартні енергії Гіббса для штатних промислових ВР і свідчить про можливість використання суміші для складних вибухових пристроїв типу К-труб, і навіть для проміжних детонаторів. Враховуючи прийнятний рівень енергетичних та детонаційних параметрів складу ПХК + НМ та його низьку чутливість до механічної дії, ця вибухова композиція може успішно конкурувати з традиційною в якості К-зарядів для відбивання блочного каменю.

У межах проведених досліджень розроблено ізогідричний метод отримання сферичних кристалів високоенергетичних матеріалів (перхлоратів) у кристалізаторі-модифікаторі. За базовими детонаційними характеристиками пропоновані композиції придатні для застосування в шпурових зарядах, відрізняючись малим критичним діаметром, тобто підвищеною чутливістю на стадії ініціювання. У результаті виконаного комплексу досліджень створено конкурентний аналог К-зарядів на основі низькошвидкісних сумішевих вибухових речовин – перхлорату калію і дизпалива (нітрометану), розроблено технологію виготовлення циліндричної оболонки К-труб, чим створено вітчизняну безпечну вибухову систему місцевого комплектування безпосередньо в умовах гірничих підприємств з видобування блоків декоративного каменю.

У результаті виконаних наукових розробок вітчизняне гірництво отримує низку практичних пропозицій, спрямованих на вдосконалення вузлових

моментів прогресу в сучасній вибуховій справі, переважно на відкритих розробках корисних копалин, які в найближчі роки можуть бути затребувані індустрією. Серед цих розробок стабільна і безпечна в роботі вітчизняна неелектрична ініціююча система, створена на низькошвидкісному режимі детонації, яка в поєднанні з пасивними блоками – розгалужувачами, суттєво скорочує витрати детонуючого хвилеводу і часу на комутацію вибухової мережі, а гірництво отримує нові можливості регулювання механічного ефекту і зменшення сейсмічних проявів в 1,9 рази під час вибуху систем свердловинних зарядів обмеженої довжини; універсальна промислова ЕВР «Азнітро», яка в поєднанні з засобами реалізації низькошвидкісних ініціюючих процесів забезпечує фізичну стабільність систем, скорочення витрат на руйнування гірських порід, безпеку та екологічну чистоту технологічних процесів; принципово нові за складом, конструкцією і безпекою проміжні детонатори (бойовики) на основі місцевих невибухових компонентів (аміачної селітри, пероксиду водню, гліцерину) виключають потребу в заводських тротилових і тротил-гексогенових аналогах; розроблено вітчизняну безпечну вибухову систему типу К-зарядів місцевого комплектування на основі низькошвидкісних сумішевих вибухових речовин – перхлорату калію і дизпалива (нітрометану) для видобування цінної кам’яної сировини; перехід на вибухові системи місцевого приготування, які виготовлено з невибухових матеріалів, кардинально вирішує безпекову проблему, практично виключаючи технологічні ризики поза межами гірничого підприємства; розглянуто перспективи і напрямки застосування низькошвидкісних засобів ведення промислових вибухових робіт із використанням послідовності та особливостей розвитку зони незворотних деформацій під впливом пружних сил післядії, врахуванням специфіки формування в міжзарядному просторі взаємодіючих силових полів з метою підсилення механічного ефекту вибуху в потрібному напрямку в умовах масових вибухів, що принципово піднімає рівень розглянутих технологій.

Техніко-економічна оцінка застосування вітчизняної ініціюючої системи в масовому вибухові з використанням пропонованих у роботі рішень показала,

що при її впровадженні в поєднанні з інертними розгалужувачами в умовах масових вибухів свердловинних розосереджених зарядів за річної продуктивності підприємства в 1,0 млн $м^3$ видобутої гірської маси, економічний ефект від впровадження пропонованих розробок становитиме понад 3770000 грн.

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

ABSTRACT

Zakusylo R. V. Scientific foundations for the implementation of low-speed detonation processes in open-pit mining.

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

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

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

After shaking off the particles of explosive material sprayed on the polyethylene tube's inner surface using an electric explosion or a detonator explosion, a dust-air mixture is formed in the shock-tube channel, where the detonation wave is generated and propagated. Its effect, in turn, creates a condition for further

advancement of detonation. The development of the transformation of the explosive material sprayed on the detonation shock tube's inner surface occurs on a section of the detonating shock tube 0.5 m long (acceleration section) with increasing speed, remaining further at a constant standard level.

In shock-tube production, short-term disruption of the dosing process is possible. In such a situation, areas with a small amount of detonating composition, which is sprayed onto the inner surface of the waveguide shell, may form. Studies have been carried out to establish the maximum distance of detonation transmission, which has shown that the maximum length of the tube without spraying with the condition of detonation transmission is 20 cm for a domestic shock tube and 22 cm for a waveguide from the Dino Nobel Company.

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

A significant part of the research is devoted to improving the means of initiating industrial borehole charges to implement in practice the technique of safe production of intermediate detonators at the mining area, which is relevant for the economy and environment. A promising direction in this field is the development of explosive compositions from non-explosive raw materials. The relevance is associated with the advantages of such compositions as safety for the environment due to the reduction of harmful emissions and safety in use; the ability to adapt the composition to specific requirements for controlling explosion power, detonation

velocity, and other characteristics of the explosive; reduced transportation costs due to insensitivity to external impacts; short shelf life the need for special knowledge, equipment and controlled conditions, which reduces the risks of appearing criminal situations appearance. In laboratory conditions, thermogravimetric studies of the decomposition of explosive mixtures based on hydrogen peroxide and glycerin were performed using additional oxidizers (calcium, potassium, and sodium nitrates). Compared with the composition based on hydrogen peroxide and glycerin with impurities, an alternative explosive composition based on ammonium nitrate and nitromethane was developed. Gibbs Energy was calculated for the most promising explosive mixtures. Its change during a chemical reaction shows what part of the total internal energy of the system can be used for chemical transformations, allowing it to establish the principal possibility of a chemical reaction under specific conditions. It was established that the chemical potential of the explosive mixture of ammonium nitrate and nitromethane is the highest among all those considered in the research, which makes intermediate detonators based on it the most promising.

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

During scientific research, the focus was on the invention of domestic analogs of modern emulsion explosives in terms of achieving high physical stability, increased explosive capacity, low toxicity, a wide range of use conditions with the availability of raw materials, and high safety of manufacture and application. Together with Azerbaijani colleagues, the Aznitro emulsion explosives were developed. They were patented in Ukraine and introduced into production in the Republic of Azerbaijan, where emulsion explosives can be used for blasting in mining engineering. The development was based on creating an emulsion explosive composition in which the replacement of the constituent components would allow for increased stability during long-term storage. The calculation of the graph of the change in Gibbs energy depending on the temperature for Aznitro emulsion

explosives shows that the sign of the Gibbs energy changes at a temperature of 2015 K. It means that the developed emulsion explosive has sufficiently stable explosive characteristics and high explosive power.

The availability and cheapness of raw materials, the absence of individual explosives in the composition of emulsion explosives, the elimination of the problem of transportation and storage of hazardous substances, the possibility of mechanizing the process of producing emulsion explosives with adjustable characteristics and charging operations, in combination with low-speed detonators, an emulsion explosive that is capable of meeting the needs of the republican mining industry has been developed.

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

The studied compositions have low explosion temperatures, the heat of the explosion, and insignificant volume of gaseous products. In addition, it was experimentally established that the developed K - charges reliably work from standard electric detonators ED-8 and detonating cord DSHE-12. The graph of change in Gibbs energy for the composition of potassium perchlorate with nitromethane indicates the change in the direction of the reaction at 5890°C. This indicator significantly exceeds the standard Gibbs energies for standard industrial explosives. In addition, it proves the possibility of using the mixture for complex explosive devices such as K-tubes and intermediate detonators. Given the acceptable level of energy and detonation parameters of the potassium perchlorate +

nitromethane composition and its low sensitivity to mechanical impact, this explosive composition can replace the traditional one as a K-charge for chipping of block stone.

An isohydric method for obtaining spherical crystals of high-energy materials in a crystallizer-modifier was developed. According to the general detonation characteristics, the proposed compositions are suitable for use in borehole charges, differing in a small critical diameter and increasing sensitivity at the initiation stage. As a result of the completed research, a competitive analog of K-charges was created based on low-velocity mixed explosives - potassium perchlorate and diesel fuel (nitromethane). A technology for manufacturing a cylindrical shell of K-tubes was developed, which created a domestic safe explosive system for local preparation in the conditions of mining enterprises for extracting decorative stone blocks.

As a result of the scientific developments carried out, the domestic mining industry received several practical proposals aimed at improving the key points of progress in modern explosives, mainly in open-pit mining, which may be valid for the industry in the coming years. Among these developments is the stable and safe domestic non-electric initiating system, based on a low-speed detonation mode, which, in combination with passive blocks (splitters), exponentially reduces the cost of the shock tube and the time for switching the explosive network, and mining receives new opportunities to regulate the mechanical effect and reduce by 1.9 times seismic activities during the explosion of borehole charge systems of limited length. The industrial emulsion explosive mixture Aznitro, with means of low-speed initiation, ensures the physical stability of systems and reduces the cost of rock destruction, safety for people, and the environment of technological processes. Intermediate detonators (booster) based on local non-explosive components (ammonium nitrate, hydrogen peroxide, glycerin) that are fundamentally new in composition, design, and safety eliminate the need for TNT and TNT-hexogen analogs. A domestic safe explosive system of the K-charges type of local preparation based on low-velocity mixed explosives - potassium perchlorate and diesel fuel (nitromethane) for the extraction of valuable stone raw materials has been developed; the transition to locally prepared explosive systems made of non-explosive materials fundamentally solves the safety problem, practically eliminating technological risks

outside the mining enterprise. The prospects and directions of the application of low-speed means for conducting industrial blasting operations are considered, using the sequence and features of the development of the irreversible deformations zone under the influence of elastic aftereffect forces, taking into account the specifics of the formation of interacting force fields in the inter-charge space to enhance the mechanical effect of the explosion in the desired direction under conditions of mass explosions, which fundamentally raises the level of the technologies under consideration.

The study of the application feasibility of the domestic initiating system in a mass explosion using the solutions proposed in the work showed that in combination with inert splitters in conditions of mass explosions of borehole charges with an annual productivity of the enterprise of 1.0 million m^3 of mined rock mass, the economic effect of the implementation of the proposed developments will be over 3.770.000 UAH.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

14. Шаров Б. І., Банишевський В. В., Чернов Е. Д., **Закусило Р. В.** Создание детонирующего волновода к неэлектрической системе инициирования (Проблемы и решения). *Артиллерийское и стрелковое вооружение (специальный выпуск)*. 2003. С. 36–37.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

27. Fabin M., Skóra P., Polis M., **Zakusylo R.**, Stolarczyk A., Jarosz T. Towards "green" ANFO: Study of perchlorates and inorganic peroxides as potential additives. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 15. P. 5636. URL: https://doi.org/10.3390/molecules28155636.

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

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

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

31. Polis M., Szydło K., **Zakusylo R.**, Hawelek L., Stolarczyk A., Jarosz T. Study of the Combustion Mechanism of Zn/KMnO4 Pyrotechnic

Composition. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 15. P. 5741. URL: https://doi.org/10.3390/molecules28155741

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

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

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

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

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

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

38. **Zakusylo R.**, Zakusylo D., Sałaciński T. Analysis of Standard Methods for Determining the Properties of Explosive Materials in Ukraine. *Central European*

Journal of Energetic Materials. 2023. Vol. 20, no. 1. P. 75–91. URL: https://doi.org/10.22211/cejem/162891

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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

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

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

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

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

66. Technological applications of border effects of hole charges system explosion / V. Kravets et al. *16th International Conference IPOEX 2019*

EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materiały, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2019. P. 4–5.

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

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

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

70. Zakusylo R. Study of intermediate detonators with a truncated conical shape / Badanie detonatorów pośrednich o ściętym stożkowym kształcie. *15th International Conference IPOEX 2018 EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materiały*, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2018. P. 8–9.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

80. Закусило Р. В. Исследование промежуточных детонаторов конической формы. *Матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції*

«Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі», м. Кривий Ріг. Кривий Ріг, 2017. С. 45.

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

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

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

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

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

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

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

88. Шукуров А. М., Кравець В. Г., **Закусило Р. В.** Теоретичні дослідження силового поля при вибуху нециліндричних зарядів. *Матеріали IV*

Міжнародної науково–практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка. Суми, 2018. С. 15–17.

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

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

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

ЗМІСТ

Вступ …… 30
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТА СПОСОБІВ ВЕДЕННЯ ВИБУХОВИХ РОБІТ У ГІРНИЦТВІ …… 38
1.1 Розвиток техніки ведення вибухових робіт у гірничій інженерії України ……. 38
1.2 Еволюція техніки ініціювання промислових зарядів …… 42
1.3 Розвиток неелектричних систем ініціювання …… 51
1.4 Тенденції в розвитку сучасних безпечних засобів ведення висаджувальних робіт і постановка завдань досліджень …… 58
Висновки до розділу 1 …… 66
РОЗДІЛ 2. ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПОЛІМЕРНІЙ КОАКСІАЛЬНІЙ ТРУБЦІ ПІД ДІЄЮ РУХОМОГО УДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ……. 67
2.1 Хвильові ефекти низькошвидкісної детонації в трубчастому детонуючому хвилеводі …….. 67
2.2 Поширення вільних хвиль уздовж осі циліндричної оболонки ….. 69
2.3 Побудова розв’язання рівнянь задачі рухомого навантаження … 75
Висновки до розділу 2 …… 81
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕТОНАЦІЙНИХ І ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНІЦІЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ……. 83
3.1 Методичні положення лабораторних досліджень ……. 83
3.2 Детонаційні процеси у варіантах вітчизняного хвилеводу …… 88
3.3 Техніка сфероїдизації порошкових композицій напилюваної ВР ... 93
3.4 Термодинамічні дослідження обраних складів напилюваних ВР ... 99
3.5 Динамічні параметри детонуючого хвилеводу …….. 103
3.6 Дослідження процесу передачі детонації до хвилеводу через пасивний розгалужувач …….. 112
Висновки до розділу 3 …… 117

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ СУМІШЕВОГО СКЛАДУ І КОНСТРУКЦІЇ ПРОМІЖНОГО ДЕТОНАТОРА (БОЙОВИКА) МІСЦЕВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ …….. 120
4.1 Добір компонентів сумішей для виготовлення бойовика на місці виконання робіт ……... 120
4.2 Термогравіметричні дослідження вибухових сумішей ……. 129
4.3 Термодинамічні розрахунки обраних рецептур …… 140
4.4 Енергія Гіббса як умова вибухового перетворення досліджуваних композицій ……... 144
4.5 Вплив геометрії проміжного детонатора на формування енергетичного поля ……. 152
4.6 Результати полігонних випробувань ефективності конічних бойовиків …….. 161
Висновки до розділу 4 …… 164
РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ПОБУДОВИ БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ВИБУХОВИХ МАТЕРІАЛІВ ……. 167
5.1 Розробка вітчизняних сумішевих вибухових речовин підвищеної безпеки для БПР на кар’єрах …….. 167
5.2 Розробка промислової емульсійної вибухової речовини «Азнітро» 175
5.3 Визначення ризиків при транспортуванні та заряджанні ЕВР ……. 181
5.4 Безпека технологічних процесів виробництва вибухових матеріалів ……. 188
Висновки до розділу 5 …… 197
РОЗДІЛ 6. НИЗЬКОШВИДКІСНІ ДЕТОНАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ЗАРЯДАХ ТИПУ К-ТРУБ МІСЦЕВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ …….. 200
6.1 Фізико-хімічні та енергетичні характеристики вибухових систем для зарядів К-труб ……... 200
6.2 Розробка способу отримання сферичних кристалів перхлоратів ізогідричним методом ……. 205
6.3 Визначення вибухових характеристик та процесів 212

низькошвидкісної детонації в К-трубках ……..
6.4 Порівняльні характеристики розроблених зарядів і засобів для відбивання блочного каменю ……. 214
Висновки до розділу 6 …… 217
РОЗДІЛ 7. РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ ВІТЧИЗНЯНИХ НИЗЬКОШВИДКІСНИХ СИСТЕМ ПІДРИВАННЯ …….. 219
7.1 Розробка вітчизняної вдосконаленої неелектричної системи ініціювання ……... 219
7.2 Практичні аспекти реалізації внутрішньосвердловинних уповільнень з використанням пасивного розгалужувача …… 228
7.3 Спосіб виготовлення вибухового складу К-заряду на місці виконання вибухових робіт …… 241
7.4 Специфічні масові рухи деформованого вибухом середовища в технологічних рішеннях ……. 244
7.5 Управління сейсмічним ефектом масових вибухів із використанням низькошвидкісних засобів ініціювання ……. 270
7.6 Порівняльна оцінка витрат на застосовування низькошвидкісної системи висадження …… 276
Висновки до розділу 7 …… 280
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ …… 284
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 289
ДОДАТКИ 317

ВСТУП

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

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

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

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

сприятливо вплинути на вектор подальшого розвитку наукової думки в даному напрямку.

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

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

здатність у робочому режимі. Ця мало вивчена тема вимагає значно ширшого дослідження.

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

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

Зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Робота виконана в рамках держбюджетної теми Шосткинського інституту СумДУ № 0117U003110 «Розробка низькошвидкісних вибухових засобів та їх застосування при відкритих гірничих роботах», науково-дослідної теми № 117.09.06.17/2017/у/ТХО/486 «Вибір і обґрунтування оптимального варіанта використання наливних і патронованих емульсійних вибухових матеріалів в умовах кар'єру ПАТ «Південний ГЗК», міжнародної грантової науково-

дослідної теми № 80.11-2020.01 «Науково-технічний супровід робіт та розробка директивно-проектної документації для створення хімічного виробництва на ділянці ТОВ «D M Servis» (республіка Азербайджан), науково-дослідної теми № 80.11-2023.СП/02 «Розробка Директивного технологічного процесу виробництва по збиранню системи ініціювання неелектричної «Хвиля» на дільниці ПрАТ "Інтервибухпром" та розробка проекту Технічних умов «Система ініціювання неелектрична "Хвиля"», науково-дослідної теми № 117.05.10.12 «Розробка директивного технологічного процесу (ДТП) отримання модифікованого анозиту потужністю до 1000 т/рік із заданими характеристиками», науково-дослідної теми № 117.05.11.12 «Розробка способу отримання кристалічного анозиту із заданими характеристиками», науково-дослідної теми № 117.05.12.12 «Розробка, виготовлення та поставка обладнання дослідної установки кристалізації для отримання модифікованого анозиту із заданими характеристиками», науково-дослідної теми 80.11-2024.СП/09 «Розробка технологічного регламенту на виробництво для ТОВ «ТЕХНОСТАРТ УА», науково-дослідної теми 80.11-2024.СП/10 «Розробка технічних умов на продукт для ТОВ "ТЕХНОСТАРТ УА"», в яких автор дисертації був науковим керівником або виконавцем за окремими розділами робіт.

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

Завдання досліджень

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

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

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

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

дослідження безпеки застосування низькошвидкісних детонаційних систем.

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

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

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

Наукова новизна отриманих результатів:

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

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

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

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

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

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

Практичне значення отриманих результатів

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Особистий внесок здобувача. Особисто автором обрано тему дисертації, визначено мету і завдання досліджень, сформульовано основні наукові положення роботи, розроблено методики проведення комплексу лабораторних, полігонних та промислових експериментів. Автором теоретично обґрунтовано механізм розвитку і протікання хвильових явищ в коаксіальному тілі детонуючого хвилеводу з наступним формуванням детонуючої пилоповітряної суміші [11, 16, 25, 43, 51, 59, 82]. Розроблено конструкцію пасивних комутаційних блоків і виконано дослідження щодо їх надійності у ході передачі детонаційного процесу системою вибухової мережі масового вибуху [1, 40, 50, 52]. Проведено дослідження щодо вибору композиції невибухових компонентів свердловинних бойовиків для їх виготовлення на місці виконання вибухових робіт [10, 21, 24, 27–35, 37, 49, 63–65, 67, 68, 70, 72–77, 79, 80, 84, 89, 90]. Досліджено характеристики існуючих та розробленої емульсійної ПВР [7, 20, 44, 78, 81]. Досліджено характеристики розроблених зарядів для видобутку

блочного каменю типу К-труб [2–5, 12, 13, 23, 36, 39, 57, 69, 71, 85]. Проведено оцінку безпеки та ефективності застосування низькошвидкісних систем підривання при масових вибухах та їх вплив на розповсюдження руйнування в гірничому масиві [15, 17–19, 22, 26, 58, 61, 62, 66, 86–88, 91]. Запропоновано методики та технологічний процес виготовлення всіх елементів нової безпечної низькошвидкісної системи підривання [6, 8, 14, 41, 42, 45–48, 53–56, 60, 83].

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

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

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

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТА СПОСОБІВ ВЕДЕННЯ ВИБУХОВИХ РОБІТ У ГІРНИЦТВІ

1.1 Розвиток техніки ведення вибухових робіт у гірничій інженерії України

Сучасні тенденції розвитку вибухової справи під час видобутку родовищ корисних копалин привертають увагу вітчизняних фахівців та науковців до розвитку цього важливого кластера науки. Поряд з розвитком методів підвищення якості вибухових робіт, з метою раціонального комплексного використання природних ресурсів, зростають вимоги до безпеки праці та охорони навколишнього середовища. Враховуючи ці запити з боку промисловості, актуальною проблемою, вирішення якої важливе і з наукової, і з практичної точки зору, є розробка вітчизняних засобів висадження місцевого приготування. Більша частина їх компонентів не є власне ні вибуховими речовинами, ні вибуховими матеріалами. Одночасно з добором безпечних вихідних матеріалів для приготування вибухових сумішевих ВР на місці виконання гірничих робіт вирішується інше завдання, пов’язане зі зниженням швидкості детонаційних процесів в елементах вибухової системи. Такий підхід не лише сприяє підвищенню безпеки промислових вибухових робіт, а й сприяє свідомому втручанню в складний механізм управління деформаційними явищами в часі динамічного руйнування природної структури гірського масиву.

Згідно з пануючими довгий час уявленнями щодо механізму руйнування гірських порід вибухом вважалося, що умовою для ефективного руйнування гірських порід є відповідність акустичних імпедансів джерела вибуху (заряду) і об’єкта руйнування. Ухвалена концепція призвела до бурхливого розвитку індустрії промислових вибухових речовин, асортимент яких сягнув кількох тисяч, оскільки кожна з ВР за детонаційними характеристиками мала максимально відповідати згаданому співвідношенню разом з умовами застосування ВР. З огляду на подальший розвиток вибухової справи, особливо щодо ведення масових вибухів на підприємствах з відкритою розробкою родовищ корисних копалин – кар’єрах, ця пануюча концепція суттєво змінилася

не лише через її недостатню наукову обґрунтованість, а й через економічні міркування.

Згідно з сучасними уявленнями про механізм руйнування гірських порід під дією вибухової хвилі цей процес відбувається у дві основні стадії. Вважається, що на першій, так званій докритичній стадії існуючі в гірській породі мікродефекти природного походження під дією вибухового імпульсу розвиваються у в'язкому режимі відносно повільно порівняно з часом існування вибухового імпульсу. Друга стадія відрізняється їх лавинним розвитком, який спричиняє масові переміщення. На першій стадії в субкритичному режимі зрушується і взаємодіє система мікродислокацій, що призводить у ході їх розвитку і поєднання до утворення мікрощілин. Згідно з теорією Гріффітса після появи достатньо великої тріщини процес руйнування протікає автокаталітично. Однак в надкороткому часі динамічного навантаження запускається певний інкубаційний період, необхідний для зрушення розвитку і взаємодії мікродефектів. Залежно від співвідношення між часом дії вибухового імпульсу та інкубаційним періодом змінюється енергетика деформаційного процесу. За умови, коли час дії вибухового імпульсу менший інкубаційного періоду, руйнування породи відбудеться лише при напруженнях, близьких або більших від її теоретичної міцності (10^2 ... 10^3 ГПа), тобто на фронті ударної хвилі (фактично на контакті з зарядом або в безпосередній близькості від нього). З віддаленням від заряду ударна хвиля з втратою енергії на деформування середовища поступово деградує, вироджуючись у хвилю напружень, в якій поряд з інтенсивним напруженням включається чинник часу. Процес навантаження руйнованого середовища сповільнюється, наближаючись до інкубаційного періоду. В цих умовах вірогідність досягнення оптимуму енерговитрат на руйнування зростає.

Зважаючи на ці міркування, для ефективного руйнування породи з метою отримання потрібного гранулометричного складу руйнованого масиву, час навантаження доцільно наближати до тривалості інкубаційного періоду. Звідси виникає важливість оптимізації часу прикладання динамічного навантаження, що можливо реалізувати через добір детонаційних характеристик промислового

заряду ВР, які б забезпечували більш сприятливий механізм руйнування об’єкта.

Таким чином, загально прийнята у свій час концепція розробки рецептур ВР для руйнування міцних гірських порід, яка ґрунтується на доцільності максимального підвищення бризантності, підлягала перегляду, оскільки вона суперечила знаходженню оптимального механізму передачі в середовище і реалізації енергетичного потенціалу вибухового імпульсу відповідно до технологічних вимог.

На результати подрібнення гірських порід вибухом впливає велика кількість чинників, які умовно поділяються на такі групи: геологічні характеристики, фізико-механічні властивості порід, технологічні параметри вибухових робіт (розміщення свердловин, методи і послідовність підривання і т. п.). Регулювання властивостей в перших двох групах на сьогодні не є економічно обґрунтованим і дуже рідко застосовується, тому науковці і практики гірництва приділяють увагу методам керування параметрами в межах третьої групи, тобто для підвищення інтенсивності та рівномірності дроблення скельних порід застосовують низку технічних і технологічних прийомів впливу на розвиток процесу ефективної передачі енергії вибуху структурі гірського масиву. Серед цих прийомів домінують типи ВР, конструкція зарядів, схеми підривання, способи ініціювання та ін., що в комплексі дозволяє управляти ефективністю використання енергії вибуху. У вивченні механізму руйнування гірських порід деякі автори віддають перевагу пружному механізму вибухового руйнування, заснованому на послідовному формуванні під дією хвиль напружень систем радіальних та тангенціальних тріщин, які, взаємодіючи, формують зону руйнування розміром 100...150 радіусів заряду [1–4].

Водночас руйнуючій дії газоподібних продуктів детонації (ПД) призначається вторинна роль, оскільки ця дія в часі значно відстає від часу розповсюдження масивом хвиль напружень. Вважалося, що оскільки тиск газоподібних ПД діє значно довше, ніж імпульс хвилі напруження, (до моменту початку розширення газоподібних продуктів вибуху), новоутворена хвилею напружень система тріщин вже існує.

Однак у більшості сучасних науково-технічних робіт дослідники віддають належне сукупності процесів, з яких формується явище деформування [5–8]. Процеси, що проходять під час руйнування середовища, залежать не лише від властивостей заряду ВР, але й від техніки підривання. Наприклад, під час вибуху заряду камуфлету проявляється процес розповсюдження хвиль напружень і процес взаємодії з середовищем газоподібних ПД, що розширюються. За наявності вільної поверхні, крім того, виникають руйнування під дією відбитих хвиль від денної поверхні та природних магістральних тріщин, зустрічне зміщення окремих мас гірського масиву. Під час підривання в тріщинуватому середовищі важливу роль займає співударяння природно сформованих окремостей. Ці процеси в часі відбуваються значно повільніше – якщо швидкість вибухової хвилі досягає 5 тис. м/с, а швидкість розвитку новоутвореної тріщини – 1...2 тис. м/с, то взаємні масові зміщення окремих мас порід, зрушених під тиском ПД, вимірюється сотнями і навіть десятками метрів за секунду. Це полегшує втручання в процес дезінтеграції масиву існуючими засобами.

Для удосконалення буро-вибухових робіт, оперативного керування дією вибуху на середовище, що руйнується, розробки апарату математичного моделювання процесу руйнування скельних порід необхідно володіти можливостями кількісної оцінки впливу кожного з параметрів буро-вибухових робіт на кінцеві результати вибуху. Вважається, що найбільший вплив на якість дроблення гірських порід мають міцність породи, тріщинуватість, питома витрата ВР, діаметр свердловини, лінія опору по підошві, відстань між свердловинами в ряду, відстань між рядами, схема підривання, довжина забійки, кількість рядів, інтервал і послідовність у техніці застосування коротких сповільнень [1, 9]. Певним чинникам, таким як детонаційні параметри ВР, умови і засоби ініціювання, обводненість масиву, щільність заряджання, конструкція заряду, якість забивки, виділено менше уваги [1]. На сьогодні як практикою буро-вибухових робіт, так і теоретичними дослідженнями встановлено, що якість дроблення гірських порід і техніко-економічні показники значною мірою залежать від конструкцій свердловинних зарядів.

Ефективність застосування тієї чи іншої конструкції заряду буде зумовлена гірничо-геологічними умовами і техніко-економічними вимогами, які висуваються до якості підготовки гірської маси [5–7]. Серед чинників, що впливають на якість подрібнення гірських порід, поряд з їх природними властивостями впливають зовнішні чинники – конструктивні й технологічні параметри, а також умови підривання і параметри вибухового імпульсу (максимальний тиск на фронті хвилі та час дії ПД на середовище). Фізичні параметри, які визначають ефективність сучасних методів вибухового руйнування гірських порід, умовно можна поділити на три групи: енергетичні та часові (тиск ПД і тривалість прикладання вибухового навантаження); технологічні й конструктивні параметри підривання (підпірна стінка, висота уступу, конструкція свердловинних зарядів), а також енергетичні параметри (регулювання питомої витрати ВР та питомої щільності енергії). Як правило, перші дві групи методів керування дією вибуху не потребують додаткових витрат, тоді як використання методів третьої групи пов’язане з матеріальними і відповідно економічними витратами.

1.2 Еволюція техніки ініціювання промислових зарядів

У наш час розроблено різноманітний асортимент вибухових матеріалів (ВМ), що безупинно оновлюється та вдосконалюється у зв’язку зі зростанням вимог до них. Ці вимоги виникають із необхідності підвищення ефективності та безпеки зарядних робіт, які в останні роки часто виконуються механізованим способом.

У промисловій техніці терміном «засоби ініціювання» позначають різні пристрої та пристосування для ініціювання початку реакції в системах, здатних до вибухового перетворення або горіння. Щоб спричинити таке перетворення, необхідно надати системі певну кількість енергії – початковий імпульс.

Вибір енергії для порушення системи визначається призначенням та умовами застосування даного виду заряду, а також його чутливістю до впливу різних форм енергії. Засоби ініціювання використовуються в різних вибухових

пристроях та під час виконання вибухових робіт. Ці засоби, крім основних елементів, можуть містити і додаткові деталі та пристрої для підвищення міцності, посилення дії основних елементів, обтюрації газів тощо. Наявність тих або інших додаткових деталей та пристроїв визначається призначенням і конструкцією засобів ініціювання. Від якості засобів ініціювання в експлуатації залежать ефективність використання енергії вибухових речовин під час виконання вибухових робіт та їх безпеки. Тому до засобів ініціювання висуваються такі вимоги, як безвідмовність дії, що залежить від чутливості засобів ініціювання до даного виду початкового імпульсу, спрацьовування заряду, що ініціюється, з максимальним коефіцієнтом корисної дії, одноманітність дії. Величина початкового імпульсу та його інтенсивність значною мірою визначають характер перетворення заряду, що ініціюється, та ефективність його дії.

Застосування недостатньо потужних імпульсів при ініціюванні зарядів бризантних ВР може призвести до відмов, неповної детонації та ін. Тому потужність засобів ініціювання має забезпечити не лише безвідмовну, але й одноманітну дію ініційованих зарядів.

Одночасно до перерахованих вимог додаються безпека при транспортуванні та під дією ударів, виробничо-економічні вимоги (простота конструкції; стандартизація й уніфікація засобів ініціювання; застосування недефіцитних матеріалів).

Бурхливий розвиток засобів ініціювання пов’язаний з впровадженням у практику підривних робіт електричних систем, заснованих на передачі енергії від зовнішнього джерела струму електричними ланцюгами до електродетонаторів, які споряджені електрозапалювальними пристроями (засобами займання), певними наважками ініціюючої вибухової речовини (ІВР) та бризантної вибухової речовини (БВР). Вибух від електродетонатора передається або безпосередньо заряду, що ініціюється, або проміжним пристроям, що розводять вибуховий імпульс по мережі та посилюють початковий імпульс вибуху.

Необхідність використання високочутливих до механічних впливів та електричних зарядів досить потужних ІВР та капсульних складів на їх основі є специфікою виробництва та використання капсульних засобів ініціювання, що потребує вдосконалення технології та методів контролю безпеки електричного підривання.

Одноразовість дії та наявність чутливих речовин і складів є відмінною особливістю засобів ініціювання (ЗІ). У зв'язку з цим широке використання ЗІ в техніці суттєво залежить від рівня їх надійності у роботі, відсутності несанкціонованих спрацьовувань.

Підвищена увага до безпеки використання електричних ЗІ пов'язана з деякими особливостями їх роботи. Імовірність детонації ЕД за межами заряду ВР і поза зарядною камерою невелика. Однак несанкціоновані вибухи за невмілого їх використання цілком можливі. Як приклад наводять ініціювання вибуху метану від електродетонатора, використаного для подовження вибухової лінії [10].

Існує також ймовірність порушення устя шпуру при верхньому (передньому) розташуванні бойовика з одночасним викиданням бойовика та розташованого в ньому ЕД.

Ефективність електричного ініціювання максимально реалізується при груповому короткосповільненому підриванні з заданими інтервалами уповільнень, а також під час розробки оптимальних прийомів просторового розташування зарядів ВР у масиві та напрямків їх ініціювання за допомогою вибору місця та інтервалів ініціювання частин окремого заряду. Ці прийоми забезпечують збільшення часу дії на масив, особливо при масових вибухах на окремих гірничих розробках.

На відміну від підземних гірничих робіт для відкритої розробки характерна велика кількість груп зарядів, що вибухають у заданій послідовності. Це ускладнює роботи з комутації вибухової мережі та забезпечення їх безпеки. Відомо, що для найбільш поширеного електричного методу ініціювання характерне існування ризиків неконтрольованого підривання ЕД, пов'язаних з дією статичної електрики, блукаючих струмів і

струмів витоку, грозової електрики та ін. Попередження небезпеки реалізується шляхом обмеження можливості появи цих струмів ізоляцією електричної мережі та вимірюванням їх інтенсивності. Згідно з деякими приписуючими документами [11, 12] ведення вибухових робіт із застосуванням ЕД дозволяється на відстанях 300 м від енергетичних ліній у разі ЕД з номінальним струмом займання, рівним 0,2 А, 200 м при ЕД – 0,45 А, 100 м при ЕД – 2 А. Однак, якщо на відкритих гірничих роботах відстані, що обговорюються, досить поширені, то в підземних виробках значення їх обмежуються розмірами виробок, в яких силова і вибухова лінії можуть розташовуватися паралельно на протилежних стінах. Зарубіжні джерела [13–15] звертають особливу увагу на можливість враження струмом підривників у ситуації, коли кінцеві дроти ЕД або вибухова лінія відкинуті вибухом на діючу енергетичну лінію. Це вимагає застосування особливих заходів безпеки шляхом винесення мінної станції та спеціальної підготовки підривників.

Щодо безпечних відстаней від джерел високочастотних електромагнітних випромінювань, варто контролювати рівень потенційної небезпеки радіочастот поблизу місця вибухових робіт, зберігання чи транспортування ЕД. Ця небезпека залежить від потужностей та частоти джерела випромінювань, його типу. Безпечні відстані в цілому можуть змінюватися в широкому діапазоні від десятків метрів за потужності антени 10–50 Вт до 17 км за потужності 500 kВт і більше [17–23].

Перераховані складнощі, що виникають під час електричного підривання, не вичерпують усіх небезпечних ситуацій, пов’язаних як з електричною природою ініціювання промислових зарядів, так і в цілому з технікою масового застосування систем електродетонаторів у масових вибухах [24, 25].

Відомо [17–24], що найбільш раціональним є спосіб управління процесом руйнування породного масиву, що базується на збільшенні часу дії імпульсу вибуху на масив. Це можливо насамперед із застосуванням низькошвидкісних ВР на основі аміачної селітри [32–42], а також з використанням спеціальних прийомів ініціювання подовжених зарядів, що найбільш широко застосовуються в гірничій справі [32, 34–45]. Однак із застосуванням

низькошвидкісних і низькочутливих найпростіших вибухових сумішей, виникає необхідність у розробці надійних і безпечних засобів спричинення детонації по довжині свердловинного заряду.

Установка на збільшення тривалості дії імпульсу вибуху в подовженому заряді призвела до рішень, заснованих на застосуванні лінійних зарядів, в тому числі й розосереджених [46, 47]. Природно, це вимагає застосування серії бойовиків, які встановлюються в різних частинах заряду та підриваються від окремого ініціатора. У цьому випадку застосувати електричний метод підривання без порушення відомих приписів безпеки неможливо. Це поряд з факторами електричної природи, які розглянуто вище, призводить до того, що поширений електричний метод ініціювання втрачає свої істотні переваги і може бути реалізований у вітчизняній практиці лише у поєднанні з методом підривання детонуючим шнуром.

Прогрес у технології вибухових робіт було досягнуто завдяки впровадженню ЕД із широким діапазоном сповільнень, що дозволило підвищити точність і розширити можливості електричного висадження.

Поряд з електричним способом висадження великого поширення набув спосіб висадження за допомогою детонуючого шнура (ДШ).

Основною ланкою в ланцюзі спричинення детонації свердловинних промислових зарядів ВР до 1990-х років був детонуючий шнур. У виробничій практиці шнури, що детонують, відносно стійкі до випадкових впливів – удару, тертя або стороннього електричного струму. У зарубіжній промисловості використовують ДШ із різною лінійною щільністю – від 0,85 до 85 г/м [46].

Вітчизняні ДШ мають переважно серцевину масою 10–13 г/м. Низькі технічні характеристики ДШ-А, ДШ-В та ДШЕ-12 спричинили необхідність розробки та розширення асортименту марок ДШ, що відрізняються масою ВР, матеріалом оболонки, міцністю на розрив, водо- та температуростійкістю, технологією виготовлення.

Детонуючий шнур повинен мати достатню кількість енергії для ініціювання проміжного детонатора, а також бути досить міцним з урахуванням

можливого розтягування, яке відбувається при зарядженні в процесі засипання ВР у свердловину, в яку вже опущений відрізок ДШ з бойовиком.

Перевагами ДШ є:

- безпека застосування в умовах потенційної небезпеки появи блукаючих струмів;

- можливість одночасного ініціювання без уповільнення або з мікросекундними уповільненнями груп зарядів ВР;

- можливість багаторядного підривання у свердловинах великого діаметра;

- можливість підводного підривання, коли ускладнена надійна ізоляція електричного кола.

Однак використання ДШ пов’язане з проявом низки його негативних якостей:

- монтаж вибухової мережі ДШ призводить до значної витрати найдорожчої потужної бризантної ВР;

- окремі типи ДШ вимагають для їх виготовлення дефіцитних натуральних матеріалів (лляної чи бавовняної пряжі), що погіршує економічні показники вибухових робіт;

- широко застосовувані типи ДШ в умовах ініціювання свердловинних зарядів можуть через досить високу енергію детонації спричиняти переущільнення заряду та створення каналу в заряді та набійці, що сприяють втраті частини енергії вибухових газів під час детонації основних зарядів;

- можливі підбої та пошкодження магістральних ліній ДШ на поверхні за наявності зайвих кінців шнура в мережі;

- необхідно стежити, щоб внутрішньосвердловинні та магістральні лінії ДШ взаємно не перетиналися, оскільки це може призвести до порушення послідовності ініціювання зарядів або їх частин, а також відмови детонації;

- при масових вибухах велика маса ДШ на поверхні блоку, що вибухає, породжує інтенсивну повітряну ударну хвилю, з огляду на це виникає необхідність або ініціювати окремі внутрішньосвердловинні відрізки ДШ

електродетонаторами, або покривати магістральні лінії ДШ шаром піску чи іншого ґрунту;

- короткосповільнене підривання із встановленням КЗДШ на поверхні блоку може призвести до часткових переміщень ґрунту чи породи під час вибуху;

- при використанні нормального ДШ усередині свердловини практично виключена можливість застосування багатоточкового ініціювання, тому для таких робіт потрібно застосування конструктивно складних ДШ – слабких за імпульсом детонації та спеціальних підсилювачів – бойовиків, здатних реагувати на напевно слабкий імпульс вибуху ДШ.

ДШ, що випускаються в Україні, незважаючи на вдосконалення їх конструкції та технології виготовлення, не позбавлені перерахованих недоліків.

Зниження наважки ВР у ДШ крім покращення економічних показників покращує і безпеку робіт, які проводяться з його використанням. Однак нижня межа навішування обмежується здатністю ДШ передавати детонацію.

Нормативно-технічною документацією, зокрема ДЕРЖСТ 6196-78, передбачено марку ДШ з лінійною щільністю 6 г/м. Зарубіжні аналоги ДШ характеризуються різною щільністю серцевини залежно від призначення.

У виробничій практиці Англії використовують малопотужні ДШ з лінійною щільністю 0,2–2,1 г/м [46].

Механізм ініціювання вибуху малими наважками ВР, що містяться в 1 м шнура, може відрізнятися від підривання великих зарядів, що передають у кожній точці поверхні досить велику енергію до кожної об’ємної частки вибухової суміші. Водночас ДШ, що має відповідну оболонку і покладений у вигляді прямої лінії, може мати при детонації недостатню енергію для ініціювання вибуху. Вибух може відбутися завдяки укладанню ДШ іншим способом. Оцінюючи безпеку ДШ по метану та пилу, необхідно звернути увагу на те, що він містить близько 10–12 г ТЕНу на 1 метр довжини. Це досить велика маса потужної ВР, яка може спричиняти при лінійному розташуванні ДШ запалювання вибухової суміші заряду. У зв’язку з цим велике значення має обплетення шнура, а також домішки, здатні вплинути на його безпеку.

Детонуючий шнур, вільно підвішений у виробці мінімум 50 см від перешкоди у вигляді прямого відрізка, має високий ступінь безпеки під час детонації і в цих умовах не спричиняє детонації вибухових сумішей. Водночас ініціювання ДШ, звитим у кільце, вигнутий ДШ або покладений дугою, може спричиняти ініціювання пилогазової суміші.

Проведені на шахті «Барбара» у Польщі дослідження [10] дозволили систематизувати за ієрархією безпеки основні помилки під час вибухових робіт, що супроводжують короткосповільнене підривання.

Дуже істотним фактором при підриванні ДШ у присутності газу та пилу є зовнішнє обплетення. Під час детонації прямих відрізків шнурів їхня безпека визначається кількістю ВР в одиниці довжини. Детонуючі шнури, що містять велику кількість ВР (>10 г/м) завжди зумовлюють небезпеку підривання метано-пилоповітряної суміші, якщо вони укладені не по прямій лінії, тому їх не можна підривати за межами зарядної камери, і в умовах будь-якого контакту (також за межами шпуру або свердловини) з вибуховою сумішшю.

Товщина ізоляції шнура та рівномірність її розподілу по довжині впливає на ймовірність підривання метано-пилоповітряної суміші. Водночас додавання до поліхлорвінілової оболонки речовин, що забезпечують її самогасіння, збільшує безпеку шнура. Дослідження показали, що лише комплексне урахування усіх факторів, що впливають на дію та якість ДШ, забезпечує необхідний мінімум ймовірності підпалювання метану та вугільного пилу. В цілому такими факторами є маса і тип ВР, що припадає на одиницю довжини ДШ, якість ВР, якість іншої сировини, що застосовується для виробництва ДШ, домішки до ВР та оболонки ДШ, рівномірність нанесення ізоляційного шару, якість обплетення тощо.

Дуже велике значення має механізм детонації ВР, яким споряджений ДШ. Зміна якості ТЕНу призводить до можливості виникнення дуже тривалих вторинних реакцій розкладання. Сильне вторинне полум’я при детонації ДШ спричиняє повторне зростання температури, небезпечне для газопилових сумішей у гірничих виробках. І в метано-повітряній, і в пилоповітряній атмосфері велике значення має характер укладання ДШ. Хвиляста лінія ДШ

призводить до явного зіткнення ударних хвиль (УВ) і продуктів детонації, що призводить до їх стиснення та зростання температури. Це збільшує у часі дію полум'я, величина та форма якого залежить від характеру вигину ДШ та його типу. Вигин ДШ під прямим кутом створює умови для виникнення потужного полум'я, здатного підпалити вугільний пил. Однак і детонація ДШ, покладеного кільцем, спричиняє появу сильного вторинного полум'я. Імовірність вибуху вугільного пилу під час укладання ДШ кільцем може збільшитися при зростанні кількості витків та зростанні діаметра витка до певної величини. Найменша кількість підпалів пилу отримана [45] при детонації ДШ у кухлі діаметром 5 см. Зростання діаметра витка до 10 см призвело до значного зростання кількості запалювань. Найбільше запалювань відбувалося при діаметрі кільця в 15 см. Подальше збільшення діаметра призводить до зменшення кількості запалювань.

Зростання довжини відрізка ДШ, звитого в кільце, збільшує ймовірність запалювання, водночас зростання вмісту ТЕН в серцевині не спричиняє одночасного зростання кількості запалювань.

Зазвичай вибухову відбійку зарядами в свердловинах великого діаметра і глибини на відкритих розробках виконують двома незалежними бойовиками, які опускають на окремих нитках ДШ у верхню частину заряду на висоті 1/3 м від дна. Негативний вплив здвоєних ниток ДШ на вибухову ефективність найпростіших ВР типу АС-ДТ полягає в: поблизу ДШ спричинення горіння, а далеко від ДШ – переущільнення та втрата чутливості, внаслідок чого спостерігається неповна детонація. Для вирішення цієї проблеми необхідне застосування ЕД замість ДШ для ініціювання донних проміжних детонаторів, проте спосіб небезпечний, особливо при механізованому зарядженні свердловин великого діаметра; підвищення чутливості найпростіших вибухових сумішей, щоб вони могли надійно детонувати лише від ДШ, однак це призводить до підвищення небезпеки при поводженні з цими сумішами; застосування прямого ініціювання, яке повністю виключає внутрішньосвердлвинну лінію ДШ або застосування ДШ з низькою енергією

при нижньому та верхньому розташуванні бойовика, але для цього необхідно використовувати ДШ спеціального виду для надійного ініціювання бойовиків.

Таким чином, детонуючі шнури забезпечують ведення вибухових робіт з високим ступенем безпеки, але водночас мають низку недоліків. Тому зарубіжні фірми «Нітро Нобель» (Швеція), «Геркулес» (США) та «Дюпон» (США) розробили нові неелектричні системи ініціювання [49–53].

1.3 Розвиток неелектричних систем ініціювання

В останні десятиліття широкого поширення у світі набули нові види неелектричних засобів ініціювання свердловинних і шпурових зарядів, об'єднаних збірною назвою «Нонель», або системи неелектричного ініціювання, що відрізняється підвищеною безпекою, простотою використання, можливістю створювати схеми короткосповільненого підривання з тридцятьма періодами.

У цій системі, альтернативній детонаційному процесу у традиційних ДШ, використовується процес руху канальних ударних хвиль. Цей фізичний процес покладено в основу відомої системи підривання NONEL GT, створеної шведської фірмою «Нітро Нобель АБ» [47].

Система «Нонель» за ліцензією виготовляється фірмою «Енсайн Бікфорд» (США) і складається з тришарової полімерної трубки, на внутрішню поверхню якої нанесено детонуючий склад. Зовнішній діаметр хвилеводу становить 3 мм, внутрішній діаметр – 1,5 мм. Зовнішній та середній шари виготовлені з поліетилену, а внутрішній – із кополімеру метакрилату та поліетилену «SURLYN». Швидкість вибухового перетворення детонуючого складу в трубці становить 1900±50 м/с, а наважка детонуючої суміші (ДС) – не менше 20 мг/м.

Детонуючий хвилевід (ДХ) «Нонель» входить до системи «NONEL GT», що складається з детонатора, хвилеводу та сполучного пристрою. Хвилевід кріпиться до детонатора з заданим ступенем уповільнення. З'єднувальний блок має пластмасовий корпус, всередині якого розміщено детонатор з певним

відрізком хвилеводу. На один відрізок хвилеводу може бути приєднано або два свердловинних детонатори, або два сполучні блоки. З'єднувач із вмонтованим малопотужним детонатором розраховано на чотири розгалуження: три свердловинні детонатори і один з'єднувач. Довжина відрізка детонуючого хвилеводу «Нонель» для подачі імпульсу у вибухову мережу становить 30–100 м. Вибухові мережі ініціюються одним із таких способів: за допомогою стартового пристрою, запалювальної трубки, капсуля-детонатора або електродетонатора. Система «Нонель» має низку переваг:

- низька витрата вибухової речовини;

- ударна хвиля поширюється внутрішнім каналом хвилеводу без будь-якого впливу на довкілля, оскільки оболонка хвилеводу не руйнується;

- відсутність бічного енерговиділення дозволяє здійснити точкове та багатоточкове ініціювання подовженого заряду;

- безпека в обігу, що виражається в несприйнятливості до блукаючих струмів, зарядів статичної електрики.

Завдяки високому рівню безпеки, система знаходить з кожним роком все ширше застосування за кордоном.

Фірма «Нітро Нобель АБ» випускає три модифікації системи [47–54, 56]:

NONEL GT/MS – універсальна для підривання із уповільненням 1 мс, у якій детонатори забезпечені індивідуальними елементами уповільнення;

NONEL UNIDET, у якій КД має індивідуальне уповільнення;

NONEL GT/T – для проведення гірничих виробок та тунелів, коли КД забезпечені власними уповільненнями та активація їх відбувається одночасно.

Принципово відрізняється від системи «Нонель» система «Геркудет» фірми Геркулес [61, 63], в якій замість твердої ВР полімерні трубки заповнюються сумішшю кисню з горючим газом. Після зарядження свердловин монтують мережу з порожніх пластикових трубок, перевіряють вибухову мережу на герметичність інертним газом, приєднують до свердловинних трубок КД, потім нагрівають газову суміш, що передає детонацію, і ініціюють її за допомогою запальної свічки. Фронт займистого газу проходить через вибухову мережу зі швидкістю 2440 м/с і підриває детонатори, встановлені в кожній

свердловині. На думку зарубіжних фахівців, система «Геркудет» може ефективно застосовуватися під час вибухових робіт поблизу потужних джерел електромагнітного випромінювання та ліній електропередач високої напруги.

Система «Нонель» за ліцензією виготовляється фірмою Енсайн Бікфорд (США). У системі використовується тонка пластикова трубка з кополімеру Сарлін, якою зі швидкістю 1800 м/с передається хвиля низької енергії [47].

Одним із варіантів системи неелектричного ініціювання зарядів ВР із використанням ДШ низької енергії є система Деталайн фірми «Дюпон» [44]. Магістральні та свердловинні шнури містять відповідно 1,6 та 0,26 г/м ВР та з'єднуються за допомогою стрілоподібного детонатора-стартера. У системі передбачено використання 19 інтервалів уповільнень, що дозволяє в широкому діапазоні комбінувати порядок уповільнень у схемі. Уповільнювачі можуть бути встановлені як на поверхні, так і в свердловині. Монтаж вибухової мережі відрізняється простотою та безпекою за високої продуктивності.

Досягненням є розробка фірмою «Nobel Explosives» (Великобританія) системи електричного ініціювання Магнадет [53], принципова відмінність якої від традиційних полягає в індуктивному зв'язку ЕД з магістральними або дільничними проводами. Основним елементом системи є детонатор, що складається з феритового кільця, на яке намотано кілька витків кінцевого дроту стандартного ЕД. Витки кінцевого дроту є вторинною обмоткою трансформатора, а первинна обмотка утворюється шляхом одноразового пропускання магістрального або дільничного дроту через феритове кільце. Інтервали уповільнення становлять 0,5 с для детонаторів уповільненої дії, 25 і 35 мс для короткосповільнених детонаторів.

Детонатор Магнадет не чутливий до блукаючих струмів і струмів витоку. Експерименти показали, що навіть при силі струму 70А в первинному ланцюгу, що значно перевищує можливу величину блукаючих струмів, детонатори Магнадет не вибухають. Система Магнадет є безпечною щодо потенціалів статичної електрики, які накопичуються при механічному зарядженні свердловин сумішами типу АС-ДП. Таким чином, застосування системи Магнадет дозволить не лише підвищити ступінь безпеки під час підривних

робіт, а й знизити витрати на підривання внаслідок зниження кількості відмов зарядів ВР, ліквідація яких є небезпечною та дорогою операцією.

У результаті розвитку та вдосконалення систем неелектричного ініціювання зарядів ВР за кордоном створено та застосовують низку систем, серед яких найбільш перспективною для широкого застосування є система «Нонель». Неелектричні системи ініціювання порівняно з електричними забезпечують ширший діапазон зміни часу уповільнення і в деяких випадках виявляються економічнішими [60–62].

Аналіз показує, що застосування системи «Нонель» дозволяє знизити собівартість підривання з урахуванням збільшення місячного проміжку вибою на 10–30 % порівняно з електричним ініціюванням.

На відкритих роботах застосування системи «Нонель» сприяє зниженню витрат на ініціювання на 8–17 % порівняно з ініціюванням детонуючим шнуром. У табл. 1.1 наведено порівняльні дані за 2017 р.

Таблиця 1.1. Порівняльна вартість використання засобів ініціювання при висадженні 40 свердловин

Тип витрат	ЕД стандартний, тис. грн	ЕД підвищеної безпеки, тис. грн	Система Нонель, тис. грн
Вартість ВР	55,92	55,92	55,92
Зарплатня	24,88	24,88	24,88
Амортизація обладнання	20,79	20,79	19,19
Вартість комплектів	19,49	32,42	33,80
Перевірка вибухової мережі	3,18	3,18	-
Вартість стартера	-	-	0,3
Різниця у вартості просування виробки	9,48	9,48	-
Загальні витрати:	133,74	146,67	134,19

Відомий асортимент системи «Нонель» та його характеристики наведено в табл. 1.2 [48, 54].

Таблиця 1.2. Асортимент системи «Нонель»

Виріб	Номер періодів сповільнення	Час сповіль-нення, мс	Інтервал сповільнення, мс	Стандартна довжина, м
NONEL GT/MS	3–20	75–500	25	3; 4,8; 7,8; 15; 0
NONEL GT/T	0 1–12 1–20 25–60	25 100–1200 1400–2000 2500–6000	- 100 200 500	6; 7,8
NONEL UNIDET	I 450 I 475 I 500	450 475 500	- - -	3; 4,8; 7,8; 15; 0
Сполучні блоки	IB 0 IB 17 IB 25 IB 42 IB 67 IB 109 IB 176	0 17 25 42 67 109 176	- - - - - - -	2,4; 4,8
Пристрій для зв’язку				6
Пускач Нонель				50; 100

Під час приймальних випробувань системи «Нонель» на Тишинському руднику [48] виконано 25 масових вибухів, за яких відпрацьовано систему зворотного ініціювання, яка забезпечила стійку детонацію грануліту АС-8 в заряді малого діаметра, зменшено масу ВР на один ступінь сповільнення до

100 кг з одночасним зниженням сейсмічного ефекту і підвищеннням стійкості закладного масиву та гірничих виробок на глибоких рудничних горизонтах, скорочено час монтажу ввибухової мережі, знижено витрати на буріння і збільшено коефіцієнт використання шпура (КВШ) з 0,7 до 0,95 порівняно з електровогневим методом висадження. Результати техніко-економічного розрахунку ефективності системи «Нонель» наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Порівняльні показники впровадження системи «Нонель»

Показник	Варіант	
	Базовий	Нонель
Погашено запасів, тис. т	250	250
Втрати руди, %	6	6
Розбіднення руди, %	15	13,5
Видобуто руди, т	272500	268750
Собівартість видобування 1 т руди, дол.	4,98	4,09
Питома витрата на первинне відбивання, кг/м^3	7,9	7,9
Вартістьсть 1 кг грануліту АС-8, дол.	0,41	0,41
Питомі витрати на ВР, дол./м^3	2,02	1,65
Загальні витрати електродетонаторів на висадження 250 тис. т руди, штук	3400	-
Вартість одного ЕД, дол.	0,15	-
Питомі витрати по ЕД, дол./т	493	-
Усереднені витрати комплектів «Нонель» на висадження 250 тис. т руди, шт.	-	2800
Середня вартість одного комплекту «Нонель» з урахуванням вартості стартера, сполучного блока, підривної машинки, дол.	-	2,2
Витрати на придбання 2800 комплектів системи «Нонель», долл.	-	6300

Як показали випробування на радянських ГЗК [63, 64], інженерно-технічний персонал та робітники гірничих підприємств швидко освоїли систему; застосування системи дозволило збільшити на порядок безпеку та надійність вибухових робіт із значним економічним ефектом.

На весь обсяг підривання не зафіксовано відмов, якість дроблення завдяки донному та верхньому ініціюванню значно покращилася, так само поліпшилося опрацювання підошви. Комбінація елементів свердловинних і поверхневих сповільнювачів дозволяє отримувати необхідні параметри підірваної гірської маси, а гарантоване спрацювання поверхневої мережі до початку детонації зарядів зводить до мінімуму ризик підбою поверхневої мережі.

Спроби застосування систем неелектричного ініціювання на польських гірничих підприємствах «Борувно» та «Гранична» у 1998 р. [67] зроблено з метою тестування системи SME (Site Mixing Emulsion), що полягає у виготовленні ВР з невибухових компонентів (Емулан) з механічним зарядником глибоких свердловин.

Випробування показали, що спосіб ініціювання суттєво позитивно впливає на безпеку вибухових робіт. Встановлено, що застосування системи «Нонель» відкриває нову якість ініціювання зарядів, оскільки ці засоби є найбезпечнішими, тоді як під час застосування ДШ не виключено ризик пошкодження ліній шнура, пошкодження сусідніх свердловин та появу відмов. При використанні електродетонаторів загрози існують з боку електричних та електромагнітних факторів, а також у зв’язку з чутливістю ЕД до зовнішніх впливів [57]. Перші пострадянські системи ініціювання «Еділін» або СІНВ, аналогічні шведській, за окремими компонентами суттєво відрізняються від неї. Так, у конструкції детонаторів використано оригінальні технічні рішення, які за деякими характеристиками перевищують шведський рівень [66, 69].

Починаючи з ударно-хвильової трубки (УВТ), у кожному елементі міститься низка складних технічних рішень: надійна фіксація вибухової речовини на стінці УВТ; заміна ініціюючого ВР у короткосповільненому детонаторі на речовину, схильну до переходу горіння в детонацію у маломіцній

оболонці, але має знижену чутливість до удару та статичної електрики; підвищення надійності фіксації УВТ в сполучному блоці шляхом розташування хвилеводів вздовж детонатора за напрямом поширення детонації призвело до зростання міцності УВТ на розрив; запроваджено безперервний автоматизований контроль усіх операцій виготовлення та складання системи. Посилене використання системи «Нонель» і системи «Еділін» ґрунтувалося на розробці раціональних параметрів проміжних детонаторів, здатних зберігати свої вибухові властивості за їх утримання разом із хвилеводами та капсулями-детонаторами у воді під тиском $1 \cdot 10^5$ Па та більше протягом 6 діб. Крім того, приділено увагу підбору величин внутрішньосвердловинних сповільнювачів з метою виключення пошкодження поверхневих і внутрішньосвердловинних ліній хвилеводу повітряною хвилею від вибухових свердловин і уламками проміжного капсуля-детонатора, що розлітаються.

На підставі світового досвіду в межах Державної програми в Україні проведено випробування щодо створення вітчизняної системи неелектричного ініціювання, аналогом якої є конструкція детонуючого хвилеводу та технологія його виготовлення [46, 55, 65].

1.4 Тенденції в розвитку сучасних безпечних засобів ведення висаджувальних робіт і постановка завданьдосліджень

Відомо, що найбільш раціональним є спосіб управління вибуховим імпульсом, що полягає у збільшенні часу його дії на породний масив [17, 21, 23, 30–32, 72, 73]. Це можливо насамперед шляхом використання низькошвидкісних ВР на основі аміачної селітри [25–28, 33] , а також з використанням спеціальних прийомів ініціювання зарядів, що застосовуються в гірництві [12–14, 23, 26, 27, 31–35, 40].

До особливого класу вибухових робіт у гірничій практиці варто зарахувати техніку так званого «гладкого», «м’якого» або обережного підривання. Замість масового подрібнення породи на окремості заданої кондиції для подальшої екскавації, транспортування і за потреби додаткової дезінтеграції на дробарному обладнанні, метою методу гладкого підривання є

отримання в скельному масиві поверхонь поділу у вигляді пласких щілин (поверхонь площинного розриву або відриву). Порівняно зі звичайним подрібненням техніка гладкого підривання побудована на формуванні в заданій площині суцільної тріщини, призначеної для:

- поділу масиву декоративного каменю на окремі моноліти і блоки з подальшою їх переробкою на облицювальну продукцію або інші архітектурні та мистецькі вироби;
- реалізації методу контурного підривання, коли оконтурююча тріщина призначена для відділення частини гірського масиву, в якому ведуться вибухові роботи, з метою захисту від динамічних впливів прилеглого гірського масиву;
- формування стійких схилів у процесі шляхових робіт в гірських умовах.

Техніка обережного підривання передбачає пробурювання системи паралельних шпурів або свердловин в площині проєктованої тріщини і розміщення в них зарядів ВР. Параметри цієї системи (в першу чергу, діаметр та інтервал між зарядами) розраховуються таким чином, щоб задовольнити двом основним вимогам – після вибуху системи паралельних зарядів має утворитися суцільна площина розриву, водночас порушення прилеглих шарів масиву мають бути мінімальними. Особливо ці вимоги стосуються техніки обережного відділення монолітів декоративного каменю, оскільки будь-які навіть невидимі їх пошкодження призводять до суттєвих втрат сировини і знижують якість майбутніх виробів.

Відомі способи реалізації техніки обережного підривання базуються на конструктивних рішеннях. Вони полягають насамперед, у формуванні зарядів з діаметром, значно меншим від діаметра зарядної порожнини. Таким чином значно зменшується щільність зарядження і відповідно – початковий тиск на фронті ударної хвилі та загальний тиск розширюваних газів вибуху. Перше явище зменшує ризик переподрібнення породи, прилеглої до стінок зарядної камери, тобто сприяє збереженню масиву на контурі зарядної порожнни. Щодо зниження тиску розширюваних газів, наслідки цього явища неоднозначні,

оскільки одночасно погіршується перспектива утворення суцільної відривної тріщини. Технологічно це виправляється зближенням зарядних виробок у системі. Одночасно проектувальник, зменшуючи діаметр заряду, повинен враховувати необхідність забезпечення його детонаційного розкладу в оптимальному, тобто закритичному режимі.

Одним із способів регулювання маси заряду в свердловинах є застосування гірляндних зарядів, в яких, не зменшуючи діаметра окремих патронів, збільшують відстань між ними. Однак цей метод менш придатний під час підривання шпурових зарядів, оскільки малий діаметр шпура обмежує можливості створення гірлянди і маніпулювання діаметром заряду в цілому.

Фінські розробники сучасної техніки «м'якого» вибуху шпуровим методом (фірма «Форсіт») створили для кам'яних кар'єрів систему, засновану на використанні спеціальних пластикових зарядних трубок – так званих К-зарядів [12]. З метою збереження детонаційної здатності цих зарядів при зменшенні їх діаметра в склад вибухової суміші введено нітроефіри, що підтримує калорійність вибухового складу. Водночас швидкість детонації заряду не перевищує 2,1 км/с, що цілком задовольняє вимогам до «м'якого» методу відколювання.

Інші переваги методу – це простота монтажу заряду шляхом з'єднання потрібної кількості К-труб, співвісне з шпуром розташування заряду завдяки наявності на пластиковій оболонці «крилець або комірців», які забезпечують дотримання розміру повітряного зазору по довжині та периметра заряду.

Однак заводське виготовлення зарядів через наявність нітроефірів у складі вибухової композиції ускладнює експлуатацію методу, погіршує його безпеку і екологічність.

Подібний типу розроблено в Швеції («Гурит-А»), однак через значно вищу швидкість детонації, що становить 4 км/с, такі заряди не здатні забезпечити ідеальне м'яке відділення блоків. Радяньскій аналог згаданих пластикових зарядів [77] Гранілен відрізняється більш низькою швидкістю до 2,4 км/с, що забезпечує перспективність цих зарядів.

Українська гірнича компанія «Лагран» розробила альтернативну низькошвидкісну технологію відколювання монолітів на кар'єрах за допомогою генератора тиску хімічного (ГТХ) «ЛІТОКОЛ», призначену для використання як в гірничій практиці, так і в будівництві та реконструкції [78Анж]. Подібно К-зарядам в «ЛІТОКОЛі» циліндрична поліетиленова трубка заповнена робочою композицією – газогенеруючою сумішшю на основі нітрату натрію, яка ініціюється від електричного джерела. Автори заявили метод як невибуховий, що згідно з механізмом швидкісного газоутворення зближує його з методом порохових зарядів.

Газогенераторний патрон є полімерним циліндричним корпусом, закритим з двох сторін полімерними корками, які забезпечують герметизацію внутрішньої порожнини корпусу. Усередині розташована газогенеруюча суміш і пускач електричний. Ініціація робиться за допомогою стандартного джерела струму. Газогенераторні патрони Літокол успішно вживаються на кар'єрах Житомирської області, але, на жаль, вони недостатньо вивчені науково з точки зору технології приготування, термодинаміки і механізму розкладу в режимі швидкісного горіння .

З огляду на наведені вище характеристики пропонованих зарубіжними і вітчизняними вченими методів ощадливого підривання, а також враховуючи стабільний попит на продукцію гірничих підприємств з видобування блочного каменю, варто приділити увагу розвитку цього методу саме в напрямку, визначеному дисертаційною роботою – його удосконаленню в напрямку спрощення технології шляхом добору композицій з невибухових компонентів, що виготовляються на місці виконання вибухових робіт і забезпечують м'який режим відколювання монолітів з мінімальними пошкодженнями структури відділених блоків.

Застосування низькошвидкісних і низькочутливих найпростіших вибухових сумішей вимагає особливої уваги до їх ініціювання. Надійне спричинення детонації по довжині заряду гарантує повноту його вибухового розкладання та водночас якість і економічність відбивання гірської маси, а також безпеку вибухових робіт. Умова правильного ініціювання подовженого

заряду полягає в тому, щоб детонаційний тиск у проміжному ініціаторі (бойовику) перевищував детонаційний тиск у заряді ВР, який підлягає ініціюванню. Збільшення детонаційного тиску в бойовику необхідно до рівня, достатнього для спричинення та підтримки на належному рівні в заряді реакції вибухового розкладання. Це можливо зі збільшенням швидкості детонації ВР ініціатора, яке, як правило, супроводжується збільшенням його густини. У цьому положенні за важливістю швидкість детонації переважає.

Викладене вище вступає у протиріччя з установкою на збільшення тривалості дії імпульсу вибуху в подовженому заряді, оскільки зі зростанням швидкості детонації (D) час дії імпульсу скорочується. Вирішення цієї суперечності можливе з застосуванням спрямованого багатоточкового ініціювання промислових лінійних зарядів з використанням свердловинних уповільнень [54, 55]. Звичайно, це вимагає застосування серії бойовиків в одному заряді, які підриваються кожен окремим детонатором, що ускладнює техніку вибухових робіт. Реалізувати техніку внутрісвердловинного уповільнення за допомогою традиційних методів неможливо без порушення відомих приписів правил техніки безпеки. До того ж електричний метод ініціювання не позбавляє наведених вище ризиків.

Зважаючи на це більш прийнятним є спосіб ініціювання, заснований на електричному підриванні за участю детонуючого шнура.

Стандартний детонуючий шнур має високу надійність ініціювання і міцність на розрив порівняно з малопотужними ДШ (до 5,3 г/м) і більш економічний порівняно з потужними ДШ, що мають лінійну щільність 12,7–85 г/м ТЕНу. Однак використання ДШ супроводжується низкою обов’язкових вимог, що ускладнюють роботу з ними:

- необхідно стежити за міцністю вузлів на детонуючому шнурі, оскільки недостатньо тугі вузли призводять до порушення нормального режиму детонації ДШ;

- з’єднання ДШ повинні виконуватися під прямим кутом, без вигинів, скруток та провисання внутрішньосвердловинних або магістральних відрізків ДШ;

- варто забезпечувати два незалежні підведення детонаційного імпульсу до заряду ВР і резервні зв’язки між магістральними лініями для надійності їх спрацьовування в умовах породного масиву, що переміщається при КЗВ або при розльоті уламків;

- при використанні ДШ як внутрішньосвердловинної або магістральної лінії вони не повинні взаємно перетинатися, оскільки це може призвести до відмови детонації або порушення послідовності ініціювання зарядів;

- при масових вибухах реальна загроза навколишньому середовищу полягає в ударній повітряній хвилі від вибуху поверхневої мережі ДШ, тому рекомендується застосовувати його або з покриттям 30-сантиметрового шару інертного матеріалу (піску, ґрунту), або ініціювати лише внутрішні відрізки ДШ з відмовою від використання його в магістральних лініях;

- варто уникати тривалого утримання ДШ в обводнених умовах;

- детонуючі шнури, призначені для ініціювання проміжних детонаторів (бойовиків), можуть спричиняти горіння або низькошвидкісну детонацію найпростіших вибухових сумішей у зарядних виробках діаметром менше 100 мм;

- при короткосповільнених вибухах з розміщенням сповільнювачів на поверхні масиву у складноструктурних та геологічно порушених масивах можливе пошкодження як магістральних, так і внутрішньосвердловинних ліній ДШ внаслідок прориву газів через тріщини від сусідніх зарядів та інтенсивного спучування гірських порід, що може призвести до відмови детонації окремих зарядів груп зарядів.

З огляду на це на підземних гірничих роботах застосовують зворотне ініціювання, оскільки ініціювання в гирлі шпуру призводить до більш інтенсивних зсувів масиву у бік відкритої поверхні (груді вибою). Однак водночас виникають труднощі, характерні й для зворотного ініціювання зарядів свердловин – можливість появи горіння або низькошвидкісної детонації. Крім того, під час використання навіть низькоенергетичного ДШ вздовж заряду після вибуху ДШ утворюється газова порожнина – канал, яким можливе відведення частини робочих газів від вогнища вибуху основного заряду. За такої умови

варто врахувати можливість одночасного переущільнення ВР свердловинного заряду. Обидва ці явища можуть призвести до часткової втрати енергії заряду або загасання процесу детонації. І нарешті, істотним недоліком ДШ є ризикованість його застосування в умовах шахт, небезпечних за метаном та вугільним пилом.

Таким чином, і малопотужні, і нормальні ДШ можуть створити низку небезпечних ситуацій на відкритих та підземних гірничих роботах. З огляду на це розробляються нові неелектричні системи ініціювання свердловинних і шпурових зарядів, що володіють підвищеною безпекою, простотою в обігу, що забезпечують безвідмовне підривання в найскладніших гірничо-геологічних умовах і дозволяють створювати схеми коротких уповільнень. Це найбільш поширена система «Нонель», призначена для відкритих та підземних гірничих робіт, у тому числі в метанонебезпечних умовах вугільних шахт та у будівництві. На відміну від ДШ хвилевід може скручуватися, провисати та перетинатися без наслідків для безпечного підривання. Однак, оскільки швидкість детонації хвилеводу порівняно низька, при монтажі вибухової мережі необхідно враховувати наявність власних уповільнень у системі, що становить близько 0,55 мс/м шнура. З огляду на це прокладання хвилеводу між свердловинами повинно проводитися або найкоротшим шляхом, але відповідно до прийнятої послідовності ініціювання зарядів, або з урахуванням збільшення часу уповільнення за рахунок довжини трубки.

Схеми вибухової мережі під час використання системи «Нонель» залежать від способу розміщення сповільнювачів – у поверхневій магістральній чи внутрішньосвердловинній лініях. Для спрощення монтажу вибухової мережі за відсутності обмежень щодо дії повітряної ударної хвилі поверхневу магістральну лінію рекомендується виконувати з закільцьованого низькоенергетичного ДШ з розведенням по свердловинах відрізків хвилеводу. Якщо необхідно застосовувати свердловинні сповільнення в умовах обмежень по сейсмічній дії при підриванні глибоких свердловин великого діаметра, використовують ковзні проміжні патрони-бойовики [70, 71]. Ці набої ініціюють капсулем-детонатором КСП з відрізком хвилеводу. Другий кінець цього

відрізка контактує з внутрішньосвердловинним ДШ і закритий у торці корком. Такі бойовики опускають у свердловину на ДШ до необхідної глибини. На одній нитці ДШ в свердловині може бути розміщено кілька проміжних ковзаючих детонаторів з різними періодами уповільнень.

Однак варто зазначити, що системи підривання із залученням ДШ частково втрачають переваги, притаманні новим неелектричним засобам ініціювання, особливо щодо умов вугільних шахт. Водночас вони цілком задовольняють вимогам безпеки за ймовірності появи блукаючих струмів, сильних радіохвиль, статичної електрики, наявності ЛЕП та потужних джерел електромагнітного випромінювання.

Присутність у неелектричних системах ініціювання відрізків ДШ спричинена насамперед необхідністю «розведення» ініціюючого імпульсу, його розгалуження по мережі через відсутність безкапсульних засобів розгалуження на основі власне хвилеводу.

Ця проблема досить просто вирішується у системі неелектричного ініціювання «Геркудет» фірми «Геркулес». Уповільнення між свердловинами досягаються добиранням довжини лінії передачі (2,44 м/мс). Однак при багаторядному та особливо багатоярусному розташуванні зарядів виникають труднощі в комутації вибухової мережі; уповільнення між зарядами створюється додатковими витками трубки, що негативно впливає на економічність методу. Тому такий метод за необхідності застосування внутрішньосвердловинних сповільнень технічно складно реалізувати.

Враховуючи, що техніка підривання на основі запропонованих неелектричних систем (ДШ, Нонель, Геркудет та ін.) самостійно не вирішує комплексу технічно складних завдань багаторядного та багатоярусного КЗВ, виникає низка проблемних питань щодо створення та вдосконалення вітчизняної неелектричної системи з теоретичним та експериментальним обґрунтуванням її раціональних параметрів та одночасним удосконаленням методів її застосування у гірничій практиці.

Визначені питання як завдання досліджень складають основу плану досліджень. У дисертаційній роботі вирішуються наступні наукові та прикладні

питання, пов’язані з розвитком теорії й техніки вибухової справи для відкритих гірничих робіт:

- теоретичне обґрунтування та експериментальні дослідження механізму старту ініціюючого імпульсу і поширення детонації по коаксіальних трубах і розгалуженнях детонуючого хвилеводу;

- вдосконалення способів ініціювання детонаційних процесів у зарядах промислових вибухових речовин за рахунок зміни геометрії та рецептури проміжних детонаторів;

- розробка нової емульсійної ПВР на основі водного розчину аміачної та натрієвої селітр в нафтопродукті, сенсибілізованому скляними порожнистими мікросферами;

- створення наукових підстав та технологічного процесу отримання елементів вітчизняної безпечної системи ведення робіт на видобуванні декоративного каменю, з використанням техніки «м’якого» вибухового відділення монолітів від масиву;

- дослідження логістики та безпеки застосування низькошвидкісних ЕВР на кар’єрах України;

- відпрацювання схем і методів комутації вибухової мережі при масових вибухах на основі виконаних досліджень.

Висновки до розділу 1

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

РОЗДІЛ 2. ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПОЛІМЕРНІЙ КОАКСІАЛЬНІЙ ТРУБЦІ ПІД ДІЄЮ РУХОМОГО УДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Хвильові ефекти низькошвидкісної детонації в трубчастому детонуючому хвилеводі

Нижче розглянемо специфічні хвильові ефекти в трубці, що містить на внутрішній поверхні заряд ініціюючої вибухової речовини. Поперечний параметр заряду в первісному стані набагато менше критичного, але за певного механічного впливу утвориться пилоповітряна вибухова суміш, здатна підтримувати й передавати детонаційну хвилю. Оскільки при ініціюванні детонації таких матеріалів можуть генеруватися вибухові хвилі, що мають різні профілі й поширюються з різними швидкостями, важливо проаналізувати умови зародження детонації й вплив параметрів детонаційної хвилі на динаміку оболонки. Водночас, як показано в подальших дослідженнях, можуть досягатися критичні значення цих параметрів, за яких розрахункові величини напружень і прогинів в оболонці можуть як необмежено зростати, так і виявлятися інваріантними щодо дії вибухового навантаження.

Розглянемо подовжений циліндричний заряд, що складається із циліндричної оболонки, на внутрішню поверхню якої рівномірно нанесено шар вибухової речовини з товщиною менше критичного діаметра. Такий шар вибухової речовини практично не має впливу на механічні властивості оболонки, на яку його нанесено. Тому, для дослідження хвиль пружних деформацій у стінці оболонки, за рахунок дії яких розпорошується вибухова речовина, використовуємо рівняння руху циліндричної оболонки для осесиметричного випадку у вигляді (15) з [82, 83]. Використовуючи вираз (16) в [82], виключимо з рівнянь (15) функцію ψ, що характеризує поворот перетину.

У підсумку отримаємо систему двох рівнянь із частковими похідними щодо двох шуканих функцій U_1 і Un:

$$\rho_1 h U_1 - \left[\frac{Eh}{1-\nu^2}\right]\cdot\left[U_1^{II} - \frac{\nu}{R}\cdot U_n^{I}\right] = 0 \qquad (2.1)$$

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}U_n^{IV} - \frac{\rho_1 h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]U_n^{II} + \rho_1 h\left[1+\frac{Eh}{12(1-\nu^2)GR}\right]U_n +$$
$$+\frac{\rho_1 h^3}{12G}U_n - \left[\frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]U_n^{II} + \left[\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\right]U_n + \left[\frac{E^2h^2\nu}{12(1-\nu^2)GR}\right]U_1^{III} -$$
$$-\left[\frac{\rho_1 Eh^3\nu}{12(1-\nu^2)GR}\right]U_1^{I} - \left[\frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}\right]U_1^{I} = P_n + \frac{\rho_1 h^2}{12G}P_n - \left[\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)G}\right]P_n^{II}$$

Тут штрихами позначено диференціювання по X, точкою – по t.

Система (17) в [80] описує динаміку циліндричної оболонки під дією осесиметричного навантаження P_n. Вона може бути використана для опису складних механічних явищ, зокрема для вивчення хвиль деформацій, які беруть участь у процесі розпилення вибухової речовини.

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

$$h\left(\rho_1 V^2 - \frac{E}{1-\nu^2}\right)u_1'' + \frac{Eh}{1-\nu^2}\frac{\nu}{R}u_n'' = 0;$$
$$\frac{Eh^3\nu}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{E}{1-\nu^2} - \rho_1 V^2\right)u_1''' - \frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}u_1' +$$
$$+\left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho_1 h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2 + \frac{\rho_1^2 h^3}{12G}V^4\right\}u_n^{IV} + \qquad (2.2)$$
$$+\left\{\rho_1 h\left[1+\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2 - \frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2}\right\}u_n'' +$$
$$+\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}u_n = P_n + \left[\frac{\rho_1 h^2}{12G}V^2 - \frac{Eh^2}{12G(1-\nu^2)}\right]p_{n.}''.$$

Тоді:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}=\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2};\qquad \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}=V^2\frac{\partial u_1}{\partial x};$$
$$\frac{\partial u_n}{\partial x}=\frac{\partial u_n}{\partial x};\qquad \frac{\partial u_n}{\partial t}=-V\frac{\partial u_n}{\partial x};$$
$$\frac{\partial^2 u_n{}^2}{\partial x^2}=\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2};\qquad \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2}=V^2\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2};\qquad (2.3)$$
$$\frac{\partial^3 u_n}{\partial x}=\frac{\partial^3 u_n}{\partial x^3};\qquad \frac{\partial^4 u_n}{\partial t^4}=V^4\frac{\partial^4 u_n}{\partial x^4};$$
$$\frac{\partial^4 u_n}{\partial x}=\frac{\partial^4 u_n}{\partial x^4};\qquad \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2\partial t^2}=V^2\frac{\partial^4 u_n}{\partial x^4}.$$

З урахуванням (2.3) система (17) [80] приводиться до виду:

$$h\left(\rho_1 V^2-\frac{E}{1-\nu^2}\right)u_1''+\frac{Eh}{1-\nu^2}\frac{\nu}{R}u_n''=0;$$

$$\frac{Eh^3\nu}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{E}{1-\nu^2}-\rho_1 V^2\right)u_1'''-\frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}u_1'+$$
$$+\left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}-\frac{\rho_1 h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2+\frac{\rho_1^2 h^3}{12G}V^4\right\}u_n^{IV}+\qquad (2.4)$$
$$+\left\{\rho_1 h\left[1+\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2-\frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2}\right\}u_n''+$$
$$+\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}u_n=P_n+\left[\frac{\rho_1 h^2}{12G}V^2-\frac{Eh^2}{12G(1-\nu^2)}\right]p_{n.}''.$$

Тут штрихами позначено диференціювання по змінній X.

Система рівнянь (2.4) описує динаміку циліндричної оболонки під дією рухомого осесиметричного навантаження Pn. Ця система є більш складною порівняно з відомими, тому що містить похідні від інтенсивності навантаження Pn, що дозволяє більш точно описати вплив характеру вибухових і детонаційних хвиль на коливання оболонки.

2.2 Поширення вільних хвиль уздовж осі циліндричної оболонки

Для більш повного опису механізму поширення хвиль циліндричною оболонкою варто вивчити характер поширення власних гармонійних хвиль у циліндричній оболонці.

Рух власних хвиль у циліндричній оболонці описується системою однорідних диференційних рівнянь, отриманих з неоднорідної системи (17) [80] шляхом відкидання правих частин.

$$\rho\ddot{u} - \frac{E}{1-\nu^2}u_1 + \frac{E\nu}{(1-\nu^2)R}u_n = 0$$

$$\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)}u_n^{IV} - \frac{\rho h^2}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]\ddot{u}_n'' + \rho\left[1+\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]\ddot{u}_n +$$

$$+\frac{\rho h^2}{12G}\ddot{u}_n - \frac{E^2h^2}{12(1-\nu^2)^2GR^2}u_n'' + \frac{E}{(1-\nu^2)R^2}u_n + \frac{E^2h^2\nu}{12(1-\nu^2)^2GR}u_1''' - \quad (2.5)$$

$$-\frac{\rho h^2 E\nu}{12(1-\nu^2)GR}\ddot{u}_1' - \frac{E\nu}{R(1-\nu^2)}u_1' = 0.$$

У цій системі точкою позначено диференціювання за часом t, штрихом – по просторовій змінній X.

Будемо досліджувати рух гармонійної хвилі виду:

$$U_1 = U\sin(kx-\omega t),\ \ U_n = W\cos(kx-\omega t) \quad (2.6)$$

Тоді:

$$U_1^{II} = -Uk^2\sin(kx-\omega t) \qquad U_1^{III} = -Uk^3\cos(kx-\omega t)$$

$$u_1^{I} = -uk\omega^2\cos(kx-\omega t) \qquad U_1^{III} = -Uk^2\sin(kx-\omega t)$$

$$U_u^{I} = -\omega k\sin(kx-\omega t) \qquad U_n^{II} = -Wk^2\cos(kx-\omega t)$$

$$U_n^{IV} = Wk^4\cos(kx-\omega t) \qquad U_n^{II} = -W\omega^2\cos(kx-\omega t)$$

$$U_n^{II} = Wk^2\omega^2\cos(kx-\omega t) \qquad U_n^{IV} = W\omega^4\cos(kx-\omega t)$$

Після підставляння (2.6) в (2.5) і скорочення на sin(kx-ωt), cos(kx-ωt), отримаємо однорідну систему рівнянь:

$$\left(\frac{Ek^2}{1-\nu^2} - \rho\omega^2\right)U - \frac{\varepsilon\nu k}{(1-\nu^2)R}W = 0$$

$$\frac{E\nu k}{R(1-\nu^2)}\left[\frac{\rho h^2}{12G}\omega^2 - \frac{\varepsilon h^2}{12(1-\nu^2)G}k^2 - 1\right]U +$$

$$+\left\{\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)}k^4 - \frac{\rho h^2}{12}\left[1+\frac{\varepsilon}{G(1-\nu^2)}\right]k^2\omega^2 - \rho\left[1+\frac{\varepsilon h^2}{12(1-\nu^2)} + \frac{\rho^2h^2}{12G}\omega^4\right]\right\} = 0 \quad (2.7)$$

Ця система має відмінне від нуля розв'язання U, W лише у випадках, коли визначник матриці її коефіцієнтів дорівнює нулю. Із цієї умови потрібно характеристичне (дисперсійне) рівняння:

$$\left(\frac{Ek^2}{1-\nu^2}-\rho\omega^2\right)\left\{\begin{array}{l}\dfrac{Eh^2}{12\left(1-\nu^2\right)}k^4-\dfrac{\rho h^2}{12}\left[1+\dfrac{E}{G\left(1-\nu^2\right)}\right]k^2\omega^2-\rho\left[1+\dfrac{Eh^2}{12\left(1-\nu^2\right)GR^2}\right]\omega^2+\\ +\dfrac{\rho^2h^2}{12G}W^4+\dfrac{E^2h^2}{12\left(1-\nu^2\right)GR^2}+\dfrac{E}{\left(1-\nu^2\right)R^2}\end{array}\right\}+$$
$$+\frac{E^2\nu^2k^2}{\left(1-\nu^2\right)R^2}\left[\frac{\rho h^2}{12G}\omega^2-\frac{Eh^2}{12\left(1-\nu^2\right)G}k^2-1\right]=0 \qquad (2.8)$$

З аналізу отриманих даних виходить, що побудоване дисперсійне рівняння є рівнянням шостого ступеня відносно ω^2. Однак з огляду на те, що ω входить у нього лише у квадраті, це рівняння можна привести до кубічного рівняння відносно ω^2, потім знайти три залежності $\omega_i = \omega_i(u)$ (i = 1, 2, 3) і підрахувати три фазові швидкості руху гармонійних хвиль виду (2.6) за формулою:

$$v_i = \omega_i(k)/k \qquad (i = 1, 2, 3). \qquad (2.9)$$

Для призначення фазової швидкості vi (i = 1, 2, 3), за допомогою системи (2.6), визначається відношення Ui/i, що характеризує поляризацію хвилі.

З огляду на те, що відношення в правій частині рівності (2.9) залежить від k, то гармоніки (2.6) з різними довжинами хвилі поширюються з різними швидкостями. Такі хвилі називаються диспергуючими. Якщо для обраного i (i = 1, 2, 3) відношення $\omega_i(k)/k$ залишається постійним при будь-якому k, то всі гармонійні хвилі даної і-тої поляризації поширюються з однією й тією ж швидкістю v_i і явище дисперсії (розпливання профілю негармонійної хвилі) відсутнє.

Для побудови залежностей $\omega_i=\omega_i(k)$, зумовлених рівнянням (2.5), спростимо це рівняння, з огляду на те, що ω й k входять у нього лише в парних ступенях. Тоді позначивши $\omega^2 = \Omega$, $k^2 = K$, приведемо рівняння (2.8) до кубічного рівняння відносно Ω й К.

$$\left(\frac{Eh^2}{1-\nu^2}-\rho\Omega\right)\{\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)}k^2-\frac{\rho h^2}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]k\Omega-\rho\left[1+\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]\Omega+$$
$$\frac{\rho^2h^2}{12G}\Omega^2+\frac{E^2h^2}{12(1-\nu^2)^2GR^2}k+\frac{E}{(1-\nu^2)R^2}\}+\frac{E^2\nu^2k}{(1-\nu^2)^2R^2}\left[\frac{\rho h^2}{12G}\Omega-\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)G}k-1\right]=0 \quad (2.10)$$

Оскільки коефіцієнти при невідомій Ω у цьому рівнянні є складними виразами, запис співвідношень для його коренів пов'язане з громіздкими перетвореннями. Тому зручніше виявляється застосування числових методів, зокрема методу Ньютона й методу продовження рішення по параметру для побудови залежності $\Omega_i = \Omega_i(К)$ (i = 1, 2, 3). Суть такого підходу записується так. Наведемо рівняння (2.10) у вигляді:

$$F(\Omega, К) = 0. \quad (2.11)$$

Нехай при деякому $К_o$ відомо значення Ω_o таке, що $(\Omega_o, К_o) = 0$. Дамо мале збільшення ΔК величини Ко і знайдемо відповідні йому збільшення $\Delta\Omega_o$ так, щоб співвідношення (2.11) задовольнялося й при нових $\Omega_1 = \Omega_o + \Delta\Omega_1$, $К_1 - К_o = К_1$.

Тоді:

$$F(\Omega_o + \Delta\Omega_1, К_o + К_1) \approx с. \quad (2.12)$$

Лінеаризуємо співвідношення (2.12) в околиці стану Ω_o, $К_o$. У підсумку отримаємо:

$$\frac{\partial F}{\partial \Omega}\Delta\Omega_1+\frac{\partial F}{\partial k}\Delta k_1\approx 0. \quad (2.13)$$

Вважаючи $\Delta К_1$ відомих, отримаємо вираження для співвідношення $\Delta\Omega_1$:

$$\Delta\Omega_1=-\frac{\partial F}{\partial k}\Delta k_1/\frac{\partial F}{\partial \Omega}. \quad (2.14)$$

Далі знову можна покласти відомими величини $\Omega_1 = \Omega_o + \Delta\Omega_1$, $К_1 = К_o + \Delta К_1$, давати збільшення $\Delta К_1$ і по формулі, аналогічної (2.14), знаходити $\Delta\Omega_2$, а потім нові значення $\Omega_2 = \Omega_1 + \Delta\Omega_2$, $К_2 = К_1 + \Delta К_2$ і далі. Водночас, однак, необхідно враховувати, що наближена рівність $F(\Omega_i, К_i) \approx 0$ буде

задовольнятися все з меншою точністю зі збільшенням. Тому в рівнянні виду (2.14) необхідно враховувати й новизну $F(\Omega_i, K_i)$. У результаті отримаємо:

$$\Delta\Omega_i = -\left[\Delta k_i \frac{\partial F}{\partial k} + F(\Omega_i, k_i)\right] / \left[\frac{\partial F(\Omega_i, k_i)}{\partial k}\right]. \qquad (2.15)$$

За розробленою методикою виконане дослідження поширення гармонійних хвиль в осьовому напрямку циліндричної оболонки. Розглянуто оболонку з поліетилену з параметрами: $\rho = 940$ кг/м^3; $E = 0{,}76 \cdot 10^9$ Па; $\nu = 0{,}4$; $h = 0{,}95\ 10^{-3}$м; $R = 1{,}125\ 10^{-3}$м.

На рис. 2.1 наведено рішення дисперсійного рівняння для даної оболонки й показані залежності $\Omega - K$, а також відповідні їм графіки $\omega - K$. Після взяття кореня лише остання залежність ω – зберегла прямолінійний обрис, дві інші виявилися криволінійними. Це означає, що при параметрах ω, K, що лежать на останній прямої лінії, відношення $V = (\omega/K) = 839$ м/с залишається постійним, всі гармоніки мають однакову швидкість хвилі V, тому хвилі такого типу не диспергують. Хвилі, що відповідають двом іншим кривим, мають швидкості вище, але вони є диспергуючими.

З аналізу отриманих даних видно, що в циліндричній оболонці буде поширюватися незатухаючий хвильовий процес, а це сприяє механічному струшуванню напиленої на внутрішню поверхню поліетиленової оболонки вибухової речовини й створенню умов для стабільного просування детонаційної хвилі по пило зваженій ВР.

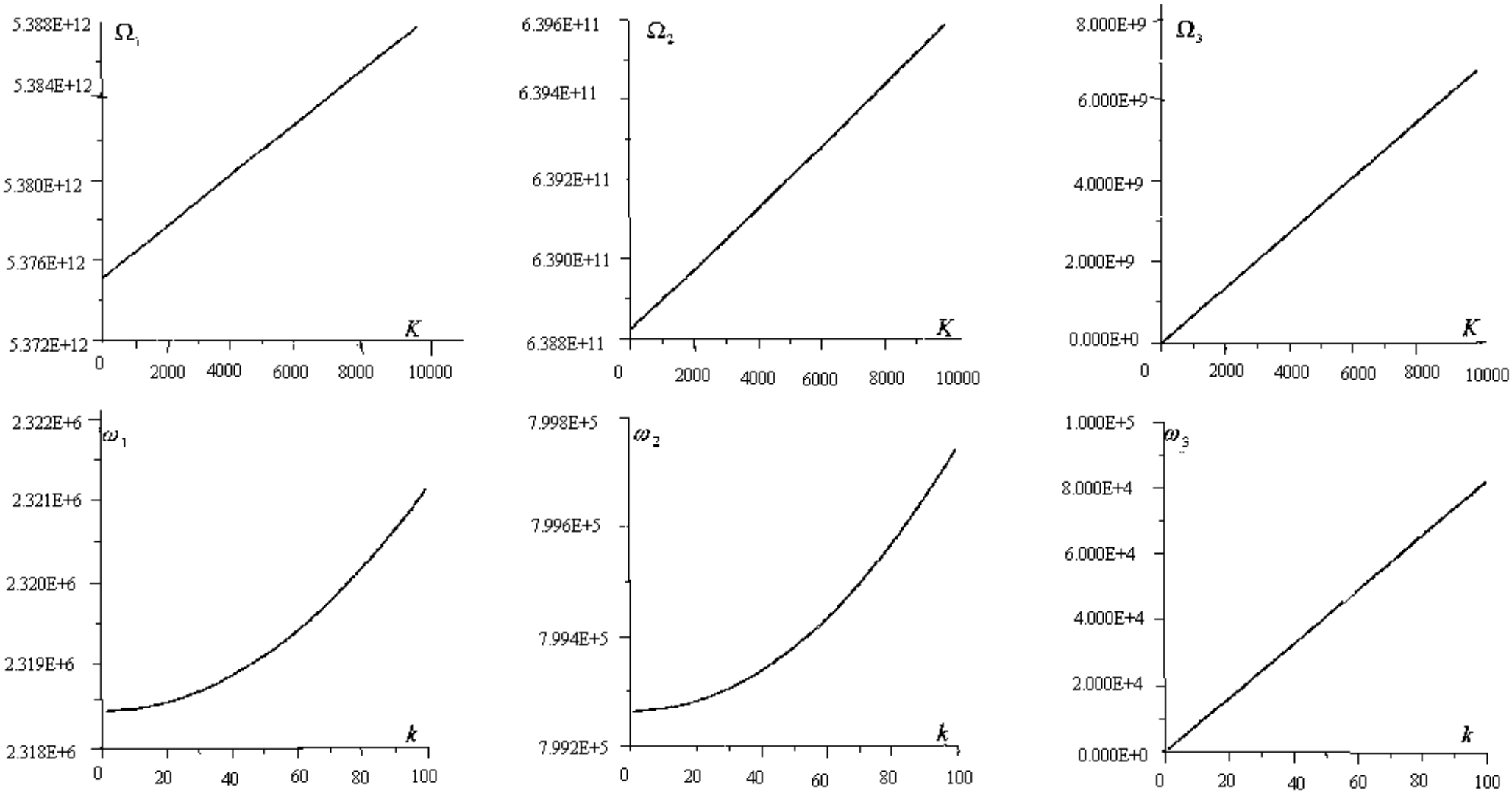


Рис. 2.1. Графіки розв’язання дисперсійного рівняння

2.3 Побудова розв'язання рівнянь задачі динаміки рухомого навантаження

Після того, як в поліетиленовій трубці напилена на її внутрішній поверхні ВР струшена за допомогою електровибуху або вибуху детонатора, утворивши пилоповітряну суміш, спочатку поширюється хвиля детонації, дія якої у свою чергу струшує напилену ВР і створює умову подальшого просування детонації.

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

$$h\left(\rho V^2 - \frac{E}{1-\nu^2}\right)U^{II} + \frac{Eh}{(1-\nu^2)}\frac{\nu}{R}W^{I} = 0. \qquad (2.16)$$

Розглянемо випадок, коли детонаційна хвиля при x> 0 створює поле постійного тиску, тоді P_n = const, P''_n=0 і справедливі неоднорідні рівняння:

$$h\left(\rho V^2 - \frac{E}{1-\nu^2}\right)\mathrm{U}^{\mathrm{II}} + \frac{\mathrm{Eh}}{(1-\nu^2)}\frac{\nu}{\mathrm{R}}\Omega^{I} = 0. \qquad (2.17)$$

$$\frac{Eh^3\nu}{12(1-\nu^2)GR}\left(\frac{E}{1-\nu^2} - V^2\rho\right)U^{III} - \frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}U^{I} + \left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \frac{\rho h^3}{12}\left[1 + \frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2 + \right.$$
$$\left. + \frac{\rho^2 h^3}{12G}V^4\right\}W^{IV} + \left\{\rho h\left[1 + \frac{h^2 E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2 - \frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)^2GR^2}\right\}W^{II} + \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\Omega = P_n \qquad (2.18)$$

Для спрощення системи (2.17), (2.18) зробимо додаткові перетворення.

Рівняння (2.17) цієї системи має інтеграл, тому з нього слідує:

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

де C_1 – константа.

У результаті друге рівняння системи (2.18) приводиться до форми:

$$\left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}-\frac{\rho h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2+\frac{\rho^2h^3}{12G}V^4\right\}\omega^{IV}+$$
$$+\left\{\rho h\left[1+\frac{h^2E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2-\frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2}\right\}W^{II}+ \qquad (2.19)$$
$$+\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\left\{1+\frac{E\nu^2}{\left[\rho(1-\nu^2)V^2-E\right]}\right\}W=\frac{Eh\nu}{R(1-\nu^2)}C_1$$

Аналогічні перетворення виконуються для системи (2.18) при x > 0

$$U^I=C_2-\frac{E\nu}{R\left[\rho V^2(1-\nu^2)-E\right]}\omega, \qquad U^{III}=-\frac{E\nu}{R\left[\rho V^2(1-\nu^2)-E\right]}W^{II} \qquad (2.20)$$

Підставляючи (2.20) в (2.18), отримаємо:

$$\left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}-\frac{\rho h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2+\frac{\rho^2h^3}{12G}V^4\right\}W^{IV}+$$
$$+\left\{\rho h\left[1+\frac{h^2E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2-\frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2}\right\}W^{II}+ \qquad (2.21)$$
$$+\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\left\{1+\frac{E\nu^2}{[\rho V^2(1-\nu^2)-E]}\right\}W=\frac{E\nu^2}{R(1-\nu^2)}C_2+P_n$$

Загальне розв'язання ω(x) рівняння (2.19) конструюємо у вигляді суми загального рішення $\omega_{o,o}$ (x) відповідного однорідного рівняння для (2.19) і його часткового рішення ω_{rn} (x):

$$\omega(x)=\omega_{rk}(x)+\omega_{rn}(x). \qquad (2.22)$$

Приймемо:

$$\omega_{00}(x)=\omega e^{\lambda x}. \qquad (2.23)$$

Підставляючи (2.23) у відповідне однорідне рівняння, отримаємо біквадратне рівняння:

$$\left\{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}-\frac{\rho h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2+\frac{\rho^2h^3}{12G}V^4\right\}\lambda^4+$$
$$\left\{\rho h\left[1+\frac{h^2E}{12(1-\nu^2)GR^2}\right]V^2-\frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2}\right\}\lambda^2+\frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\left\{1+\frac{E\nu^2}{\left[\rho(1-\nu^2)V^2-E\right]}\right\}=0 \qquad (2.24)$$

Введемо позначення:

$$m=\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}-\frac{\rho h^3}{12}\left[1+\frac{E}{G(1-\nu^2)}\right]V^2+\frac{\rho^2h^3}{12G}V^4$$

$$n = \rho h\left[1+\frac{h^2E}{12(1-\nu^2)R^2G}\right]V^2 - \frac{E^2h^3}{12(1-\nu^2)GR^2} \qquad (2.25)$$

$$p = \frac{Eh}{(1-\nu^2)R^2}\left\{1+\frac{E\nu^2}{\left[\rho(1-\nu^2)V^2-E\right]}\right\}$$

Тоді рівняння (2.24) можна представити у вигляді:

$$m\Lambda^2 + n\Lambda + p = 0$$

З нього слідує:

$$\Lambda_{1,2} = \frac{-n \pm \sqrt{n^2-4mp}}{2m}$$

$$\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{\Lambda_1} \qquad (2.26)$$

$$\lambda_{3,4} = \pm\sqrt{\Lambda_2}$$

Вид розв'язання (2.23) залежить від значень Λ_1, Λ_2. Можливі різні випадки.

1. Нехай $\Lambda_1 > 0$, $\Lambda_2 > 0$. Тоді

$$W_{0,0}(x) = C_3e^{\sqrt{\Lambda_1}x} + C_4e^{\Lambda_2 x} + C_7e^{-\sqrt{\Lambda_1}x} + C_8e^{-\sqrt{\Lambda_2}x} \qquad \text{для } x<0 \qquad (2.27)$$

$$W_{0,0}(x) = C_5e^{-\sqrt{\Lambda_1}x} + C_6e^{-\sqrt{\Lambda_2}x} + C_9e^{\sqrt{\Lambda_1}x} + C_{10}e^{\sqrt{\Lambda_2}x} \qquad \text{для } x>0$$

При визначенні констант C_3, C_4,...,C_{10} будемо враховувати, що рішення убувають на нескінченності, тобто $\omega_{oo}(x) \to 0$ при $x \to \pm\infty$. Ця умова дозволяє прийняти $C_7 = C_8 = C_9 = C_{10} = 0$ і розв'язання (2.25) спростити:

$$W_{0,0}(x) = C_3e^{\sqrt{\Lambda_1}x} + C_4e^{\sqrt{\Lambda_2}x} \qquad (2.28)$$

$$W_{0,0}(x) = C_5e^{-\sqrt{\Lambda_1}x} + C_6e^{-\sqrt{\Lambda_2}x}$$

Часткові розв'язання $\omega_{rn}(x)$ неоднорідних рівнянь (2.19), (2.21) мають форму:

$$W_{rn}(x) = \frac{\nu R}{1-\nu^2}\frac{[\rho(1-\nu^2)V^2-E]}{(\rho V^2-E)}C_1$$

$$W_{r,n}(x) = \frac{\nu R}{1-\nu^2}\frac{[\rho(1-\nu^2)V^2-E]}{(\rho V^2-E)}C_2 + \frac{R^2[\rho V^2(1-\nu^2)-E]}{Eh(\rho V^2-E)}p_n \qquad (2.29)$$

Рівності (2.28), (2.29) дозволяють знайти загальне розв'язання (2.22):

$$W(x) = C_3 e^{\sqrt{\Lambda_1}x} + C_4 e^{\sqrt{\Lambda_2}x} + \frac{vR}{1-v^2}\frac{[\rho(1-v^2)V^2 - E]}{(\rho V^2 - E)}C_1 \qquad (2.30)$$

$$W(x) = C_5 e^{-\sqrt{\Lambda_1}x} + C_6 e^{-\sqrt{\Lambda_3}x} + \frac{vR}{1-v^2}\frac{[\rho(1-v^2)V^2 - E]}{(\rho V^2 - E)}C_2 + \frac{R^2[\rho V^2(1-v^2) - E]}{Eh(\rho V^2 - E)}p_n \qquad (2.31)$$

Вхідні в (2.31) константи C_1, C_2, ...,C_6 перебувають в умовах сполучення розв'язання при x = 0. Умова нерозривності ω(x) і її похідних призводять до рівностей:

$$W_-(0) = W_+(0)$$

$$W_-^I(0) = W_+^I(0)$$

$$W_-^{II}(0) = W_+^{II}(0) \qquad (2.32)$$

$$W_-^{III}(0) = W_+^{III}(0)$$

$$N_{1-}(0) = N_{1+}(0)$$

Остання рівність цієї системи дає:

$$(U^I - v\frac{W}{R})_- = (U^I - v\frac{W}{R})_+ \qquad (2.33)$$

З урахуванням першої рівності системи (2.32) умова (2.33) приводиться до рівності:

$$U_-^I(0) = U_+^I(0) \qquad (2.34)$$

Розглянемо першу рівність системи (2.33). З умови рівності нулю напружень при (x) $\to$ - ∞ маємо u' (- ∞) = ω (- ∞) = 0, звідки $C_1 = 0$. З огляду на (2.34) разом з (2.18), (2.20) і першою рівністю (2.32), отримаємо $C_2 = 0$.

Підставляючи (2.31) у перші чотири рівності (2.32), виводимо чотири рівняння для обчислення невідомих констант C_3, C_4, C_5, C_6:

$$C_3 + C_4 - C_5 - C_6 = \frac{R^2[\rho V^2(1-v^2) - E]}{Eh(\rho V^2 - E)}P_n$$

$$\Lambda_1^{\frac{1}{2}}C_3 + \Lambda_2^{\frac{1}{2}}C_4 + \Lambda_1^{\frac{1}{2}}C_5 + \Lambda_2^{\frac{1}{2}}C_6 = 0 \qquad C_3 + C_5 = 0$$

$$\Lambda_1 C_3 + \Lambda_2 C_4 - \Lambda_1 C_5 - \Lambda_2 C_6 = 0 \qquad \Lambda_1 C_3 + \Lambda_2 C_4 = 0 \qquad (2.35)$$

$$\Lambda_1^{\frac{3}{2}}C_3 + \Lambda_2^{\frac{3}{2}}C_4 + \Lambda_1^{\frac{3}{2}}C_5 + \Lambda_2^{\frac{3}{2}}C_6 = 0 \qquad C_4 + C_6 = 0$$

Система (2.35) має розв'язання:

$$C_3 = \frac{\Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \frac{R^2[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}{2Eh[\rho V^2 - E]}$$

$$C_4 = -\frac{\Lambda_1}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \frac{R^2[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}{2Eh[\rho V^2 - E]}$$

$$C_5 = -\frac{\Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \frac{R^2[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}{2Eh[\rho V^2 - E]} \qquad (2.36)$$

$$C_6 = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \frac{R^2[\rho V^2(1-\nu^2) - E]}{2Eh[\rho V^2 - E]}$$

Розглянемо поводження циліндричної трубки при наступних значеннях механічних параметрів.

Зовнішній діаметр трубки D = 4 мм; внутрішній діаметр d = 1,2 мм; h = 1,4 мм; R = 1,3 мм; матеріал – полікаучукова композиція, модуль пружності якої E=0,22 · 10^{10} Н/м^2 для поліетилену низького тиску або E = 0,5 · 10^9 Н/м^2 для високого тиску, щільність ρ = 0, 95-1,05 т/м^3; коефіцієнт Пуассона ν = 0,4...0,45, швидкість переміщення рухливого тиску V pn = 2100 м/с.

Візьмемо випадок ρ = 950 кг/м^3, ν = 0,4, E= 0,22 · 10^{10} Н/м^2. Тоді G = E/2(1+v) = 7,857 · 10^8 Н/м^2, m = 1,5557, n = 6,7627 · 10^6, p =5,209 · 10^{12}.

У цьому випадку:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 7{,}857 \cdot 10^8 \ \frac{H}{м^2}$$

Λ_1 = -1,0005· 10^6 Λ_2 = - 3,3465· 10^6

$\lambda_{1,2}$ = ± 10^3· i $\lambda_{3,4}$ = ± 1,829· 10^3· i

Оскільки змінні $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ виявилися частково уявними, то цей випадок виявився відмінним від випадку 1. З огляду на це розглянемо випадок 2.

Нехай $\Lambda_1 < 0$, $\Lambda_2 < 0$. Тоді $\lambda_{1,2} = \pm i\beta_1$ й $\lambda_{3,4} = \pm i\beta_2$

$$W(x) = C_3 \cos\beta_1 x + C_4 \sin\beta_1 x + C_5 \cos\beta_2 x + C_6 \sin\beta_2 x$$

$$W(x) = C_7 \cos\beta_1 x + C_8 \sin\beta_1 x + C_9 \cos\beta_2 x + C_{10} \sin\beta_2 x + ap_n \ , \qquad (2.37)$$

де $a = R^2[\rho V^2(1-\nu^2) - E]/[Eh(\rho V^2 - E)]$.

Для обчислення констант C_3, C_4,..., C_{10}, що входять в (2.37), є чотири перших рівняння системи (2.32), які дають:

$$\begin{aligned} &C_3 + C_5 - C_7 - C_9 = ap_n \\ &\beta_1 C_4 + \beta_2 C_6 - \beta_1 C_8 - \beta_2 C_{10} = 0 \\ &\beta_1^2 C_3 + \beta_2^2 C_5 - \beta_1^2 C_7 - \beta_2^2 C_9 = 0 \\ &\beta_1^3 C_4 + \beta_2^3 C_6 - \beta_1^3 C_8 - \beta_2^3 C_{10} = 0 \end{aligned} \qquad (2.38)$$

Ці системи містять вісім невідомих, зумовлених чотирма рівняннями. Для замикання цієї системи використовуємо відоме явище, що прогин убуває на нескінченності: тобто при $x \to \pm\infty$, $w(x) \to 0$. Цей факт дозволяє покласти $C_7 = C_8 = C_9 = C_{10} = 0$ та істотно спростити розв'язання (2.38).

У цьому випадку при русі вибухового навантаження зі швидкістю $V_1 = \sqrt{\dfrac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$ поліетиленова оболонка практично не має прогинів, тому що за таких умов $a = 0$ в (2.38) і прогин дорівнює нулю. Швидкість $V_2 = \sqrt{\dfrac{E}{\rho}}$ є критичною для даного рухомого навантаження, тому що прогин за такої швидкості необмежено зростає.

Підкреслимо, що цей результат отриманий у припущенні, що матеріал оболонки – поліетилен є ідеально пружним середовищем. Реальні суцільні середовища не є ідеально пружними, але при критичній швидкості V_2 прогини будуть самими інтенсивними, що створить оптимальні умови для струшування ВР з внутрішнього каналу поліетиленової оболонки.

Оскільки в праву частину системи алгебраїчних рівнянь як параметр входить тиск у циліндричній порожнині, то для його визначення використовуємо співвідношення Гюгоньо й умову Чепмена-Жуге разом з рівнянням стану продуктів вибуху для ідеального детонуючого газу [74, 146]:

$\frac{P}{\rho} = RT$, $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ г/см^3, Q=1400; $\gamma = 1{,}2$;

$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\gamma + 1}{\gamma} = 1{,}8$ $P = \rho_0 Q(\gamma - 1) = 18{,}5 МПа$.

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

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

Параметри D, Q і $\rho_{про}$ узяті з даних, прийнятих для вітчизняного хвилеводу.

Висновки до розділу 2

У даному розділі розглянуто специфічні процеси поширення детонаційної хвилі в поліетиленовій оболонці трубчастого детонуючого хвилеводу, яка ініціює струшування напиленого на внутрішню поверхню трубки шару ВР, утворення вибухової пилоповітряної суміші, виникнення в ній хвилі детонації, що переміщується каналом хвилеводу з постійною швидкістю.

Для розв'язання завдання складено систему рівнянь із частковими похідними для описання динаміки циліндричної оболонки під дією осесиметричного навантаження. Система може бути використана для визначення параметрів хвиль деформацій і вивчення явища струшування й розпилення дрібнокристалічної ініціюючої ВР у каналі хвилеводу. Отримана система рівнянь є більш складною порівняно з відомими, тому що містить похідні від інтенсивності навантаження. Це дозволяє більш точно описати вплив характеру вибухових і детонаційних хвиль на коливання оболонки.

За розробленою методикою отримано закономірності поширення незатухаючого хвильового процесу у вигляді гармонійних хвиль в осьовому напрямку циліндричної поліетиленової оболонки. Параметри, характер циліндричної трубки, рухливе в її тілі навантаження сприяють механічному струшуванню напиленої на внутрішню поверхню ВР і створенню умов для стабільного просування детонаційної хвилі в каналі трубки по пиловибуховій суміші.

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

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕТОНАЦІЙНИХ І ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНІЦІЮЮЧОЇ СИСТЕМИ

3.1 Методичні положення лабораторних досліджень

На прикладі США як провідного споживача промислових ВР і засобів їх ініціювання можна простежити поширення нових видів неелектричних систем ініціювання свердловинних шпурових зарядів, які засновані на переміщенні канальних ударних хвиль [80]. Вони відрізняються підвищеною безпекою, простотою використання, забезпечують безвідмовне висадження в самих складних гірничогеологічних умовах і дозволяють складати схеми короткосповільненого висадження з широкими діапазонами інтервалів уповільнень. Найбільш відомою є система «Нонель», в основі конструкції якої лежить порожнистий пластиковий шнур – хвилепровід, внутрішня поверхня якого покрита шаром вибухової реагуючої суміші. При ініціюванні ця суміш, розкладаючись в атмосфері каналу хвилеводу, утворює і підтримує незалежно від його довжини ударну хвилю (УХВ), що переміщується зі швидкістю близько 2000 м/с.

Ударна хвиля несе енергію, достатню для ініціювання спеціального капсуля – детонатора, закріпленого на одному з кінців хвилеводу. Рівень енергії ударної хвилі недостатній для незворотного деформування пластикової трубки хвилеводу, тому ця трубка виконує в першу чергу роль провідника сигналу.

Відомі риси й переваги закордонних систем «Нонель» перевіряються й у вітчизняній практиці [81–83], яка одночасно створила свої неелектричні системи ініціювання. Відомі переваги цих систем належать також і вітчизняним аналогам, які були попередньо досліджені в лабораторних і полігонних умовах. З огляду на швидкоплинність досліджуваних процесів у хвилеводі, які подібні до детонаційних процесів у низькошвидкісних вибухових речовинах, методично ці дослідження подібні традиційним, які базуються на використанні чутливих датчиків осцилографічної реєстрації [84, 85].

Об’єктом досліджень є циліндрична поліетиленова оболонка – трубка кругового поперечного перерізу з зовнішнім діаметром 3,2 мм, внутрішнім діаметром 1,3 мм. Ці значення отримані за допомогою мікроскопа МБС-1 з 56-кратним збільшенням. Довжина трубочок в дослідах змінювалася від 150 до 1000 мм залежно від мети досліджень.

Фізико-механічні параметри матеріалу трубки: поліетилен із щільністю ρ = 940 кг/м^3; модуль пружності $E = 0{,}76 \cdot 10^9$ Па; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0{,}4$.

Досліджувалися два типи поліетиленових трубок. Одні трубки були без внутрішнього покриття, інші мали рівномірно напилену вибухову речовину (ВР) – гексоген, напилений на внутрішню поверхню порожнини при витраті $16 \cdot 10^{-6}$ кг/м довжини трубки. Варто зазначити, що спостереження напилення ВР під мікроскопом вказують на наявність у ньому крупинок ВР розміром до 0,3 мм при мережі їх розташування близько 1,8х2 мм. Надалі поліетиленову трубку з напиленою на внутрішню поверхню ВР будемо позначати як ДХ.

Відрізок досліджуваної поліетиленової трубки розміщувався на плоскій поверхні дерев’яної панелі, до якої він кріпився хомутами (рис. 3.1). На відстані 10–15 мм від початку трубки через малі отвори, проколоті голкою, розміщувалися тонкі (діаметром 0,07 мм) мідні дротики довжиною 15 мм. Їхні кінці з зовнішньої сторони трубки ДХ припаювалися до центральної жили коаксіального високовольтного кабелю. На них у заданий момент подавалася висока напруга від попередньо заряджених конденсаторів електророзрядного пристрою.

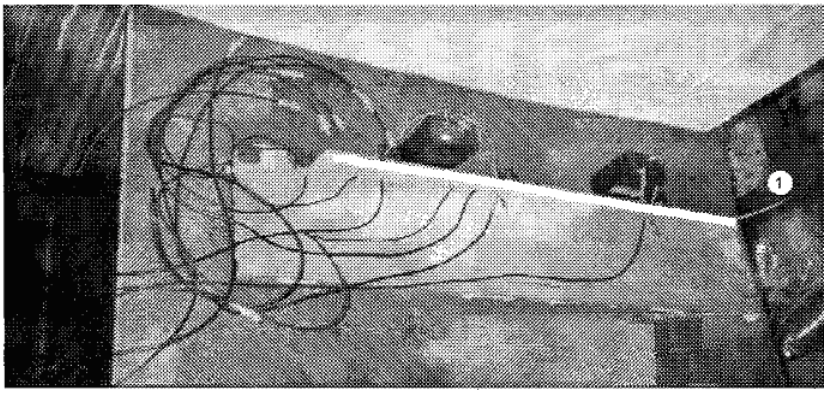


Рис. 3.1. Загальний вид експериментальної установки

В електророзрядному пристрої як накопичувачі енергії використовуються високовольтні конденсатори типу ІМК-25-12 загальною ємністю $4{,}8 \cdot 10^{-6}$ Ф. Імпульс тиску усередині поліетиленової трубки створювався в момент електровибуху провідника, водночас формуючий проміжок закорочувався механічно. Період коливального процесу, генерованого електровибухом провідника, дорівнював приблизно 10^{-4} с ± 20 %.

Протилежний кінець поліетиленової трубки був закритий притуленим до нього із зазором 0,15 мм п'єзокерамічним датчиком тиску. Чутливий елемент п'єзодатчика з п'єзокераміки ЦТС-19 товщиною 0,3 мм і розміром 1,1 мм подпаювався до коаксіального антивібраційного високочастотного кабелю АВК-3, водночас посріблені плоскі поверхні п'єзоелементу розташовувалися перпендикулярно до осі кабелю. Після акустичного захисту бічних поверхонь п'єзокераміки й заливання епоксидною сумішшю датчик тиску мав форму конуса, основа якого було площиною, що сприймає дію хвилі тиску. Щоб датчик тиску не реагував на хвилі стиснення, які поширюються матеріалом трубки ДХ, він установлювався на однаковій відстані (у всіх дослідах вона рівнялась товщині леза – 0,15 мм) від її кінця.

Під час тарування датчика тиску встановлювалася відповідність між значенням сигналу датчика в мілівольтах і значенням тиску у хвилі, що поширюється каналом діафрагменої ударної труби [76].

Якщо ударна хвиля поширюється по каналу зі швидкістю W_1 і має число Маха $M_1 = \frac{W_1}{a_1}$, то тиск в ударній хвилі визначається як $p = \frac{p_2}{p_1}$ і виражається функцією:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma \cdot M_1^{\,2} - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \qquad (3.1)$$

де p_1 і M_1 – відповідно тиск і швидкість руху звукової хвилі в газі перед фронтом хвилі, γ – співвідношення питомих теплоємностей газу.

Ударна труба, використана для тарування датчиків, має прямокутний внутрішній перетин 210х140 мм. Камера й канал, заповнені повітрям при

атмосферному тиску, відділяються між собою діафрагмою, матеріал якої підбирається залежно від того, якої інтенсивності хвилю бажано отримати. У камеру нагнітається повітря з підвищеним тиском до проривання діафрагми.

Співвідношення (3.1) дозволяє, вимірявши швидкість поширення прямого стрибка стиснення W_1, обчислити величину стрибка тиску, що діє на тарований датчик і виробляє електричний сигнал фіксованої величини.

Для виміру часу проходження ударною хвилею заданої відстані використовувався датчик, що дозволяє виміряти швидкість хвилі з похибкою 2 %. Використовуючи залежність (3.1), можна розрахувати величину стрибка тиску у фронті УВ з відносною погрішністю (5 %).

При таруванні датчиків у кожному досліді фіксувалася температура з точністю ±0,2 %. Виміри температури необхідні для визначення швидкості звуку a_1 у повітрі, по якому рухається хвиля.

По осцилограмам фіксувався профіль хвилі тиску, потім вимірювався сигнал тарованого датчика у вольтах з точністю до 5 %.

Таким чином, для кожного датчика визначалася чутливість у вигляді числа, що показує, який сигнал у вольтах дає датчик при дії на нього хвилі тиску з певною амплітудою (у дослідах близько 10^5 Па). Відносна помилка тарування становить близько 10 %.

Специфіка реєстрації тиску у хвилі, що рухається внутрішнім каналом поліетиленової трубки малого діаметра (1,3 мм), дозволяє розташувати датчик тиску, лише перекривши кінцевий зріз трубки. Тому тарування датчиків проводилося при аналогічному розміщенні датчика наприкінці невеликого (20–50 мм) відрізка відпрацьованої трубки ДХ, інший кінець якої входив у канал діафрагменної ударної труби через отвір у торцевій сталевій пластині. Варіювання довжини трубки в межах 20–50 мм не вносило помітних змін в осцилограму тарувальної хвилі тиску.

Крім торцевого датчика тиску в дослідах використовувалися відносно невеликі (1 мм) пластинки п’єзокерамики ЦТС-19 товщиною 0,3 мм, наклеєні на зовнішню поверхню поліетиленової трубки. Сигнали від п’єзокераміки знімалися

за допомогою коротких відрізків тонких мідних дротикив діаметром 0,1 мм, припаяних одним кінцем до посріблених поверхонь п'єзокерамічних пластинок, а іншим кінцем – до коаксіального антивібраційного кабелю АВК-3. Отримані під час деформації п'єзокераміки електричні сигнали подавалися на електронні осцилографи типу С9-8 із цифровим відліком часової координати. Використання двох п'єзокерамічних пластинок з відомою відстанню між ними давало можливість із помилкою близько 5 % підрахувати середню швидкість поширення збурювань по трубці між п'єзоелементами.

Після реєстрації параметрів у процесі детонації ДХ поліетиленова трубка використовується повторно, водночас в кожному досліді встановлювалася нова дротинка ідентичних розмірів, що ініціювала імпульс, який запускає хвилю тиску при електровибуху.

У перших дослідах визначалися характер і швидкість поширення хвилі тиску, що рухається каналом ДХ. У десяти дослідах електровибух провідника стандартної довжини 15 мм проводився не в середині трубки, а в 3–35 мм від її торця, попередньо заклеєного тонкою твердою пластинкою діаметром близько 5 мм. Такий імпульс не робив детонації до початку процесу у внутрішньому каналі поліетиленової трубки ДХ, але генерував слабкі поздовжні хвилі тиску, швидкість яких D також розраховувалася по відомій відстані між п'єзоелементами й інтервалу часу між характерними точками осцилограми.

Реєстрація деформацій поліетиленової трубки ДХ проводилася за допомогою тензорезисторів типу 5П В-12 (база 1 мм, коефіцієнт тензочутливості К = 2,12), включеними в потенціометричну схему. Тензорезистори наклеювалися на зовнішню поверхню трубки в кільцевому напрямку так, що при поширенні процесу детонації показання датчиків давали можливість зареєструвати окружні деформації зовнішньої поверхні трубки, а отже визначити зміну радіального переміщення $u_н$ стінки трубки в часі. Сигнали від тензорезисторів подавалися на запам'ятовуючі осцилографи С 8-13 і С 8-17. [46]

3.2 Детонаційні процеси у варіантах вітчизняного хвилеводу

Типові осцилограми, які фіксувалися осцилографами С 9-8 при подачі на них сигналів із пластинок п'єзокераміки, наклеєних на зовнішню поверхню ДХ, показані на рис. 3.2 а, б. Відстань між п'єзоелементами (50±1) мм, час приходу сигналу відраховується за характерними точками осцилограм з помилкою ± 10^{-6} с.

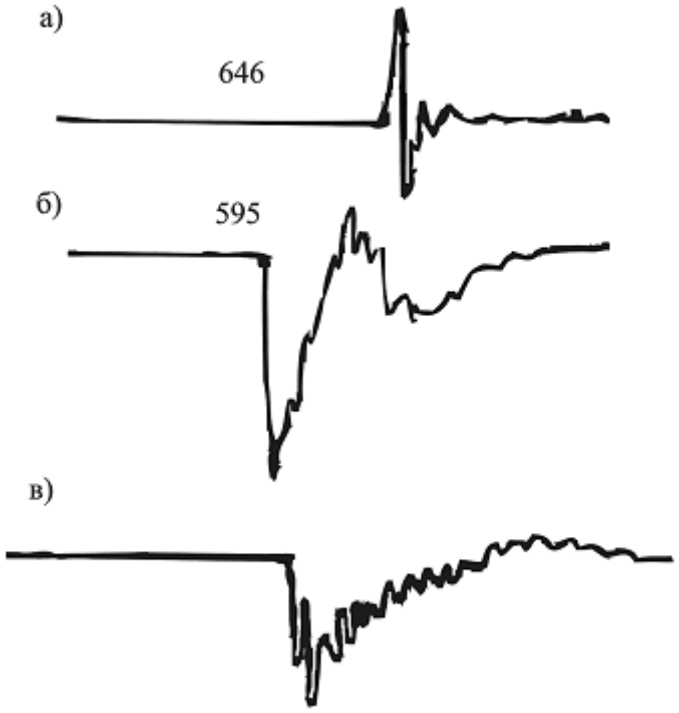


Рис. 3.2. Вид сигналів:
а, б – від п'єзокерамічних бічних пластинок,
в – від п'єзокерамічного торцевого датчика тиску

На графіку рис. 3.3 по осі абсцис відкладена координата середніх точок між парами п'єзокерамічних датчиків, які фіксують момент приходу до них фронту збурювання. Точками позначено швидкість V поширення в каналі ДВ хвилі тиску лише від електровибуху дротини. Варто підкреслити значне розкидання експериментальних точок, пов'язаний з розкиданням параметрів ініціюючого електровибуху, і добре помітну тенденцію до падіння швидкості хвилі з віддаленням її фронту від центра джерела електровибуху. Середня швидкість на

відстані 0,1–0,15 м від електровибуху дорівнює 1300 м/с, а з віддаленням хвилі від джерела падає – на відстані близько 0,24 м її значення зменшуються до 400–500 м/с.

Хрестиками на рис. 3.3 позначені результати виміру швидкості D поздовжньої хвилі тиску, що виникає поблизу закритого торця поліетиленової трубки. Значення D, отримано як середнє арифметичне за результатами десяти дослідів, становить 840 м/с. [146]

На рис. 3.2, *в* наведено осцилограму, записану торцевим датчиком тиску при зрушенні процесу детонації в поліетиленовій трубці ДХ довжиною 1 м. Перший пік тиску з наростанням тиску протягом 1 мкс у семи дослідах мав значення $(20 \pm 5)\cdot 10^5$ Па. В іншому піку протягом декількох мікросекунд тиск наростав до $25\cdot 10^5$ Па з наступним спаданням приблизно за $150\cdot 10^{-6}$ с.

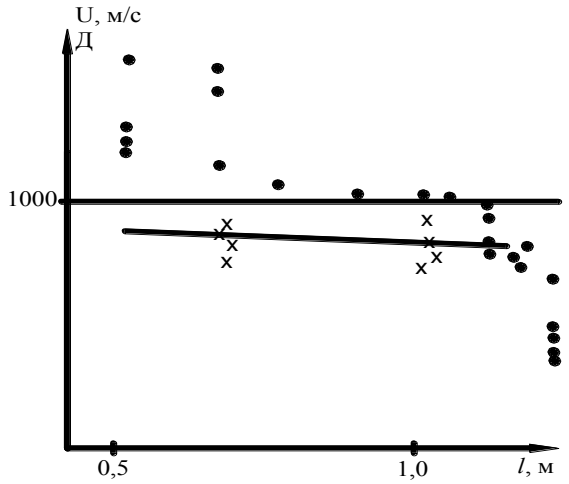


Рис. 3.3. Результати вимірювання швидкісних параметрів у відпрацьованому хвилеводі

1 – швидкість поширення ударної хвилі в каналі хвилеводу

2 – швидкість поздовжньої хвилі тиску в закритому торці трубок

Результати вимірювань швидкості поширення хвилі детонації внутрішнім каналом поліетиленової трубки ДХ на різних відстанях від джерела вибуху показано на рис. 3.4. Досліди виконані з застосуванням трубок довжиною 0,5 м (1) і 1,0 м (2).

У початковій зоні зародження детонаційного процесу не вдалося виконати вимірювання через більші електричні наведення, які виникають на каналах реєструючої апаратури внаслідок електророзряду. Досліди показують, що після електровибуху механічний процес перетворення напиленої вибухової речовини на внутрішню поверхню трубки ДХ відбувається з наростаючою швидкістю в каналі ДХ півметрової довжини (ділянка розгону).

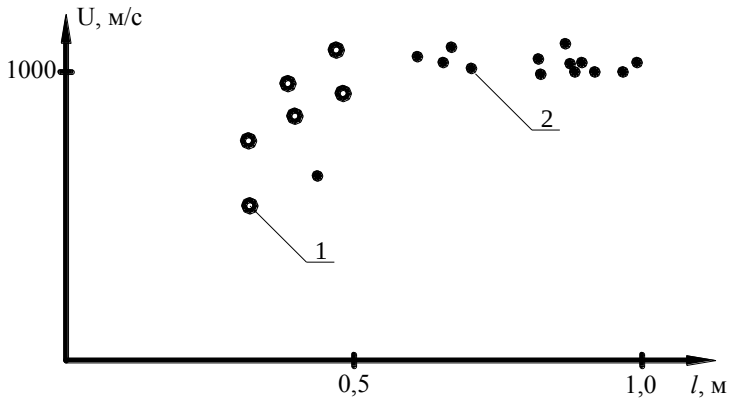


Рис. 3.4. Швидкість детонаційної хвилі

1 – у трубці довжиною 0,5 м;

2 – у трубці довжиною 1,0 м

Надалі процес детонації йде з постійною швидкістю близько 1000 м/с. Таким чином, можна зробити висновок, що переддетонаційний процес розкладання напиленої ВР для даного ДХ стабілізується на відстані 0,5 м від точки ініціювання.

На графіках рис. 3.5 наведено осцилограми процесу деформування поліетиленової трубки ДХ на відстані 0,44 м від точки ініціювання. Нижня осциллограма ілюструє деформування зовнішньої поверхні трубки ДХ у процесі поширення детонаційної хвилі. Верхня крива, що представляє залежність деформації поверхні трубки від часу, зареєстрована тим же датчиком, що фіксував хвилю тиску під час детонації ДХ від електровибуху. Оцінка сигналів з урахуванням різної чутливості каналів показала, що їхні значення відрізняються в

20 разів. Таким чином, можна зробити висновок, що помилки у вимірах деформацій ДХ, що виникають за рахунок дії електровибуху на відстанях більше 0,44 м від точки ініціювання, не перевищують 5 %.



Рис. 3.5. Осцилограми, що фіксують процес деформації трубчастого детонуючого хвилеводу

1 – дія ударної хвилі;

2 – дія детонаційної хвилі

Для порівняння на рис. 3.6 в однаковому масштабі наведено осцилограми деформування трубки ДХ на відстанях 0,28 (рис. 3.6, *а*), 0,4 м (рис. 3.6, *б*) і 0,9 м (рис. 3.6, *в*) від точки ініціювання. Чітко простежується переддетонаційний процес горіння й утворення детонаційної хвилі в каналі поліетиленової трубки. Амплітудне значення сигналу тензорезистора наростає, фронт стає більш крутим, загальна тривалість сигналу зменшується. На відстані 0,9 м від електророзряду, де процес детонації виразно стабілізується, середнє значення відносної окружної деформації досягає $0{,}5 \cdot 10^{-3}$, а тривалість імпульсу склала $4 \cdot 10^{-4}$ с.

Наведені матеріали мають насамперед методичне значення, оскільки вони можуть бути основою для подальших досліджень щодо створення надійних засобів неелектричного безпечного ініціювання свердловинних і шпурових

зарядів і контролю їхньої якості. Як показує аналіз отриманих результатів, комплексна методика лабораторних досліджень забезпечує визначення основних експлуатаційних характеристик хвилеводу типу «Нонель» з достатнім ступенем точності – помилки вимірювань переважно не перевищують 5 %.



Рис. 3.6. Осцилограми деформування трубчастого хвилеводу на відстані від точки ініціювання: *а* – 0,28 м, *б* – 0,4 м, *в* – 0,9 м.

Коливання енергії ініціюючого електровибуху практично не впливало на довжину розгону детонаційної хвилі у хвилеводі, що склала близько 0,5 м. Крім того, імпульс тиску на протилежному від місця ініціювання кінці хвилеводу (2,0–2,5 МПа) цілком достатній для порушення детонації в спеціальних проміжних капсулях. Відносно низька швидкість детонації (1000...2000 м/с) дозволяє використовувати хвилевод як елемент коротких уповільнень і складати вибухову мережу з потрібними змінними інтервалами сповільнень за меншої витрати хвилеводу.

Щодо міцності оболонки хвилеводу і якості напилення ВР на внутрішню поверхню поліетиленової трубки, їх досить високий рівень підтверджується стабільністю отриманих у серії дослідів детонаційних параметрів хвилеводу. Однак порівняно з відомими досліджені зразки хвилеводу характеризуються

більш низькою швидкістю детонації. Це пояснюється крупністю часточок напиленої ВР, а також їх формою, які разом суттєво впливають на рівень і стабільність швидкості детонаційного процесу в каналі ДХ. Можна стверджувати, що найбільш раціональна форма часток, які за можливості варто впроваджувати для спорядження ДХ, має бути близькою до сферичної. Це раціонально і з точки зору механізму та стабільності закріплення напилюваних часток на внутрішній поверхні хвилеводу, і з точки зору надійності їх струшування під дією поперечної пружної хвилі, і в сенсі рівномірності розподілу часток ВР у пилоповітряній суміші. Для цього в роботі виконано відповідні дослідження щодо добору енергетично ефективних складів напилюваної ВР, а також розроблено відповідну технологію сфероїдизації кристалів обраної ВР в промисловому масштабі.

3.3 Техніка сфероїдизації порошкових композицій напилюваної ВР

Виробництва нітрагінів, тобто гексогену і октогену – основних компонентів, що переважають в складі високоенергетичних порошкових композицій, придатних для напилювання при виробництві сучасних безпечних систем ініціювання типу «Нонель», на сьогодні відсутня в Україні. Проблему дефіциту зазначених нітрагінів можливо вирішувати через використання зворотних ресурсів. Ці ресурси отримуються при реалізації технології утилізації твердого ракетного палива (ТРП) та боєприпасів [77, 115, 116, 225], непридатних для подальшого застосування за прямим призначенням.

В якості високоенергетичних наповнювачів (октогену, гексогену), необхідних для виробництва основної складової неелектричної системи ініціювання типу «Нонель» – детонуючого хвилевода – застосовуються порошкоподібні продукти. Порошкоподібні частки, напилювані на внутрішню поверхню канала хвилеводу. [77, 225]. Ефективність закріплення кристалів високоенергетичного наповнювача в каналі хвилеводу суттєво залежить від їх форми. Найбільш вірогідно, що при згаданій утилізації отримувані кристали октогену (HMX) орторомбічної моноклінної β-модифікації матимуть витягнуту

брускоподібну або ізометричну форму, хоча витягнута брускоподібна форма знижує фізико-механічні властивості напилюваних композиційних складів на основі октогену. Більш технологічно прийнятною для напилення є сферична або близька неї форма кристалів. Таким чином, найбільш актуальними в продукції високоенергетичних наповнювачів є вимоги щодо отримання октогену β-модифікації певного гранулометричного складу зі сферичною формою кристалів при густині не менш 1,89 г/см^3. [229, 234, 250].

Відомі декілька методів утилізації ТРП та боєприпасів зі збереженням необхідних компонентів ТРП і подальшого їх використання у якості сировинної бази для створення нових високоенергетичних композиційних складів. Одним з найефективніших є гідромеханічний метод, що заснований на гідродинамічному вилученні часток твердого ракетного палива та подальшому його подрібнення до порошкоподібного стану [77, 115]. Однак у практиці при реалізації зазначеної технології вилучені з твердого ракетного палива та інших боєприпасів нітраміни не відповідають згаданим вимогам до якості кінцевого продукту, які складають за густиною не менше 1,79 г/см^3 для гексогену, а для октогену – не менше 1,89 г/см^3). Крім того, форма кристалів і гранулометричний склад порошку під час виробництва високоенергетичних композиційних сумішей суттєво відрізняються від вимог.

Згідно з [77, 117, 225] сферичні частки гексогену були отримані при механічній обробці кристалів штатного продукту в насиченому розчині ацетону з наступним травленням у етилацетаті. При цьому методі отримуються прозорі сферичні частки гексогену з гладкими поверхнями. Кристали нітрамінів з формою, близькою до ізометричної, можливо отримати перекристалізацією із органічних розчинників [118–122].

Крім згаданого гідромеханічного методу, відома інформація щодо отримання кристалів високоенергетичних матеріалів [123–125] сферичної форми іншими способами: методом гідромеханічного окатування в спеціально розробленому стакані; із застосуванням ультразвукової обробки кристалів октогену.

Уроботі [244] було поставлено за мету отримання оптимальних параметрів кристалів октогену сферичної форми зі штатного октогену і октогену, вилученого з полімерної матриці твердого ракетного палива із застосуванням ультразвуку та гідромеханічного окатування.

Метод гідромеханічного окатування здійснюється в спеціально розробленому стакані з перемішувальним пристроєм.

Вплив ультразвуку на сфероїдизацію штатного октогену досліджувався в ультразвуковій бані BANDELIN SONOREX [77, 225].

Особливість методу полягає в тому, що перемішування механічною мішалкою суспензії штатного октогену в рідкому середовищі стакана відбувається в ультразвуковій бані. Як рідке робоче середовище використовують воду.

Таке перемішування призначене лише для утримання твердої фази в підвішеному шарі робочої рідини і не є визначальним для процесу сфероїдизації.

Дослідження виконувалося поетапно. На першому етапі роботи (спосіб 1) виконано оцінку перспектив отримання кристалів сферичної форми шляхом обробки ультразвуком і шляхом застосування методу гідромеханічного окатування (спосіб 2) штатного октогену. Щоб оцінити ефективність обох способів в однакових умовах, сфероїдизація штатного октогену виконувалася протягом 1 години в водному середовищі як із застосуванням ультразвуку (спосіб 1), так і методом гідромеханічного окатування (спосіб 2).

Спосіб 1 із застосуванням ультразвуку складався з наступних стадій.

В ультразвукову баню BANDELIN SONOREX, заповнену дистильованою водою, встановлювався скляний стакан, оснащений механічним змішувачем. У стакан додавали штатний октоген і воду у співвідношенні 1:4. Одночасно виконувалося перемішування механічним змішувачем зі швидкістю 0,785 м/с і ультразвукова баня з частотою опромінювання 35 кГц. Перемішування суспензії з одночасним ультразвуковим опромінюванням продовжувалося протягом 1 год. Після закінчення процесу сфероїдизації часток октогену в суспензії кристали октогену відфільтровувалися, промивалися на фільтрі етиловим спиртом,

сушилися і зважувалися. У отриманого сфероїдизованого октогену на мікроскопі Leica DMILM визначалася форма кристалів. Фракційний склад октогену визначався мокрим розсівом у етиловому спирті, густина визначалася пікнометричним методом.

Спосіб 2 із застосуванням гідромеханічного окатування складався з таких стадій.

В стакані (рис. 3.7), оснащеному змішувачем з пропелерним пристроєм, розташовували наважку штатного октогену і води при співвідношенні 1:5 відповідно. Перемішування виконувалося механічним змішувачем протягом 1 години при швидкості 3,14–4,45 м/с. Після закінчення процесу сфероїдизації кристали октогену фільтрували, промивали на фільтрі етиловим спиртом, сушили, зважували. У отриманого порошкового октогену визначали на мікроскопі Leica DMILM форму кристалів. Фракційний склад порошку визначався мокрим розсівом у етиловому спирті, його густина – пікнометричним методом.

На другому етапі було проведено роботи зі сфероїдизації октогену, вилученого з полімерної матриці твердого ракетного палива. З отриманої полімерної матриці ТРП октоген вилучали за допомогою диметилсульфоксиду (ДМСО) [115, 116, 119] з подальшим відділенням екстракту від рафінованої крихти ПМ. Октоген висаджувався шляхом введення в розчин екстракту води – компонента, що не розчиняє октоген. Отриманий продукт фільтрувався, промивався на фільтрі етиловим спиртом, висушувася при кімнатній температурі, зважувався. Після цього проводили кристалізацію у ДМСО з подальшим введенням осаджувача – води. Отриманий модифікований октоген фільтрувався, промивався на фільтрі етиловим спиртом, сушився при кімнатній температурі, зважувався.

У таблиці 3.1 наведено порівняння характеристик штатного октогену до та після його сфероїдизації з застосуванням ультразвуку і способом гідромеханічного окатування [77, 225].

Таблиця 3.1. Порівняння фізико-хімічних характеристик штатного октогену до та після його сфероїдизації з застосуванням ультразвуку і способом гідромеханічного окатування

Найменування показника	Фактична величина показника октогена		
	Вихідний штатний	Отриманий ультразвуком	Отриманий гідромеханічним окатуванням
Форма кристалів	β форма, ізометрична та брускоподібна	β форма, ізометрична та брускоподібна	β форма, близька до сферичної
Кристалічна густина, г/см^3	1,90	1,90	1,91
Гранулометричний склад,			
≥ 700 мкм	1,2 %	0 %	0 %
250 - 700 мкм	34,7 %	33,5 %	22,0 %
100 - 250 мкм	43,9 %	43,2 %	46,6 %
≤100 мкм, у тому числі:	20,2	23,3	31,2
100 - 50 мкм	7,7 %	9,6 %	13,7 %
≤50 мкм	12,5 %	13,7 %	17,5 %

На рис. 3.7 наведено фото розсіяного штатного октогену після 2-х годин процесу сфероїдизації з застосуванням способу гідромеханічного окатування у водному розчині диметилсульфоксиду (ціна мінімального розподілу 10 мкм, фракція + 150–350 мкм).

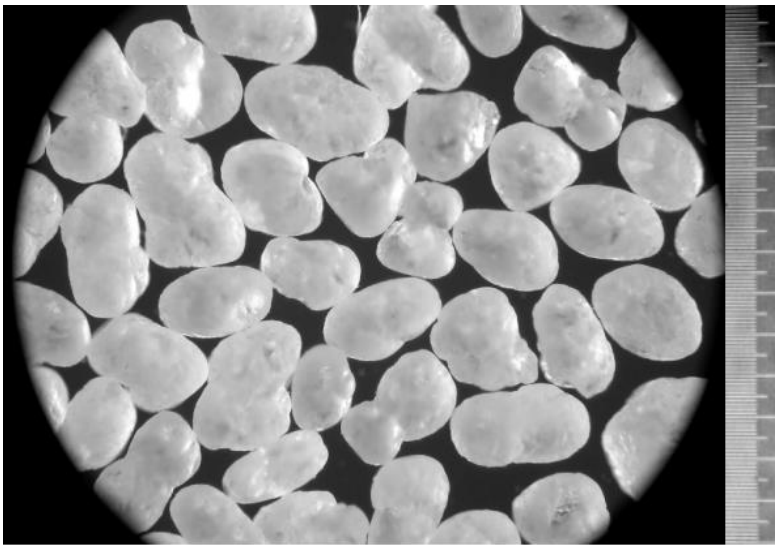


Рис. 3.7. Фото розсіяного штатного октогену після 2 годин сфероїдизації з застосуванням способу гідромеханічного окатування у водному розчині ДМСО (ціна мінімального розподілу 10 мкм, фракція + 150–350 мкм).

На рис. 3.8 наведено фото розсіяного модифікованого октогену, отримуваного вилученням з полімерної матриці ТРП після 2-х годин сфероїдизації з застосуванням способу гідромеханічного окатування у водному розчині диметилсульфоксиду (фракція + 150–350 мкм) [77, 117, 225].

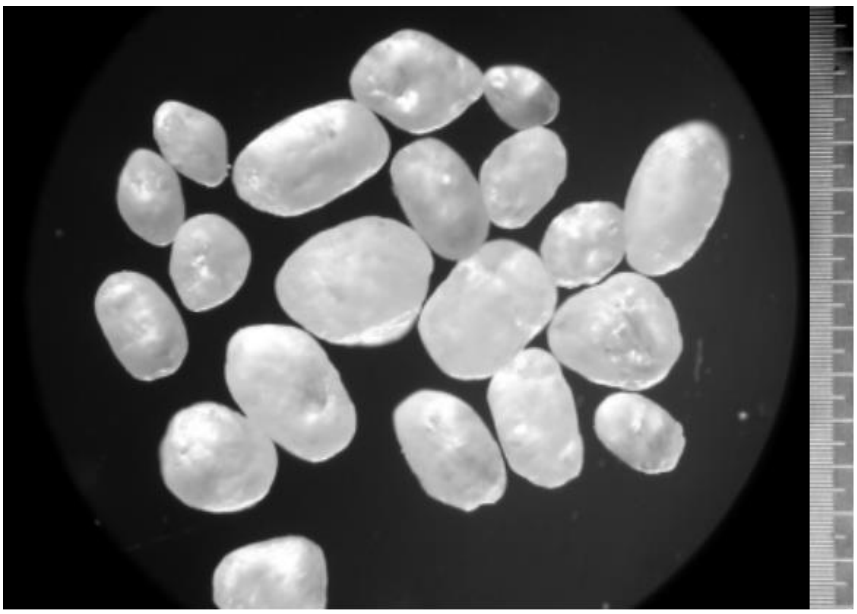


Рис. 3.8. Фото модифікованого октогену, отримуваного вилученням з ПМ ТРП, після 2 годин сфероїдизації з застосуванням способу гідромеханічного окатування у водному розчині ДМСО (фракція + 150–350 мкм).

У результаті сфероїдизації отримано кристали модифікованого октогену, вилученого з полімерної матриці ТРП (рис. 3.8), із заданими характеристиками (густина – 1,89 г/см^3, форма кристалів близька до сферичної).

Дрібну фракцію модифікованого октогену, отримуваного вилученням з полімерної матриці ТРП (менше 50 мкм), яка утворюється в процесі сфероїдизації, після розсівання можливо використовувати в складах активної речовини для виробництва неелектричних систем ініціювання без додаткової кристалізації або повертати знову в процес кристалізації з водного диметилсульфоксиду з подальшою сфероїдизацією.

Таким чином, форму отриманих кристалів октогену, а також його гранулометричний склад можливо способом гідромеханічного окатування отримувати або коригувати, доводячи форму кристалів близько до сферичної. Це має суттєво позначитися на швидкості та стабільності детонаційного процесу детонуючого хвилеводу в сучасних безпечних системах неелектричного ініціювання [77, 225].

3.4 Термодинамічні дослідження обраних складів напилюваних ВР

З метою визначення найбільш ефективного за енергетичними характеристиками детонуючого складу для ДХ було проведено розрахунки енергії Гіббса для двох найбільш перспективних вибухових композицій.

Енергія Гіббса (або ізобарно-ізотермічний потенціал) – це величина, зміна якої в ході хімічної реакції дорівнює зміні внутрішньої енергії. Енергія Гіббса показує, яка частина від повної внутрішньої енергії системи може бути використана для хімічних перетворень або отримана в результаті у заданих умовах (у нашому випадку при вибуху досліджуваної суміші на основі перекису водню та гліцерину) і дозволяє встановити принципову можливість протікання хімічної реакції в цих умовах. Енергію Гіббса можна розуміти як повну потенційну хімічну енергію системи (кристалу, рідини тощо) [239].

Для обєктивного порвніння реакція термічного розкладання в обох випадках розглядалася при нульовому кисневому балансі.

3.4.1 Розглянуто детонуючий склад на основі БВР октоген (циклотетраметилентетранитрамин). Реакція термічного розкладу виглядає таким чином:

$C_4H_8N_8O_8+2O_2=4CO_2+4H_2O+4N_2$.

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 3.9, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 3.10. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 1.

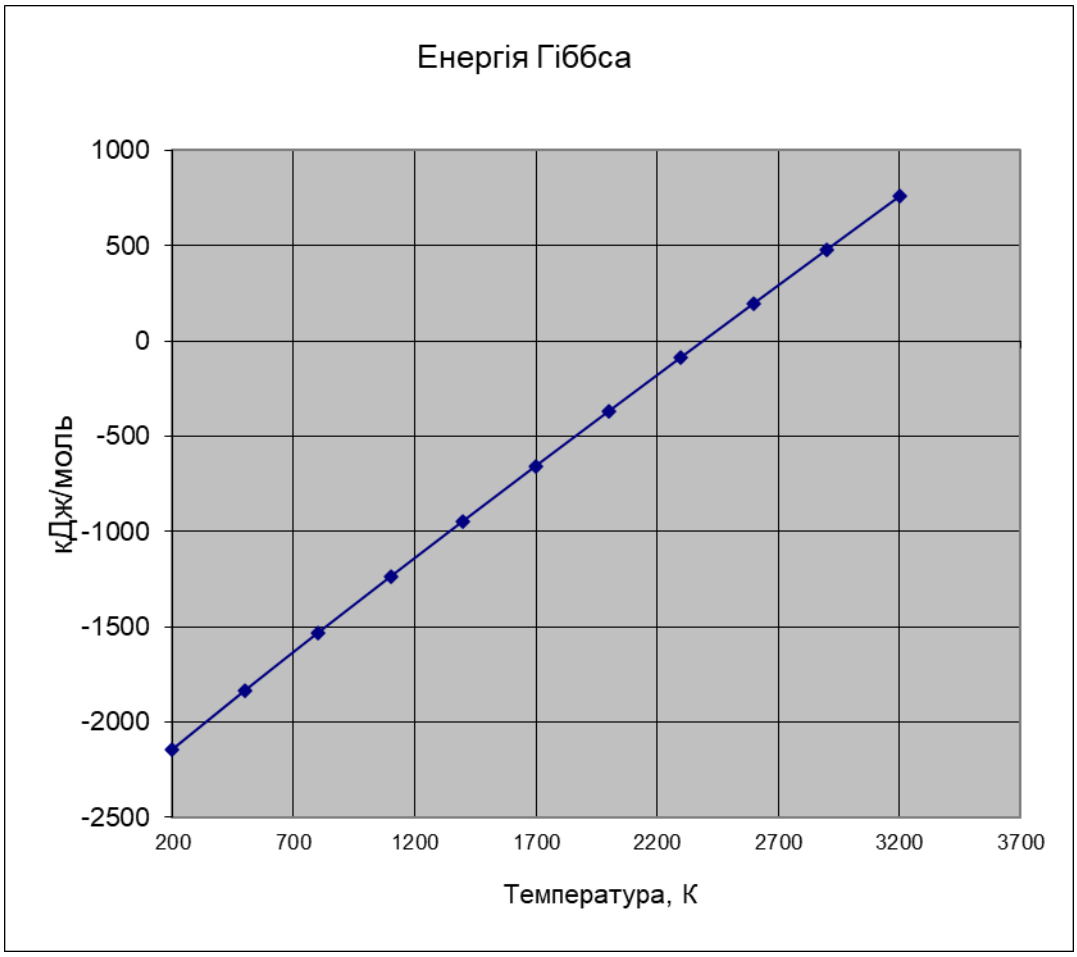


Рис. 3.9. Залежність зміни енергії Гіббса октогену від температури

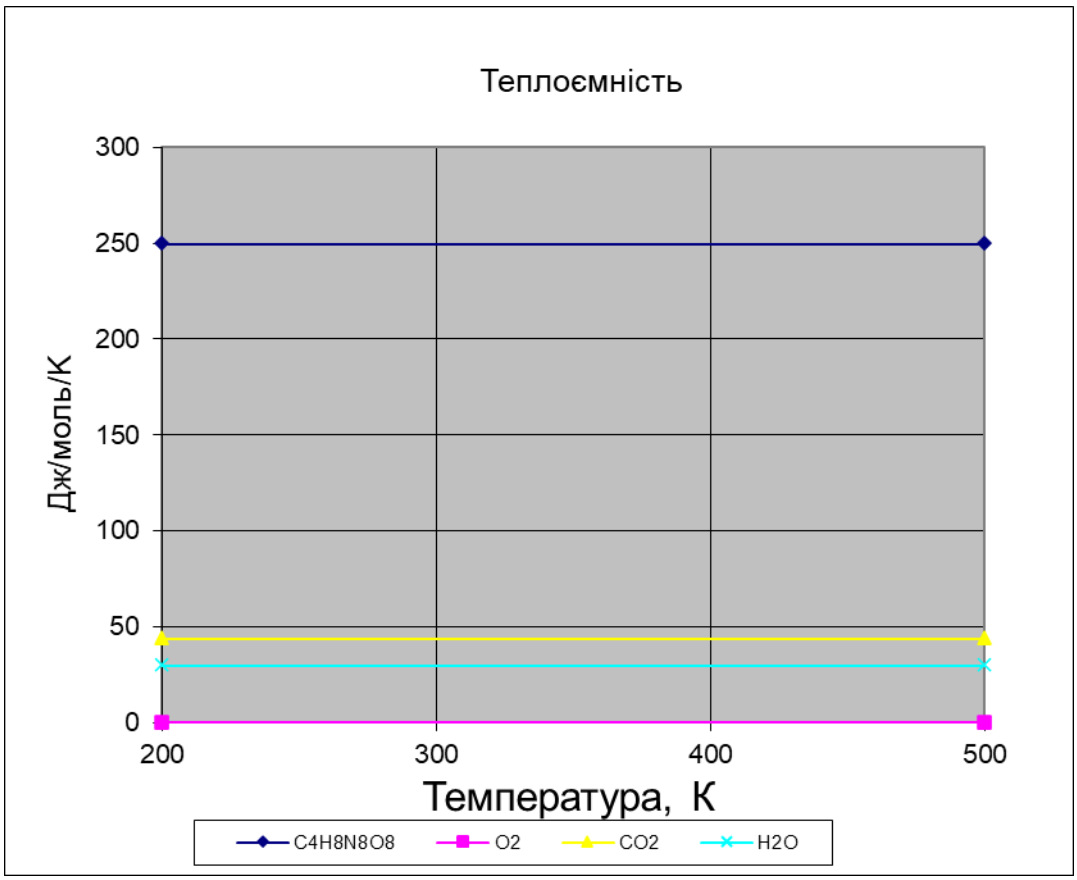


Рис. 3.10. Теплоємності компонентів реакції вибуху октогену

Графік зміни енергії Гіббса для детонуючого складу на основі октогену свідчить про зміну напрямку реакції при 2420 ºС. Це відбувається під час переходу через нульовий показник енергії Гіббса, який являється точкою рівноваги (балансу) хімічних процесів, що можуть протікати при термодинамічній реакції. Чим вищий цей температурний показник, тим вищий енергетичний потенціал під час вибуху розкладу суміші.

3.4.2 Розглянуто детонуючий склад на основі БВР октоген та алюмінієвої пудри ПАП-2 в співвідношенні 79:21. Реакція термічного розкладу виглядає таким чином:

$C_4H_8N_8O_8+2Al+5O_2=4CO_2+4H_2O+2Al_2O_3+4N_2$.

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 3.11, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 3.12. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 2.

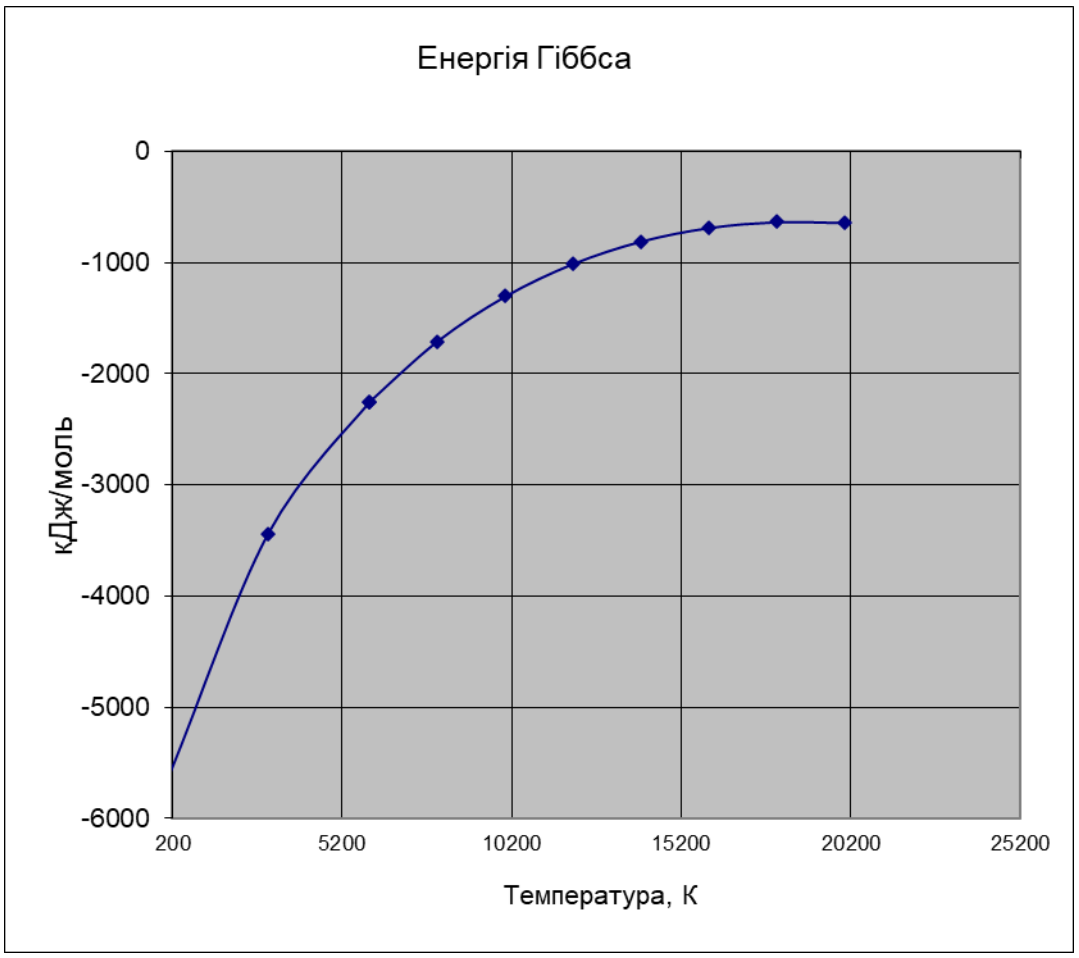


Рис. 3.11. Залежність зміни енергії Гіббса складу на основі октогену та алюмінієвої пудри від температури

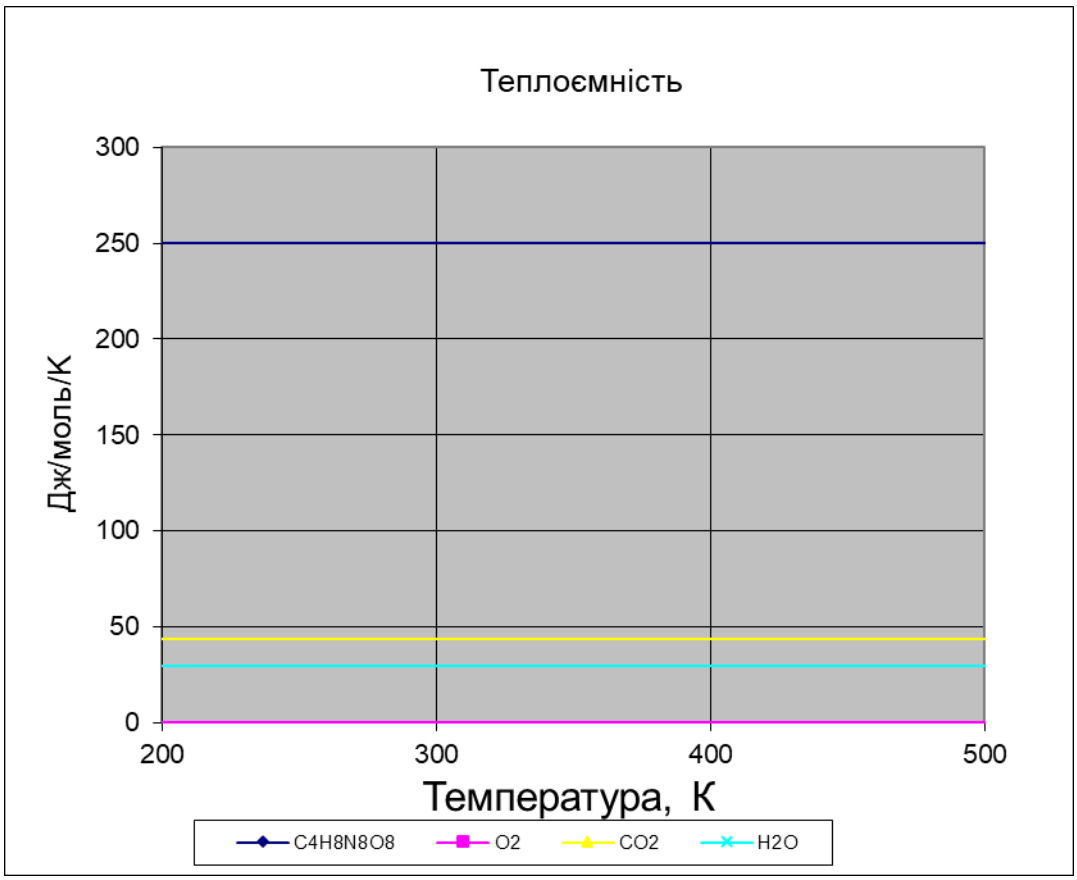


Рис. 3.12. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі октогену та алюмінієвої пудри

Графік зміни енергії Гіббса детонуючого складу на основі БВР октоген та алюмінієвої пудри ПАП-2 свідчить про теоретичну відсутність зміни напрямку реакції за будь-яких умов. Склад октогену з алюмінієвою пудрою – найпотужніший з досліджених та може бути ефективно використаний не лише у воєнній справі, а й для спорядження основного конструктивного елемента сучасної неелектричної системи ініціювання типу «Нонель», а саме детонуючого хвилеводу.

3.5 Динамічні параметри детонуючого хвилеводу

Протягом останніх десятиліть ШІ СумДУ займалися розробкою засобів ініціювання для гірничодобувної промисловості [97]. Розроблено вітчизняний хвилевід для неелектричної системи ініціювання типу «Нонель» [98] із

провідником імпульсу низькоенергетичного типу – детонуючим хвилеводом [99]. Теоретичне й експериментальне обґрунтування механізму зрушення й передачі детонації у хвилеводі виконано в співробітництві із НТУУ «КПІ» і Інститутом механіки НАН України [89, 96]. Система пройшла приймальні випробування в промислових умовах гранітних кар'єрів Житомирської області. У порядку вдосконалювання системи сполучних блоків для порушення детонації в магістральних і дільничих хвилеводах за необхідності одночасної детонації частин розосереджених свердловинних зарядів застосовані спеціальні бескапсульні комутатори, що забезпечують передачу детонації через незаповнені вибуховою речовиною порожнини [100].

Налагодження методики вимірів виконувалося із застосуванням поліетиленового хвилеводу без напилення ВР у каналі. Розміри трубок становили: довжина – 1 м, зовнішній діаметр – 3 мм, внутрішній – 1,5 мм. П'єзодатчики розмірами 1х1х0,15 мм із п'єзокераміки ЦТС – 19 наклеювалися на зовнішню поверхню поліетиленової трубки (рис. 3.13).

Трубка встановлювалася на дошці й ізолювалася від неї поролоном розміром 10х10х1020 мм. Для виключення електромагнітних наведень у схемі використовувався антивібраційний кабель.

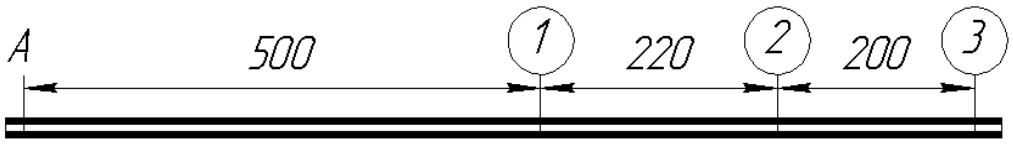


Рис. 3.13. Схема експерименту з відпрацьованою трубкою довжиною 1,0 м

Механічний імпульс генерувався електровибухом при U = 3 кВ, З = 46 мкФ, що досить для зрушення детонації в трубках з напиленою ВР. Реєстрація сигналів здійснювалася двопроменевими осцилографами С 9-8 і С 9-16 з роздільною здатністю 1 мкс.

Електровибух виконувався в т. А (рис. 3.16); між датчиками 1 і 2 була зареєстрована швидкість хвилі V = 855 м/с, а між датчиками 2 і 3 V = 840 м/с, звідки $V_{ср}$ = 848 м/с.

Аналогічний дослід було проведено для більш м'якого хвилеводу з зовнішнім діаметром 2,2 мм і внутрішнім діаметром 1,5 мм. П'єзодатчики були наклеєні за схемою, наведеною на рис. 3.14.

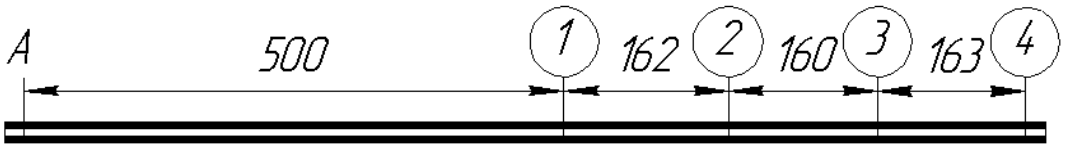


Рис. 3.14. Схема експерименту з м'яким хвилеводом

Були зареєстровані наступні швидкості поширення збурювань по поліетиленовій трубці від електровибуху в точці А:

V_{12} = 780 м/с; V_{23} = 730 м/с; V_{34} = 670 м/с, звідки $V_{ср}$ = 727 м/с.

Результати вимірювань показують, що в більш тонкій трубці, виготовленій з менш міцного поліетилену, модуль пружності якого на 36 % менший, ніж у трубки діаметром 3 мм, швидкість збурювання від електровибуху значно більша. Крім того, у всіх дослідах помітне зниження швидкості збурювання по довжині хвилеводу з видаленням від точки прикладання імпульсу, що характерно для динамічних процесів у нейтральних середовищах у зв'язку з втратою енергії хвилею на деформування хвилеводу.

Після налагодження вимірювальної методики на поліетиленових трубках без ВР був випробуваний хвилевід із зовнішнім діаметром 3,3 мм і внутрішнім – 1,5 мм. Схему розміщення п'єзодатчиків наведено на рис. 3.15. За попереднім дослідом первісний відрізок хвилеводу прийнятий довжиною l = 1 м.

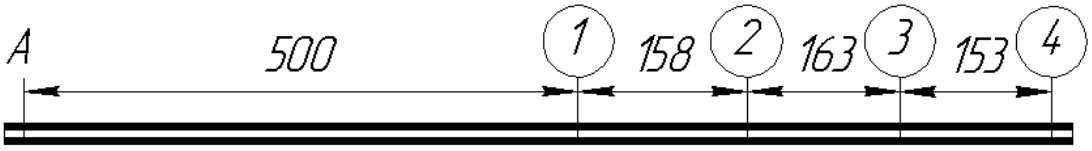


Рис. 3.15. Схема дослідів із серійним хвилеводом

Під час проведення електровибуху процес детонації спостерігався візуально до датчика 1 на відстані близько 300 мм від електровибуху. Вимірювані швидкості мають такі величини: V_{12} = 1800 м/с ; V_{23} = 1820 м/с ; V_{34} = 1790 м/с . Середня швидкість сигналу склала $V_{ср}$ = 1803 м/с. Візуальне спостереження початку детонації у вигляді блакитного світіння й постійна швидкість поширення детонації каналом хвилеводу після довжини 0,5 м свідчить про більш високі параметри початку детонаційного процесу.

Наступний дослід з визначення швидкості детонації в досліджуваному хвилеводі виконано на трубці довжиною 585 мм (рис. 3.16).

Показання датчиків 1 і 2 паралельно виводилися на екрани двох осцилографів. На рис. 3.17, *а* наведено осцилограми п’єзодатчиків 1 і 2, зареєстровані на осцилографі С 9-8, а на 3.20, *б* – на осцилографі С 9-16.



Рис. 3.16. Схема експериментів із детонуючим хвилеводом

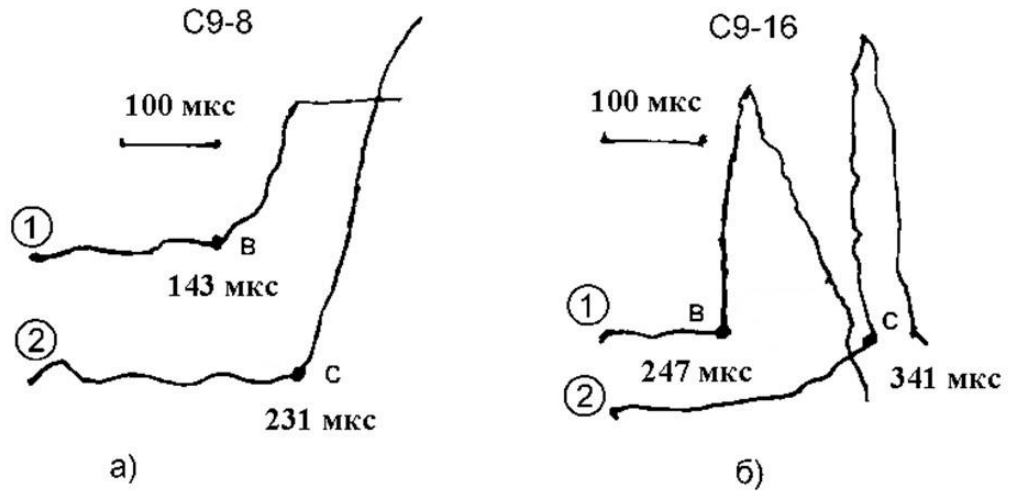


Рис. 3.17. Результати випробувань детонуючого хвилеводу: *а* – п’єзодатчик 1, *б* – п’єзодатчик 2

Точки зривання сигналу (точки «в» та «с») на рис. 3.17 *а*, *б* відповідають приходу фронту детонаційної хвилі в точку наклеювання п’єзодатчика. Швидкість детонації між 1 і 2 датчиками становить:

осцилограф С 9-8 V = 1852 м/с,

осцилограф С 9-16 V = 1734 м/с.

Таким чином, середня швидкість детонації по двом осцилографам становить $V_{ср}$ = 1793 м/с.

На осцилограмах явно проглядається, що перед зриванням сигналу датчики фіксують деякий слабкий сигнал, що, можливо, є наслідком дії диспергуючих хвиль типу пружного провісника, що передбачається теоретично.

Наступним етапом експериментів було вимірювання тиску, що детонуючий хвилевід передає в камеру розгалужувача. Тиск вимірювався за допомогою датчика тиску, сигнал від якого виводився на екран осцилографа С 9-8. Датчик тиску встановлювався в торці хвилеводу, протилежному електровибуху. Датчик установлювався перпендикулярно осі хвилеводу так, що між торцями й мембраною датчика могло пройти лезо безпечної бритви (0,08 мм). Тарування датчика тиску виконувалося на ударній трубі за раніше описаною методикою. Чутливість датчика тиску при таруванні в ударній трубі становила Р =

2,429 В/МПа. П’єзодатчики й датчик тиску встановлювалися на випробуваному хвилеводі, як показано на рис. 3.18.

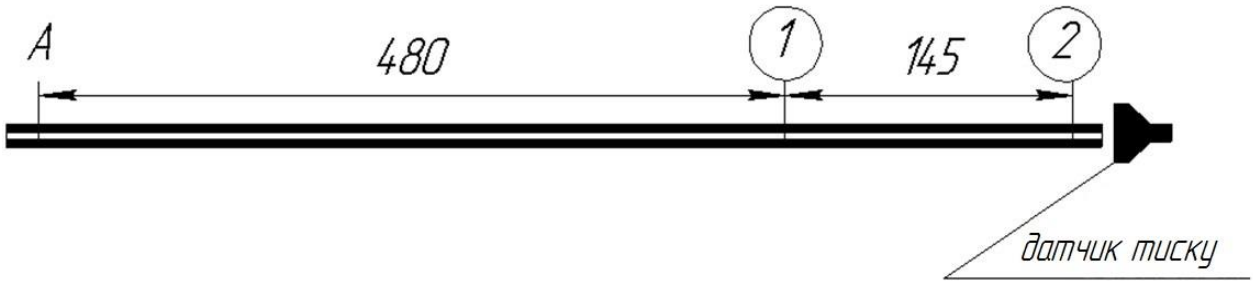


Рис. 3.18. Схема розташування п’єзодатчиків та датчику тиску

Швидкість детонаційної хвилі вимірювалася за допомогою датчиків 1 і 2, показники яких виводилися на осцилограф С 9-16. Показники датчика тиску фіксувалися за допомогою осцилографа С 9-8 і зображені на рис. 3.19.

Як видно з осцилограми, наростання ударного фронту до максимального значення відбувається за 2 мкс. Тиск у відбитій хвилі на торці хвилеводу дорівнює: $\frac{5{,}28B + 2{,}64B}{2{,}429B/МПа} = 3{,}26МПа$

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

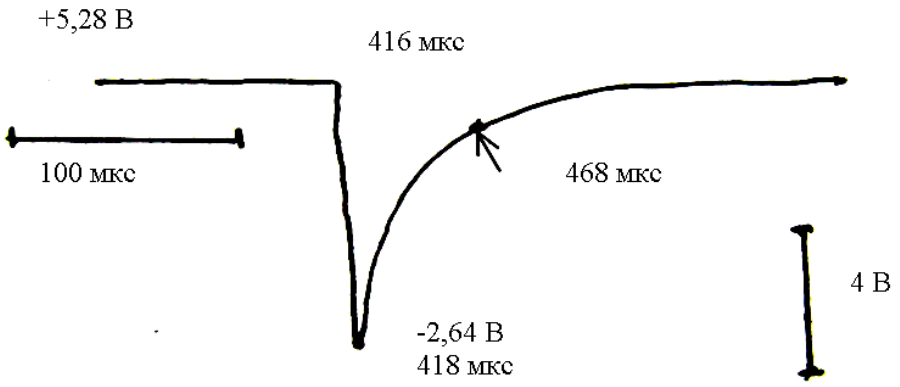


Рис. 3.19. Осцилограма тиску

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

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

На цих дослідах було визначено характеристики детонаційної хвилі, однак вони не свідчать про надійність самого хвилеводу. У процесі виробництва хвилеводу може виникнути ситуація короткочасного збою процесу дозування детонуючого складу (ДС) або зниження продуктивності дозатора або підвищення продуктивності екструдера з тих чи інших причин. У такій ситуації можуть утворюватися місця з малою кількістю детонуючого складу, який напилюється на внутрішню поверхню оболонки хвилеводу.

Тому виникає питання, на яку максимальну відстань може передаватися детонація у разі відсутності напилення ДС на певній ділянці трубки хвилеводу, і навіть у разі зниження кількості нанесеного складу.

У [44] описано, що детонація у хвилеводі системи «Нонель» може передаватися через трубку з внутрішнім перерізом, рівним перерізу оболонки хвилеводу на відстань до 60 см. Однак не говориться, на якій відстані не спостерігається відмов.

Для визначення відстані передачі детонації було проведено низку експериментів (рис. 3.20) на вітчизняному та зарубіжному зразках хвилеводів фірми «Діно Нобель».

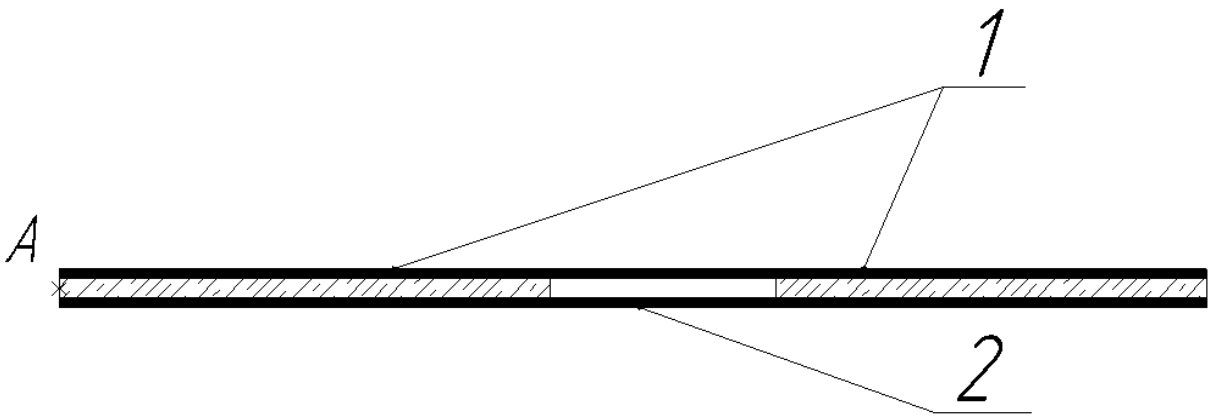


Рис. 3.20. Схема експериментів з передачі детонації через інертний проміжок, де: 1 – хвилевод з нанесеним ДС, 2 – інертний проміжок (трубка хвилеводу без напилення)

В експериментах використовувався відстрілений раніше хвилевід як інертний проміжок. Як уже було написано вище, ділянка розгону в хвилеводі близько 0,5 м, тому використовувалися відрізки хвилеводу метрової довжини як ініціювальний, так і ініційований. Ініціювання проводилося за допомогою стартового пістолета. З'єднання відрізків хвилеводу з відрізком хвилеводу без напилення проводилося за допомогою відрізків трубки із ПВХ, яка використовується у пневматичних приладах. Фіксацію проходження детонації проводили візуально за наявності сажі на внутрішній поверхні хвилеводу, що утворюється після детонації.

Після кожного експерименту з позитивним результатом довжину відрізка трубки хвилеводу без напилення збільшували на 2 см, у разі відмови довжину трубки зменшували на 2 см і потім проводили 10 дослідів при даній довжині трубки без напилення. У разі появи відмови хоча б в одному з дослідів довжину відрізка знову знижували на 2 см і так до того часу, поки результати всіх 10 дослідів будуть позитивні.

У ході експериментів було встановлено, що максимальна довжина трубки без напилення, через яку детонація передається, дорівнює 20 см для вітчизняного хвилеводу, і 22 см для хвилеводу фірми «Діно Нобель».

Таким чином, видно, що передача детонації відбувається на досить велику відстань. Внаслідок цього постало питання, чи може один відрізок хвилеводу передати детонацію двом відрізкам хвилеводу і більше.

Під час короткочасного зниження продуктивності дозатора знижується лінійна щільність нанесення складу. В результаті певний відрізок хвилеводу залишається зі зниженою лінійною щільністю. Щоб якісно визначити мінімальну лінійну щільність, за якої можлива підтримка детонації, на ділянці між двома відрізками хвилеводів робили вставки, в яких невеликий відрізок хвилеводу чергувався з трубкою (оболонкою) без напилення (рис. 3.21), тим самим знижували кількість ДС на цій ділянці .

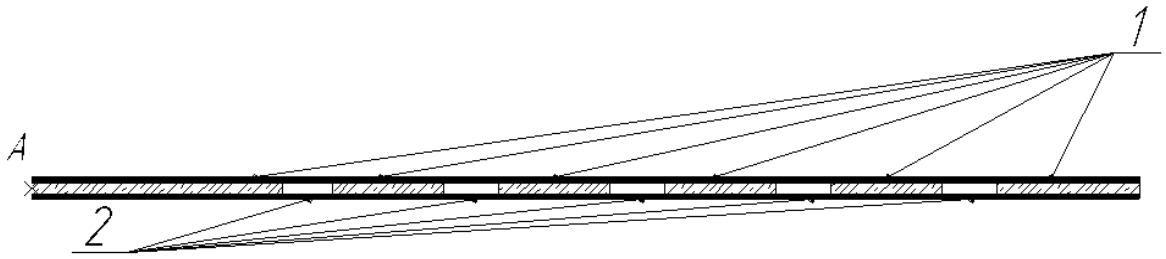


Рис. 3.21. Схема дослідів з визначення мінімальною лінійною щільністю ДС у хвилеводі, де: 1 – хвилевід з нанесеним ДС, 2 – інертний проміжок (трубка хвилеводу без напилення)

Ділянку зі зниженою щільністю виготовляли довжиною 2±0,15 м. Відрізки без напилення робили довжиною 5 см, а відрізки хвилеводу з напиленим складом між ними укорочували на 5 см після кожного досліду з позитивним результатом. У разі від’ємного результату відрізки хвилеводу з напилюванням збільшували на 5 см і проводили 10 дослідів. Якщо всі 10 дослідів мали позитивний результат, розраховували лінійну щільність нанесеного ДС у вставці та приймали її за мінімальну щільність нанесення ДС, за якої ще може поширюватися детонація. У випадку появи хоча б одного негативного результату довжину відрізків хвилеводу із напиленням знову збільшували на 5 см. Досліди починали з відрізків бойового хвилеводу 30 см у вставці.

У ході експериментів було встановлено, що передача детонації відбувається за мінімальних довжин відрізків хвилеводу у вставці, що дорівнює 100 мм. Тобто при зниженні лінійної густини нанесення ДС на 33 % від стандартної густини нанесення (25 мг/м) на відрізку до 2 м детонація ще може передаватися, що свідчить про досить високу надійність хвилеводу.

3.6 Дослідження процесу передачі детонації до хвилеводу через пасивний розгалужувач

Після дослідження імпульсу тиску, що входить у металевий трійник (розгалужувач), проведені досліди з вивчення процесу передачі детонації через металевий трійник. [36, 198] П’єзодатчики й датчик тиску встановлювалися, як показано на схемі рис. 3.22.

Після електровибуху детонація поширювалася по всім трьом трубкам хвилеводу. Верхній промінь осцилографа записував показники датчика тиску, а нижній промінь – сигнал від п’єзодатчика. На осцилограф С 9-16 на верхній промінь подавався сигнал від датчика 2, а на нижній – від датчика 3.

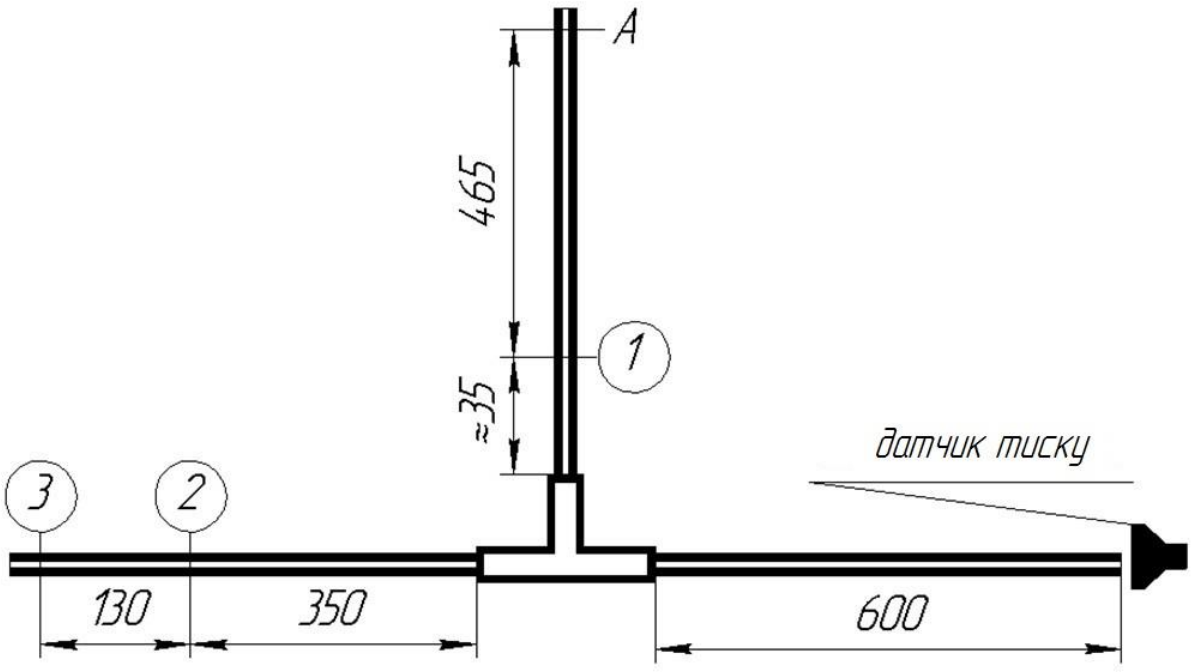


Рис. 3.22. Схема розміщення датчиків при експериментах з розгалужувачем

Відповідно до осцилограми датчика тиску, що наведена на рис. 3.23 з урахуванням показання його чутливості 2,429 В/МПа, максимальний тиск у відбитій хвилі буде дорівнювати:

$$\frac{10{,}24B + 5{,}6B}{2{,}429B/МПа} = 6{,}5МПа\ .$$

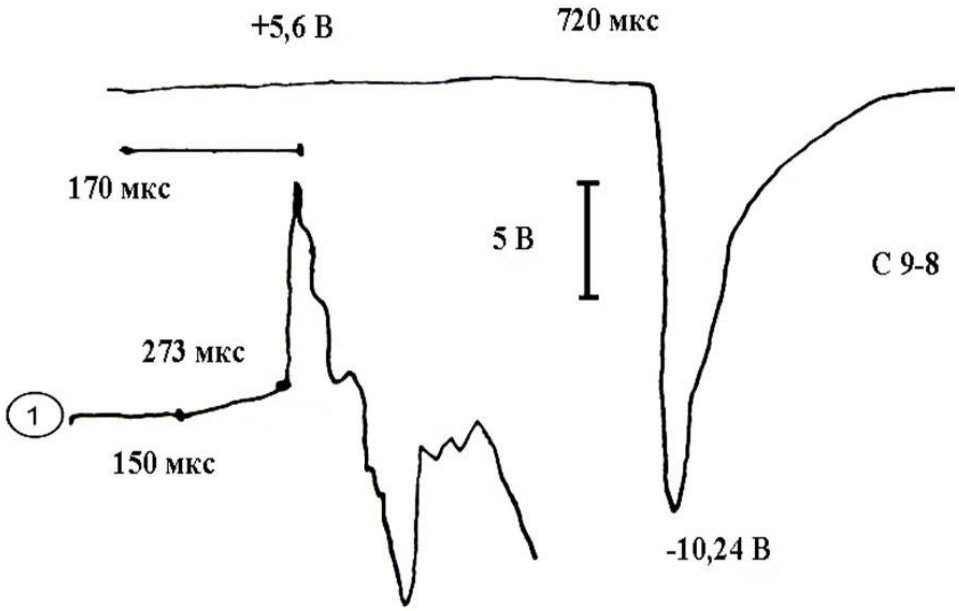


Рис. 3.23. Осцилограми від датчика 2 і датчика 3

Середня швидкість поширення детонаційного процесу від п’єзодатчика 1 до торця трубки з урахуванням переходу через потрійний розгалужувач буде дорівнювати:

$$V_{ср} = \frac{(35+20+500)10^{-3}}{(720-273)10^{-6}} = 1242м/с\ .$$

До цього треба додати, що процес детонації при переході через розгалужувач трохи вповільнюється.

На рис. 3.24 показано осцилограми для п’єзодатчиків 2 і 3, зняті з осцилографа С 9-16:

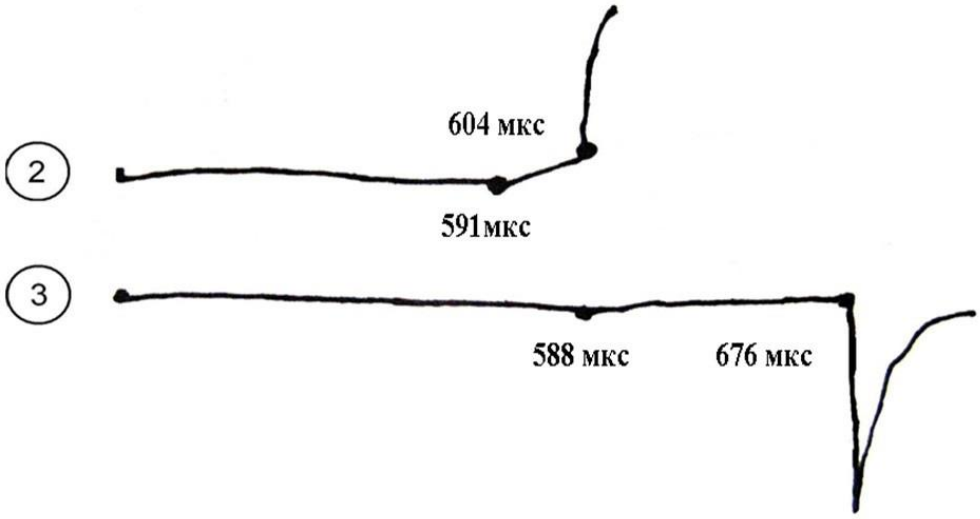


Рис. 3.24. Осцилограми з осцилографа С 9-16

Визначимо середню швидкість передачі процесу детонації через потрійний розгалужувач на ділянці між датчиками 1 і 2.

$$V_{ср} = \frac{(35+20+350)10^{-3}\,м}{(604-273)10^{6}\,с} = 1225 м/с.$$

Як видно з порівняння отриманих швидкостей, процес передачі формується одночасно в правій і лівій частині потрійного розгалужувача. Визначимо швидкість поширення збурювань на ділянці між датчиками 2 і 3:

$$V_{ср} = \frac{130.10^{-3}\,м}{(676-604)10^{-6}\,с} = 1805 м/с.$$

Отже видно, що процес детонації передався як у лівий, так і в правий відрізок хвилеводу через розгалужувач, що підтверджується швидкістю детонації 1805 м/с між 2 і 3 датчиками.

Привертає увагу явище, що спостерігається в роботі п’єзокерамічних датчиків, за допомогою яких фіксується час приходу детонаційної хвилі в точку наклеювання датчика. Практично у всіх випадках перед зривом сигналу від п’єзодатчика, що співпадає з приходом фронту детонаційної хвилі в точку наклеювання датчика, спостерігається певний рух трубки хвилеводу, що зафіксовано на рис. 3.26 датчиком 1 у період часу 150–273 мкс. На рис. 3.27 це

явище для 2-го датчика спостерігається на інтервалі 591–604 мкс, для 3-го датчика – в інтервалі 588-676 мкс. Можливо, це є проявом культиваційної дії диспергуючих хвиль, що передбачалося раніше на основі теоретичних рішень дисперсійного рівняння.

Оскільки деформація трубки хвилеводу, на яку реагує п’єзокерамічний датчик, спричинена внутрішнім динамічним навантаженням, що рухається попереду детонаційного фронту, було вирішено перевірити це явище експериментально. Для цього на правому торці хвилеводу, що виходить із потрійного розгалужувача, було встановлено п’єзокерамічний датчик 2 таким чином, як і датчик тиску 1, тобто із зазором від торця трубки на товщину леза (рис. 3.25).

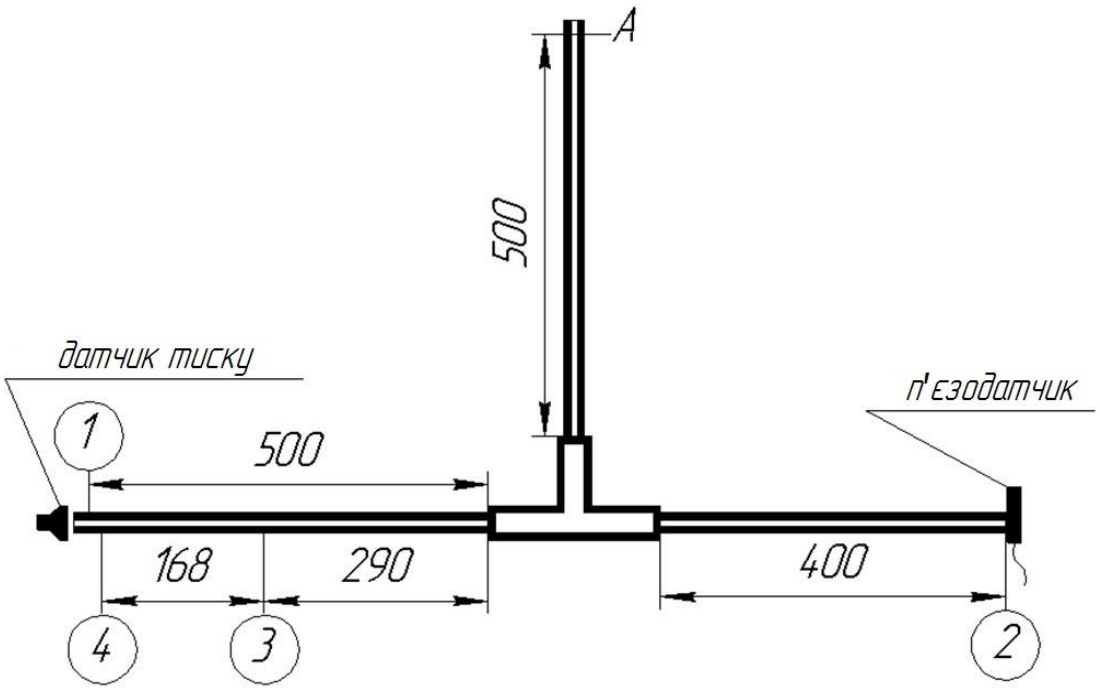


Рис. 3.25. Схема розташування датчиків при вимірюванні тиску на торці хвилеводу

Показники датчиків 1 і 2 виводилися на осцилограф С 9-8 і їхні показники зареєстровані на осцилограмах (рис. 3.29). У піку хвилі тиску датчик тиску 2 зареєстрував тиск P = 5,4 МПа, водночас тиск у хвилі падає в «е» раз за 34 мкс.

Показники п’єзокерамічного датчика 2 підтвердили наявність певного провісника перед фронтом детонаційної хвилі, прихід якого позначено зривом у точці 558 мкс, а початок дії провісника фіксується до моменту 233 мкс (рис. 3.26).

Швидкість детонаційної хвилі перед датчиком тиску 1 вимірювалася за допомогою п’єзодатчиків 3 і 4 і становила 1700 м/с. Провісник у точці наклеювання датчика 3 діяв на інтервалі часу 549–560 мкс, а в точці 4 – на інтервалі 604–659 мкс (рис. 3.27).

Як видно з аналізу експериментальних даних, при передачі детонації через потрійний розгалужувач необхідний час порядку 125 мкс для розгону й формування детонаційних хвиль у рукавах потрійного розгалужувача даних параметрів.

На практиці до одного сполучного блоку приєднується не більше трьох свердловинних і одного магістрального хвилеводів, тому було також випробувано інші типи блоків. До цих блоків можна приєднувати 5 відрізків хвилеводу, один із яких повинен передавати детонацію одразу чотирьом. Комутаційні блоки виготовлялися з таких матеріалів, як гума, мідь, алюміній, сталь, оргскло, ударостійкий полістирол, фторопласт і ПВХ.

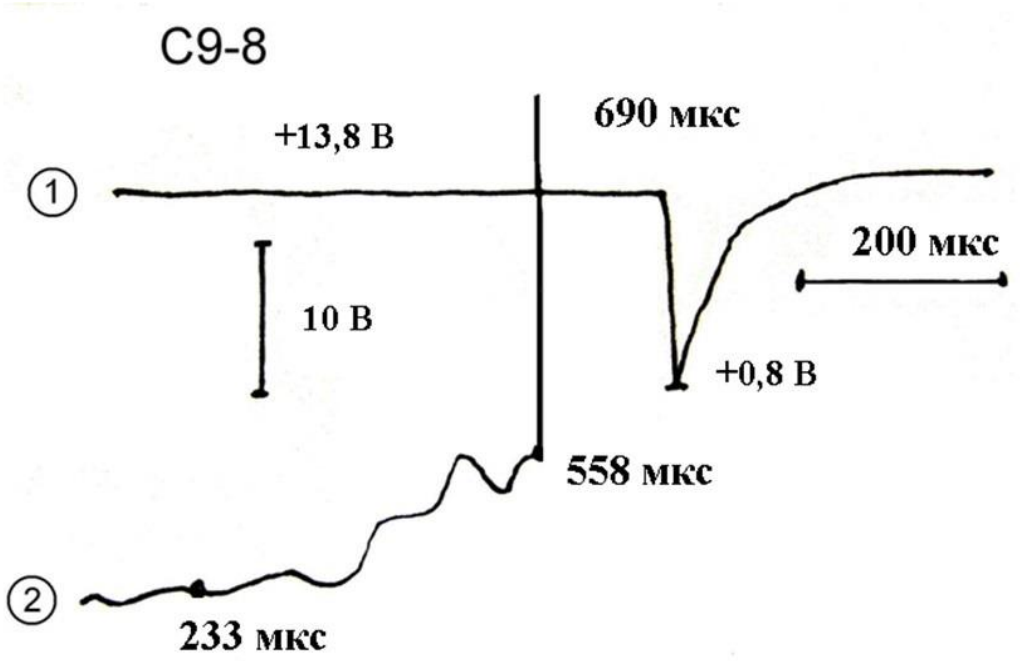


Рис. 3.26. Вид провісника на осцилограмі датчиків 1–2

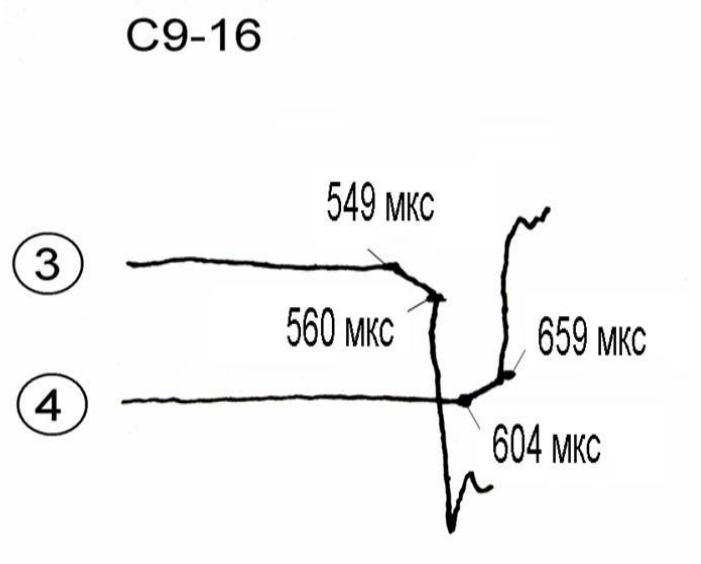


Рис. 3.27. Осцилограми датчиків 3–4

Результати експериментів були позитивними у всіх випадках. Також у ході експериментів було встановлено, що чим більше відрізків хвилеводу необхідно ініціювати, тим меншою повинна бути відстань торців ініційованих відрізків хвилеводу від торця ініціюючого.

Висновки до розділу 3

Застосована комплексна методика експериментальних досліджень основних експлуатаційних характеристик трубчастого детонуючого хвилеводу забезпечує достатній ступінь точності (помилка не більше 5 %) і може бути основою для подальших досліджень щодо створення надійних і безпечних засобів ініціювання промислових зарядів.

Встановлено механізм розвитку й загасання фронту ударної хвилі в матеріалі оболонки хвилеводу без напиленої ВР і формування детонаційного процесу по довжині хвилеводу з напиленим шаром ВР. Зафіксовано моменти його зародження й наростання швидкості детонації до максимуму на ділянці довжиною 0,5 м (зона розгону) з підтримкою її на постійному рівні по всій довжині в межах значень (для досліджуваних зразків) близько 1000 м/с. На виході ударної хвилі з

торця хвилеводу пік тиску на фронті становить ~ 3,26 МПа при часі наростання 1–2 мкс та часі спадання тиску 150 мкс.

Використані в експериментах тензорезистори з базою в 1 мм, наклеєні на зовнішню поверхню хвилеводу, реєструють окружні деформації оболонки хвилеводу в часі з помилкою, що не перевищує 5 %. Зареєстровані сигнали тензорезистора на фіксованій відстані від початкового торця трубки дозволяють отримати часові й амплітудні параметри процесу деформування в ударному й детонаційному режимах з гарантованою можливістю розрізняти момент і процес проходження по трубці ударної хвилі від електровибуху й детонаційної хвилі від вибуху пилоповітряної вибухової суміші в каналі хвилеводу.

Детальні дослідження варіанта вітчизняного хвилеводу виявили низку важливих закономірностей і умов розвитку й передачі детонаційного процесу в системі комутованих хвилеводів. Постійна швидкість переміщення сигналу або фронту детонації близько 1800 м/с встановлюється у хвилеводі на відрізку 0,5 м, водночас на осцилограмах явно простежується певний слабкий сигнал, що на нашу думку є наслідком дії диспергуючих хвиль типу пружного провісника, передбаченого теоретично. Зривання сигналу на осцилограмі чітко фіксує момент початку процесу навантаження, а пікове значення сигналу досягається, як правило, протягом 2 мкс.

Проведено оцінку способів отримання сферичного октогену із застосуванням ультразвуку та способом гідромеханічного окатування на прикладі штатного продукту. Визначено, що спосіб гідромеханічного окатування в вихровому пристрої більш ефективний і менш енерговитратний, ніж спосіб із застосуванням ультразвуку.

За результатами пророблених експериментів проведена оцінка значення фактора кола штатного октогену до та після сфероїдизації у водному розчині ДМСО, побудовано залежність змісту фракції менше 50 мкм від часу за його гідромеханічному окатуванні.

На підставі результатів, отриманих при гідромеханічному окатуванні штатного октогену у водному розчині ДМСО, проведено експерименти з

сфероїдизації октогену, який було отримано шляхом вилучення з ПМ ТРП. Отримано сфероїдизований модифікований НМХ із заданими характеристиками (густина – 1,89 г/см^3, форма кристалів близька до сферичної), який можливо застосовувати для виготовлення високоенергетичних композиційних складів.

Під час дослідження процесу передачі детонації в системі хвилеводів через недетонуючий потрійний розгалужувач встановлено, що процес детонації формується одночасно в правій і лівій частинах розгалужувача, трохи вповільнюючись на розгалужувачі (до ~ 1200 м/с), і далі у відгалуженнях швидкість процесу встановлюється на середньому рівні ~ 1800 м/с. У ході експериментів установлено, що при виготовленні комутаційних блоків – розгалужувачів з різних матеріалів (гуми, міді, сталі, алюмінію, оргскла, полістиролу, ПХВ і фторопласту), вітчизняний хвилевід стабільно передає детонацію через незаповнений ВР відрізок порожнини сполучного пристрою на відстань не більше 150 мм.

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

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

РОЗДІЛ 4. ВДОСКОНАЛЕННЯ СУМІШЕВОГО СКЛАДУ І КОНСТРУКЦІЇ ПРОМІЖНОГО ДЕТОНАТОРА (БОЙОВИКА) МІСЦЕВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ

4.1 Добір компонентів сумішей для виготовлення бойовика на місці виконання робіт

На сьогодні для ініціювання свердловинних зарядів застосовують проміжні детонатори (ПД) зосередженої циліндричної або прямокутної форми на основі тротилу, наприклад шашки Т-400Г зі швидкістю детонації 6,9 км/с [126]. Такі ПД виготовляють шляхом пресування тротилу у прес-формах. Їх працездатність залежить від густини, що досягається умовами пресування. Під час спрацьовування циліндричного зосередженого заряду силові лінії детонаційної хвилі (ДХВ) поширюються по нормалі до бічної твірної і вздовж осі заряду. Зусилля ДХВ вздовж осі заряду ПД мало для виходу свердловинного заряду на стаціонарний режим детонації у безпосередній близькості від ініціатора. У такому випадку фронт детонаційної хвилі встановлюється у свердловинному заряді зі швидкістю детонації, характерною для зазначеного заряду, з відривом двох–чотирьох діаметрів заряду [127].

З розробкою нових вибухових складів, наприклад, емульсійних ВР зі швидкістю детонації 5,1 км/с, почали виготовляти потужніші проміжні детонатори, наприклад, тротил-гексогенові ТГ-500, ТГФ-500Е, тротил-пентолітові ПТН та ін [126]. Поліпшення характеристик ПД проводили за рахунок збільшення потужності застосовуваних сумішей, тобто, переходу від тротилу до гексогену, ТЕНу та збільшення їх маси. Потужність застосовуваних проміжних детонаторів вища від потужності ініційованого свердловинного заряду, тобто ініціювання свердловинних зарядів відбувається у режимі перестисненої детонації. Для підвищення ефективності підривання найпростіших вибухових речовин запропоновано використовувати більш потужні лінійні проміжні детонатори, що містять 100–200 г ВР на один лінійний метр ПД [127].

Лінійний ініціатор має довжину, що дорівнює довжині основного заряду, водночас фронт детонаційної хвилі спрямований радіально до стінок

свердловини. Тиск детонаційної хвилі на стінки свердловини буде значно більшим, ніж за точкового ініціювання. Якщо при точковому ініціюванні заряду тиск продуктів детонації визначається лише щільністю ВР і його швидкістю детонації D, за формулою 4.1:

$$P = f(\rho D^2), \quad (4.1)$$

то при лінійному ініціюванні тиск залежить не лише від параметрів основного заряду ρ і D, а й від швидкості детонації лінійного ініціатора D_i та від кута відбиття детонаційної хвилі від стінок свердловини. Однак, застосування лінійних ініціаторів обмежується як технічними, так і економічними умовами.

В даний час практично відсутні роботи з впливу конструкції проміжних детонаторів на ініціюючу здатність свердловинних зарядів та дослідження можливості створення ПД з сумішей із невисокою детонаційною здатністю. До таких сумішевих композицій насамперед зароховуємо вихідні матеріали, які окремо не є вибуховими речовинами, що відкриє можливості безпечного виготовлення бойовиків на місці виконання робіт. Нижче наводяться пропоновані компоненти сумішевих складів.

Метою вивчення є дослідження вибухової суміші на основі пероксиду водню, що складається з гліцерину як палива та пероксиду водню як окислювача в присутності додаткових окислювачів та сенсибілізуючої домішки. Зразки досліджувалися за допомогою візуальної мікроскопії, та термічного аналізу. Наведені результати свідчать про суттєвий вплив вибору допоміжного окислювача і сенсибілізатора у складі вибухових речовин на процеси термічного розкладу. Встановлено, що використання як додаткового окислювача нітрату кальцію, який за умов зберігання довше підтримує поріг збереження здатності до детонації, має негативний вплив на якісні характеристики суміші як вибухової речовини. Термічні ефекти, що супроводжують хімічну взаємодію, набагато менші порівняно з сумішами, що містять у якості додаткового окислювача нітрати калію та натрію.

Ще один важливий висновок полягає в тому, що скляні мікросфери у якості сенсибілізуючого агента мають значний вплив на процеси термічного розкладу

досліджуваних зразків вибухових сумішей за винятком суміші з використанням нітрату кальцію.

У виробництві сучасних вибухових речовин сьогодні все актуальнішим стає питання зменшення екологічного навантаження від їх використання. Це стосується промислових вибухових речовин, які повсякчасно використовуються у таких напрямках, як гірничо-видобувна промисловість [126], цивільне будівництво [126], зміна рельєфу, запобігання лавинної небезпеки [127].

Практично всі вибухові речовини, які використовуються сьогодні, містять нітросполуки. І хоча вони досі широко використовуються, все більше уваги приділяється суттєвим недолікам, які мають більшість з них. Зокрема:

– виробництво більшості вибухових речовин базується на використанні високоенергоємних процесів, що часто супроводжуються додатковими викидами шкідливих речовин; [128];

– традиційні вибухові речовини виділяють шкідливі гази та тверді частинки в навколишнє середовище під час детонації, спричияючи забруднення повітря та води [130];

– часте неспрацьовування вибухового пристрою призводить до загрози життю людей, що з ними працюють, та до додаткового забруднення шкідливими речовинами [131];

– традиційні вибухові речовини, які використовуються в гірництві, дуже чутливі до ударів і тепла, що робить їх потенційно небезпечними для транспортування і використання [131];

– можливість крадіжки та подальшого неправомірного використання через збереження здатності до детонації протягом довгого часу [132].

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є впровадження емульсійних вибухових речовин [133], які не містять ефірів азотної кислоти або нітросполук. Однак енергетичні характеристики більшості таких сполук відносно слабші, ніж у традиційних вибухових речовин. Крім того, емульсійні вибухові речовини так само довго зберігають здатність до детонації, тому можуть бути використані зі злочинною метою.

Перспективним напрямком в цій галузі є розробка вибухових речовин на основі концентрованих розчинів пероксиду водню. Особливі властивості концентрованих розчинів пероксиду водню почали використовуватися ще в роки Другої світової війни. Тоді ж було відкрито детонаційні властивості концентрованих розчинів перекису водню [135].

Незабаром після Другої світової війни прості формули концентрованого перекису водню, змішаного з гліцерином, були додатково досліджені Шенлі [136]. Хоча Шенлі не надав багато даних (враховуючи відсутність швидкості детонації), ця концепція була досліджена пізніше, і в 60-х роках з’явилися перші патенти (посилання). Результатом цієї ранньої роботи Шенлі стало визначення діапазонів детонації сумішей перекису водню/гліцерину/води.

Перший патент на бризантну вибухову речовину пероксид водню/гліцерин видано у 1948 році в США [137]. Відповідно до патенту, суміш перекису водню, води і гліцерину, змішана для отримання однофазної рідкої системи, при кімнатній температурі була відносно стабільною та не реагувала. Кінцевий продукт за умови, що вміст води підтримувався нижче 52 мас. % і кількість перекису водню була достатньою для окислення гліцерину під час детонації, був вибуховою речовиною, стійкою до ініціювання механічним ударом, але міг би детонувати за ініціювання стандартним капсулем.

На сьогодні розробка вибухових речовин для гірничої справи на основі суміші перекису водню та гліцерину знову набуває актуальності. Основними причинами є:

- безпека. Традиційні вибухові речовини, які використовуються в гірничій справі, дуже чутливі до ударів і тепла, що робить їх потенційно небезпечними для використання та транспортування. Вибухові речовини на основі перекису водню можуть запропонувати підвищену безпеку, оскільки вони менш чутливі до випадкового займання або детонації;

- вплив на навколишнє середовище. Традиційні вибухові речовини виділяють шкідливі гази та тверді частки в навколишнє середовище під час детонації, сприяючи забрудненню повітря та води. Суміші на основі перекису

водню мають потенціал бути більш екологічними, оскільки вони виробляють менше шкідливих побічних продуктів під час детонації;

- можливість налаштування. Склад вибухових речовин на основі перекису водню можна адаптувати відповідно до конкретних вимог гірничої справи. Регулюючи концентрацію компонентів, можна контролювати потужність, швидкість та інші характеристики вибухової речовини;

- зниження витрат на транспортування: вибухові суміші можна виготовляти на місці, зменшуючи потребу в транспортуванні дуже чутливих і небезпечних вибухових речовин на великі відстані. Це може призвести до економії коштів і підвищення безпеки;

- короткий термін придатності. Короткий термін придатності та нестабільність цих вибухових речовин означає, що їх нелегко зберігати протягом тривалого часу. Це зменшує ризик потрапляння цих вибухівок у чужі руки, оскільки їх необхідно готувати безпосередньо перед використанням. Це також обмежує потенціал для тривалого зберігання терористами;

- спеціальні знання та обладнання. Підготовка та поводження з цими вибуховими речовинами зазвичай вимагає спеціальних знань, обладнання та контрольованих умов. Це ускладнює можливість окремим особам або групам з негативними намірами отримати або створити їх, не привертаючи уваги.

З огляду на вказане вище подальші дослідження та розробки в цій галузі можуть призвести до інновацій у вибухонебезпечних технологіях, що призведе до безпечніших, ефективніших і екологічніших методів видобутку.

Новітні роботи щодо вибухових речовин на основі перекису водню включають у свої рецептури крім основних компонентів, таких як перекис водню та гліцерин, – допоміжні окислювачі та загущувачі. Ця модифікація вибухових речовин на основі перекису водню була названа «зеленими» вибуховими речовинами [138].

У роботі [139] було досліджено зміни концентрації пероксиду водню з часом у серії композицій, використовуючи кілька допоміжних окислювачів – двох сортів нітрату амонію, нітрату калію, нітрату натрію та нітрату кальцію та

зв’язуючих – гуарової камеді, камеді бобів ріжкового дерева, гідроксиетилцелюлози та гуміарабіку. Також до складу сумішей вводили скляні або полімерні мікросфери у якості сенсибілізатора. Основна мета цього вибору полягала в тому, щоб дати уявлення про те, як деякі з загальних компонентів, що використовуються при розробці композицій, впливають на динаміку розкладання перекису водню. Наведені результати свідчать про суттєвий вплив вибору допоміжного окислювача, сполучної речовини і типу сенсибілізатора на динаміку розкладання пероксиду водню у складі вибухових речовин.

Ключовий вплив на розкладання пероксиду водню має вибір допоміжного окислювача. В такому випадку спостерігаються значні відмінності процесу розкладання залежно від катіону допоміжного окислювача. Водночас суміші, що використовують нітрат кальцію, демонструють найповільніше розкладання ПВТ. Ймовірно аналогічний вплив матимуть ці окислювачі й на процес детонації. І в такому випадку повільне розкладання суміші, що містить нітрат кальцію, може мати негативний вплив на вибухову здатність суміші.

Метою роботи є дослідження процесу термічного розкладання вибухових сумішей на основі пероксиду водню з використанням менш активних порівняно з нітратом амонію додаткових окислювачів, а саме нітрату кальцію, нітрату калію та нітрату натрію. За результатами попередніх досліджень як згущувач було обрано гуарову камедь, суміш з якою, ймовірно, матиме оптимальний склад з точки зору енергетичних властивостей. Зокрема, вивчався вплив на процес термічного розкладу сенсибілізуючої домішки – скляних мікросфер, які в попередніх дослідах показали значний вплив на процеси розкладу.

Використання сенсибілізуючих домішок у вибухові речовини було обґрунтовано ще у 50-х роках.

Приблизно в 1952 році Ф. П. Боуден і А. Йоффе досить детально описали теорію локалізованих центрів ініціації детонації як частини процесу детонації [140].

Згідно з їх думкою, гіпотеза про локальне нагрівання, яке виникає в хімічних вибухових речовинах під впливом прикладеної енергії, пояснює

спричинення хімічних речовин до вибуху або детонації. Ці локальні зони нагрівання називаються по-різному: «вогнищами», енергетичними епіцентрами, гарячими точками тощо. Оскільки поширеність цих теплових центрів зростає у вибуховій речовині, загальним ефектом є посилення реакції до можливого вибуху. Збільшення потенціалу теплових центрів відображається як збільшення чутливості до детонації для такої вибухової речовини.

Нагрівання від тертя може бути спричинене контактом часток, що рухаються від удару, провокуючи потік рідкої вибухової речовини. Прикладами домішок, які вважаються корисними для цього механізму, є карборундовий пісок і подібні матеріали, які мають температуру плавлення значно вище (приблизно 400 °C) і мають низьку теплопровідність. Одна з версій цієї теорії полягає в тому, що тертя під час нагрівання зосереджено на нерівних точках неправильної поверхні сторонніх часток у достатньо значний спосіб, щоб спричинити локальне розкладання від реакції, ініційованої теплом, водночас спричиняючи локальні ударні хвилі, що так само заохочує додавання тертя і так далі до вибуху всієї рідини.

Подібним чином адіабатичне нагрівання, спричинене стисненням крихітних бульбашок газу, провокує реакції термічного розкладання, які ініціюють ударні хвилі, стискаючи подальші бульбашки газу і так далі до повного вибуху.

У багатьох роботах було показано, що скляні мікрокульки, пісок карбіду кремнію, а також мікросфери смоли можуть підвищити чутливість до детонації більшості вибухових речовин. Мікросфери та інші неоднорідності регулярно додаються до багатьох суспензійних вибухових речовин, які наразі регулярно використовуються, щоб налаштувати їхню чутливість до бажаного рівня, зазвичай достатньо високого для відносної легкості ініціювання.

Численні комплекти змішування хімічних речовин із двох або більше частин і системи для сенсибілізації описані як у літературі, так і в патентах [141–143]. Скляні мікросфери використовуються як інертний сенсибілізуючий агент для більшості вибухових речовин [144], зокрема для сумішей на основі пероксиду водню [145].

Зразки вибухових сумішей були сумішшю пероксиду водню та гліцерину, до якої вводили у якості додаткових окислювачів нітрат кальцію, нітрат калію та нітрат натрію. Як згущувач використано гуарову камедь. Зразки готувалися з додаванням сенсибілізуючої домішки – скляних мікросфер, та без них. Скляні мікросфери типу К015 – це порожнисті скляні кульки з типовою щільністю 0,15 г/см^3 та ізостатичною міцністю на роздавлювання 300 psi.

Речовини, що застосовувалися, наведено в таблиці 4.1.

У процесі підготовки зразків сумішей спочатку допоміжний окислювач (нітрат натрію, нітрат калію або нітрат кальцію тетрагідрат) попередньо змішували з перекисом водню за допомогою механічного змішувача з інертного матеріалу зі швидкістю 200 об/хв за кімнатної температури до повного розчинення нітрату. Далі швидкість перемішування зменшували до 100 об/хв та додавали гліцерин і гуарову камедь з наступним 10-хвилинним циклом змішування та гомогенізації. Для підготування зразків використовувалося обладнання з полімерних матеріалів, щоб уникнути каталітичного впливу металів, а також домішок, які може містити скляний посуд. Таким чином, майже будь-який вид забруднення може збільшити швидкість розкладання перекису водню і в деяких екстремальних ситуаціях може спричинити детонаційну подію. Потім додавали скляні мікросфери та обережно перемішували, щоб мінімізувати руйнування мікросфер [239]. Варто зазначити, що скляні мікросфери (MS), навіть до приготування вибухової композицій, містили фракцію розбитих мікросфер, що можна побачити на рис. 5.

Таблиця 4.1. Використані матеріали

Назва (хімічний код)	Ступінь очищення	Виробник
Нітрат натрію (SN)	>99 %	POCH S.A (Gliwice, Poland)
Нітрат калію (PN)	>99 %	POCH S.A (Gliwice, Poland)
Нітрат кальцію тетрагідрат (CN)	>99 %	POCH S.A (Gliwice, Poland)
Перекис водню 60 wt. % розчин (HTP)	analytical	
Гліцерин (Gl)	>99,5 %	TechlandLab (Tarnobrzeg. Poland)
Гуаргам S.C.-406 (GG)	>99 %	Meyhall Chemical AG (Kreuzlingen, Germany)
Скляні мікросфери типу K-015 (MS)	n/a	3M (Saint Paul, MN, USA)

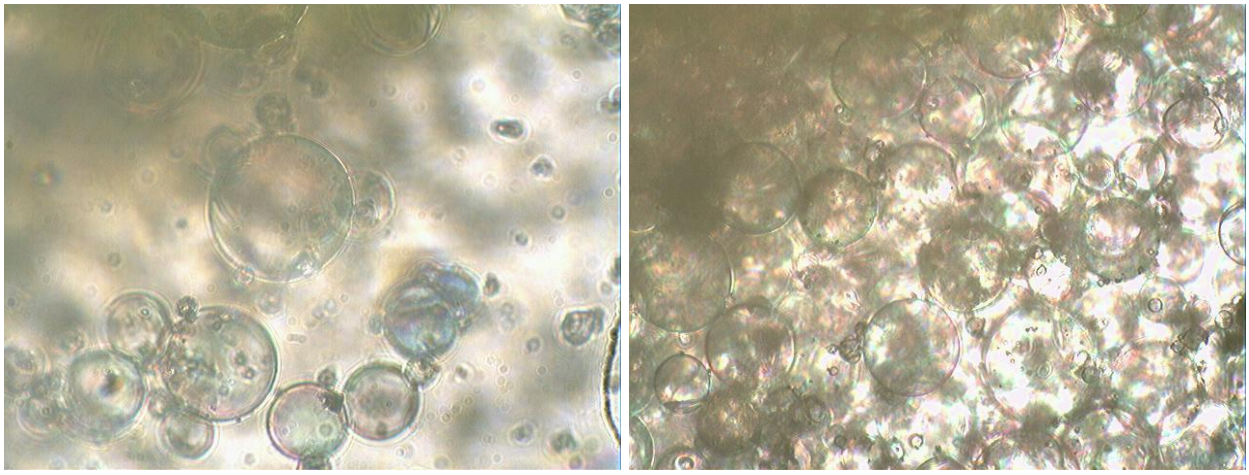


Рис. 4.1. Зразки скляних мікросфер type K-015 (MS). Мікроскоп Ulab XSP-146T, цифрова камера Sigeta UCMOS 3100 3,1 МПікс. Використовується об’єктив - 20×.

Зразки тримали за постійної температури в темних умовах і завантажували в ідентичні посудини з інертного матеріалу. Приготування проби тривало 5 хвилин. Тобто термогравіметричне дослідження починалося через 5 хвилин після приготування зразка суміші. Відібрані з отриманих зразків проби масою 0,2 г вміщували у тигель та досліджували процес термічного розкладання з використанням дериватографа, попередньо виведеного на робочий режим.

Рецептури досліджуваних зразків наведено в табл. 4.2

Таблиця 4.2. Склади досліджуваних у роботі зразків, наведені у мас. %.

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

Склад

[а] Склад кожної рецептури є сумою часток компонентів, перерахованих у відповідній колонці.

[б] Мікросфери додано понад 100 %.

4.2 Термогравіметричні дослідження вибухових сумішей

Як було визначено у попередньому дослідженні [253], порівняно зі зразками з використанням полімерних мікросфер, скляні мікросфери помітно прискорюють розклад перекису водню. Помітне збільшення швидкості розкладання пероксиду водню зі скляними мікросферами може бути пов’язане з руйнуванням скляних мікросфер, що призводить до утворення пористих фрагментів, на яких може адсорбуватися перекис водню [239].

Дані термічного розкладу складів 1A та 1B (з нітратом натрію в якості додаткового окислювача та з мікросферами у 1B) отримані методом термогравіметричного аналізу (ТГА, DTA та TG) при швидкості нагрівання 10 °C/хв, наведено на рис. 4.2.

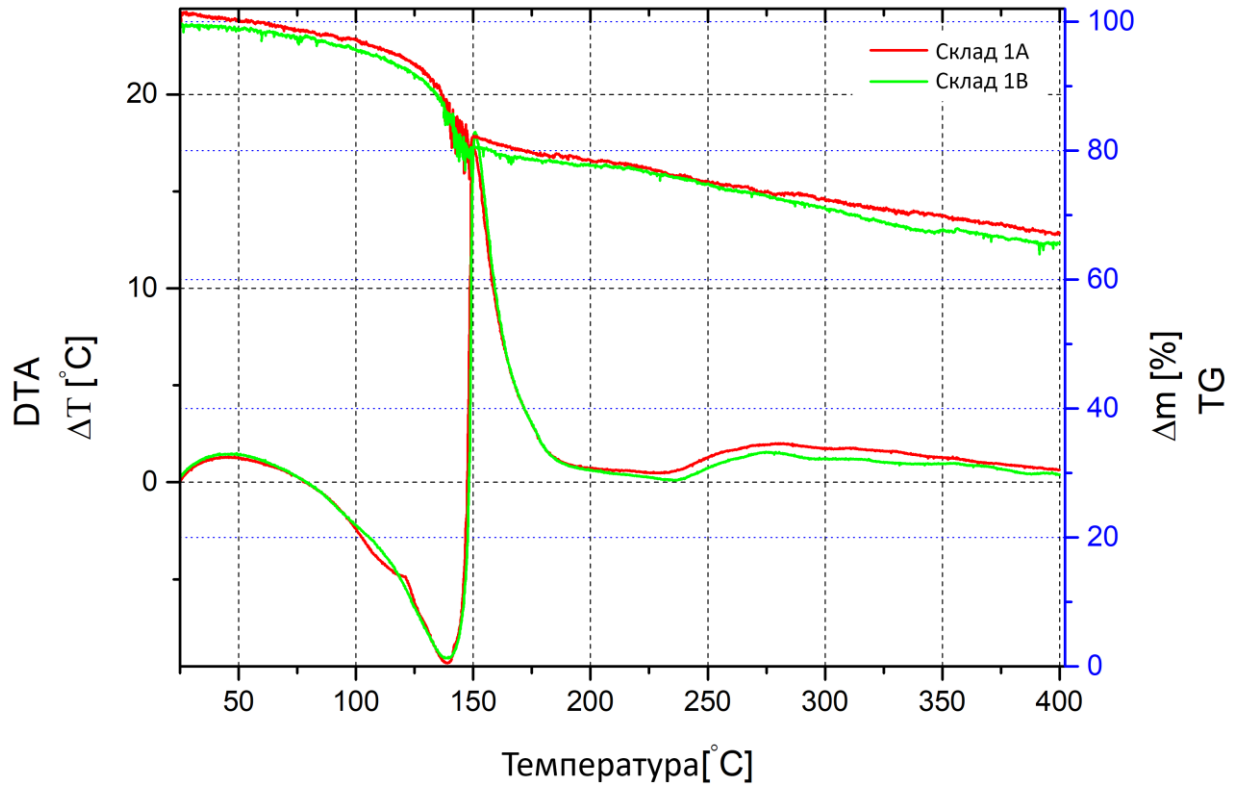


Рис. 4.2. Порівняльна термограма розкладання складу 1А та 1В

Згідно з даними рис. 4.2 для складу 1А в діапазоні 20–80 °С спостерігається слабкий екзотермічний ефект, що супроводжується незначною втратою маси зразка. Після 80 °С реакція переходить в ендотермічну, а втрата маси збільшується, що, ймовірно, пов’язано з випаровуванням води з суміші. За понад 120 °С відбувається активна втрата маси, що супроводжується ендотермічним ефектом до -9,3 °С, максимум якого відповідає 140 °С. Втрата маси за цієї температури становить 15 %. Подальший термічний розклад супроводжується швидким виділенням тепла (горінням, що переходить у детонацію). Пік екзотермічного ефекту відповідає температурі 150,3 °С і становить 17,25 °С. Втрата маси на цьому етапі становить 19,3 %. Великий екзотермічний ефект вірогідно супроводжує хімічну взаємодію пероксиду водню з гліцерином. Подальша втрата маси уповільнюється і зумовлена швидше за все догорянням складових суміші. Повна втрата маси до температури 400 °С становить 34,3 %.

Термогравіметричний аналіз зразка суміші 1В з використанням нітрату кальцію без додавання скляних мікросфер демонструє практично аналогічну

картину, яка відрізняється лише згладжуванням малого екзоефекту за температури 122 °С.

Судячи з характеру реєстрованих термограм (нестійкий характер ліній), у всьому температурному діапазоні терморозклад супроводжувався масообмінними процесами з навколишнім середовищем. Коливання кривої втрати маси на обох термограмах можна пояснити процесами розкладу пероксиду водню на виділення бульбашок кисню та вуглекислого газу, що спричиняє різке коливання маси зразка.

Можна зробити висновок, що додавання скляних мікросфер не має помітного впливу на перебіги реакцій з використанням у якості окислювача нітрату кальцію. Це може бути пов’язано з утворенням на поверхні мікросфер тонкого шару малорозчинних сполук кальцію, що призводить до ізоляції скляної поверхні. З метою уточнення цього припущення проведено мікроскопічні дослідження сумішей з додаванням скляних мікросфер.

Інша картина спостерігається в процесі поступового нагрівання суміші, що має як додатковий окислювач нітрат калію. Наведемо графічні результати термогравіметричних досліджень суміші перекису водню, гліцерину та нітрату калію без додавання 2А та з додаванням мікросфер 2В (рис. 4.3).

Аналогічно попередньому у складі 2А спочатку відбувається випаровування води і частковий розклад пероксиду водню, втрата маси починається від 80 °С. Це супроводжується на ТГА ендотермічним ефектом, максимум якого відповідає температурі 132 °С і досягає 5 °С. За цієї температури ймовірно починається основна реакція, яка супроводжується характерним екзотермічним ефектом, стрибок температури досягає 64,5 °С. Це відповідає температурі нагрівання 138,7 °С. Втрата маси на цей час становить 15 %. Загальний час реакції становить близько 2-х хвилин. Далі (вище 140 °С) маса зразків продовжує монотонно зменшуатися і до 400 °С втрата становить 21 % від вихідної маси зразків.

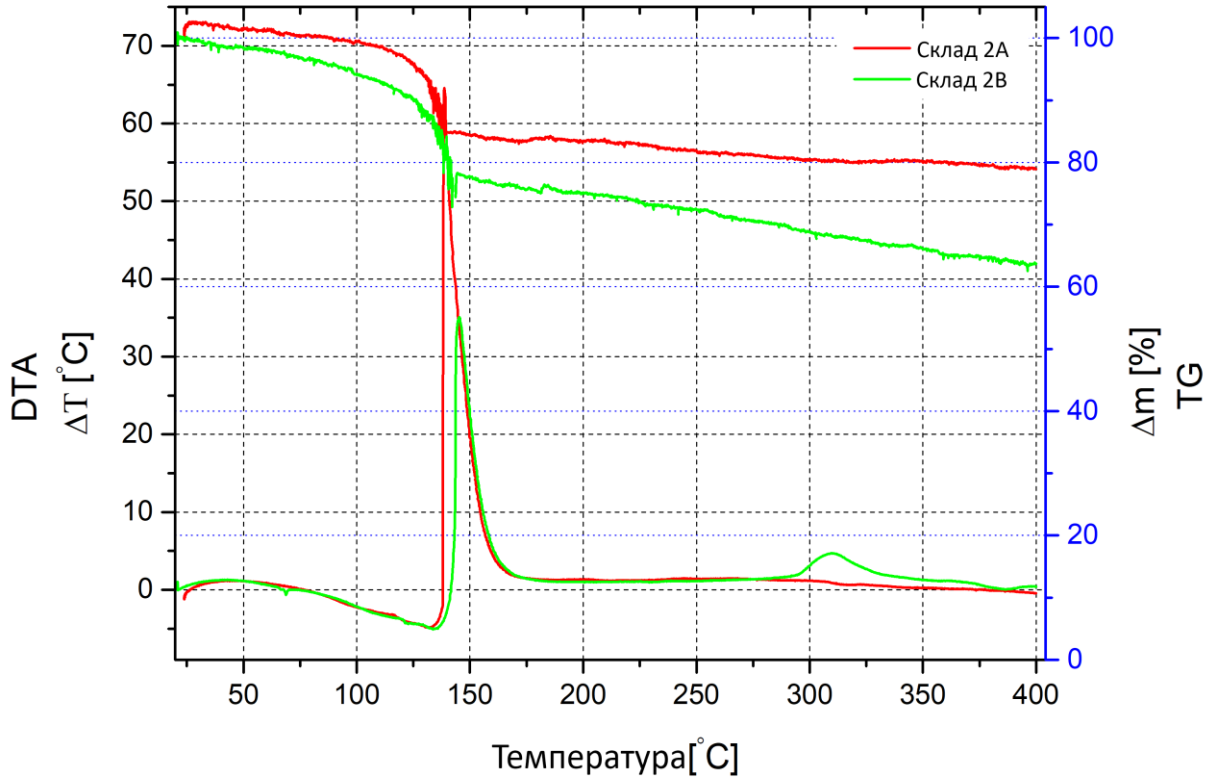


Рис. 4.3. Порівняльна термограма розкладання складу 2А та 2В

Термограма такої ж суміші без скляних мікросфер 2В має дещо інший вигляд. Втрата маси починається набагато раніше, але має більш пологий вигляд [239].

Пік ендотермічного ефекту, аналогічний суміші з мікросферами, має місце за температури 134 °С. Втрата маси на цей час становить 13,5 % і продовжує збільшуватися. За температури 140 °С, коли починається активне виділення теплоти, вона становить вже орієнтовно 23 %. Однак екзотермічний ефект, що супроводжує основну реакцію для суміші без мікросфер, набагато менший, ніж у попередньому досліді. Максимальне значення підвищення температури становить лише 35 °С. Речовини, що не прореагували, зумовлюють незначний екзотермічний ефект за температури 300–320 °С. Втрата маси після активної фази має рівномірний вид до 400 °С, де становить 36 %.

Термогравіметричне дослідження зразка суміші перекису водню з гліцерином, що містить у якості додаткового окислювача нітрат кальцію (рис. 4.4) без додавання 3А та у присутності скляних мікросфер 3В, демонструє вид, подібний до попередньої суміші з нітратом калію.

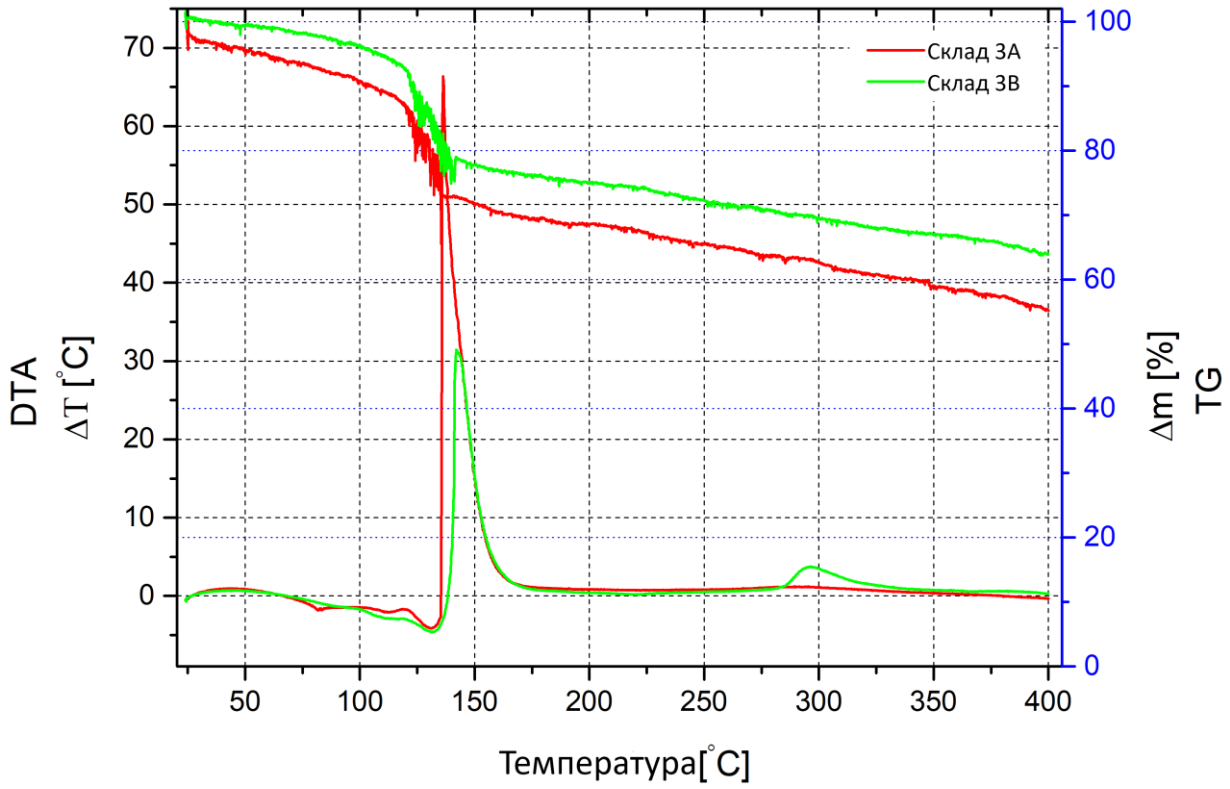


Рис. 4.4. Порівняльна термограма розкладання складу 3А та 3В

Втрата маси складу 3А починається з початком нагрівання, має пологий вид та супроводжується незначним ендотермічним ефектом за температури орієнтовно 80 °С. Після досягнення температури 100 °С реакція активізується. Максимальний ендотермічний ефект, що може свідчити про випаровування та початок розкладу пероксиду водню, спостерігається за температури 130 °С. Втрата маси на цьому етапі становить орієнтовно 21 %. Так само присутнє коливання кривої втрати маси, що вказує на активне виділення газу. Це створює механічний вплив на прилад. Після досягнення температури 135,5 °С починається активна реакція, що супроводжується великим екзотермічним ефектом, зміна температури досягає 66,3 °С за температури нагріву 136,2 °С. Втрата маси на цей момент становить орієнтовно 27 %. Подальше зниження маси набуває монотонного вигляду і за температури 400 °С набуває значення майже 45 %.

Та ж суміш без додавання мікросфер, склад 3В, на початку нагрівання показує аналогічні дані за винятком втрати маси, яка відбувається значно повільніше.

Активна втрата маси починається за температури 123 °С та супроводжується тими ж коливаннями кривої втрати маси. Екзотермічний ефект починається за температури 138,5 °С, але має набагато повільніший підйом температури і набуває максимального значення за температури нагрівання 142 °С. Пік екзотермічного ефекту становить 31,5 °С, що вдвічі менше за такий самий у присутності скляних мікросфер. Втрата маси на цей момент становить 21 %. Через неповне протікання хімічної взаємодії можна спостерігати ще один невеликий екзотермічний ефект з максимальним значенням до 3,5 °С, що відповідає температурі нагрівання 295 °С. Він не супроводжується коливаннями кривої втрати маси, яка після проходження основної реакції набуває монотонного вигляду та за температури 400 °С становить 36 %, що майже на 10 % менше такої ж у присутності мікросфер. Це можна пояснити уповільненням загальної швидкості термічного розкладу та збільшенням часу згоряння основних компонентів суміші.

З метою визначення особливостей перебігу реакцій у присутності в якості окислювача нітрату калію було проведено дослідження сумішей з використанням оптичного мікроскопу Ulab XSP-146T LED. Результати мікроскопічного дослідження суміші, що містить в якості додаткового окислювача нітрат калію з додаванням скляних мікросфер, наведено на рис. 4.5.

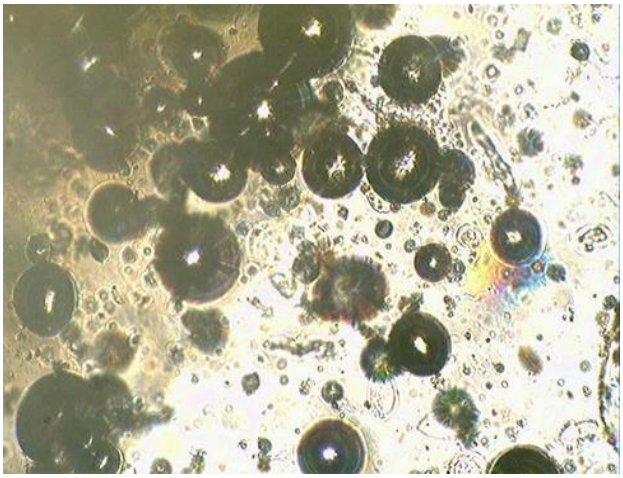


Рис. 4.5. Зразки суміші 2А KNO_3+MS. Мікроскоп Ulab XSP-146T, цифрова камера Sigeta UCMOS 3100 3,1 МПікс. Використовується об’єктив - 20×.

Можна спостерігати скляні мікросфери чіткої форми, на поверхні яких, ймовірно і відбувається основна реакція між гліцерином та пероксидом водню та нітратом кальцію, що сприяє високій швидкості взаємодії та великому екзотермічному ефекту [239].

На рис. 4.6 наведено результати мікроскопічного дослідження зразків суміші, що містить у якості додаткового окислювача нітрат кальцію, з додаванням скляних мікросфер.

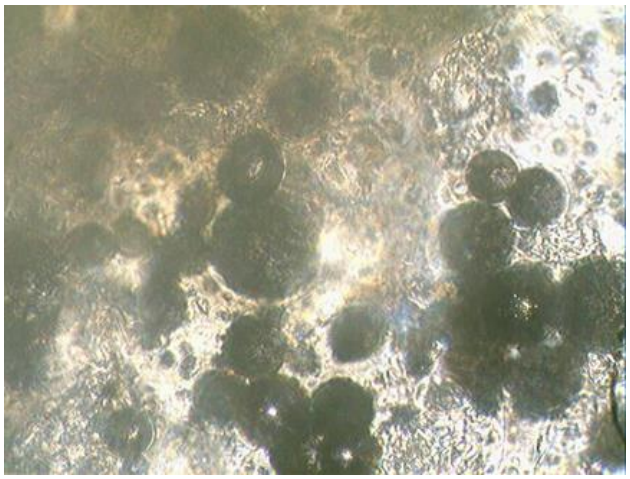


Рис. 4.6. Зразки суміші 1А $Ca(NO_3)_2$+MS. Мікроскоп Ulab XSP-146T, цифрова камера Sigeta UCMOS 3100 3,1 МПікс. Використовується об’єктив - 20×.

Як можна побачити на рис. 4.6, поверхня скляних мікросфер виглядає нерівномірною, вочевидь внаслідок адсорбції на поверхні малорозчинних сполук кальцію. Але, не зважаючи на більш розвинену поверхню взаємодії, швидкість реакції та екзотермічний ефект в цьому випадку набагато менші порівняно з сумішами, що містять нітрати калію та натрію як додаткові окислювачі.

Підсумовуючи дослідження можна зробити висновок, що наявність мікросфер у складах 2А та 3А підвищує енергетику хімічної реакції вибухового розкладання суміші. Але не факт, що навіть цієї енергетики може виявитися достатньо для використання суміші у якості саме проміжного детонатора місцевого приготування.

Для порівняння з композицією на основі перекису водню та гліцерину з додатками було розроблено альтернативну вибухову композицію на основі аміачної селітри та нітрометану.

Термогравіметричне дослідження зразка суміші аміачної селітри та нітрометану демонструє такий вигляд, рис. 4.7.

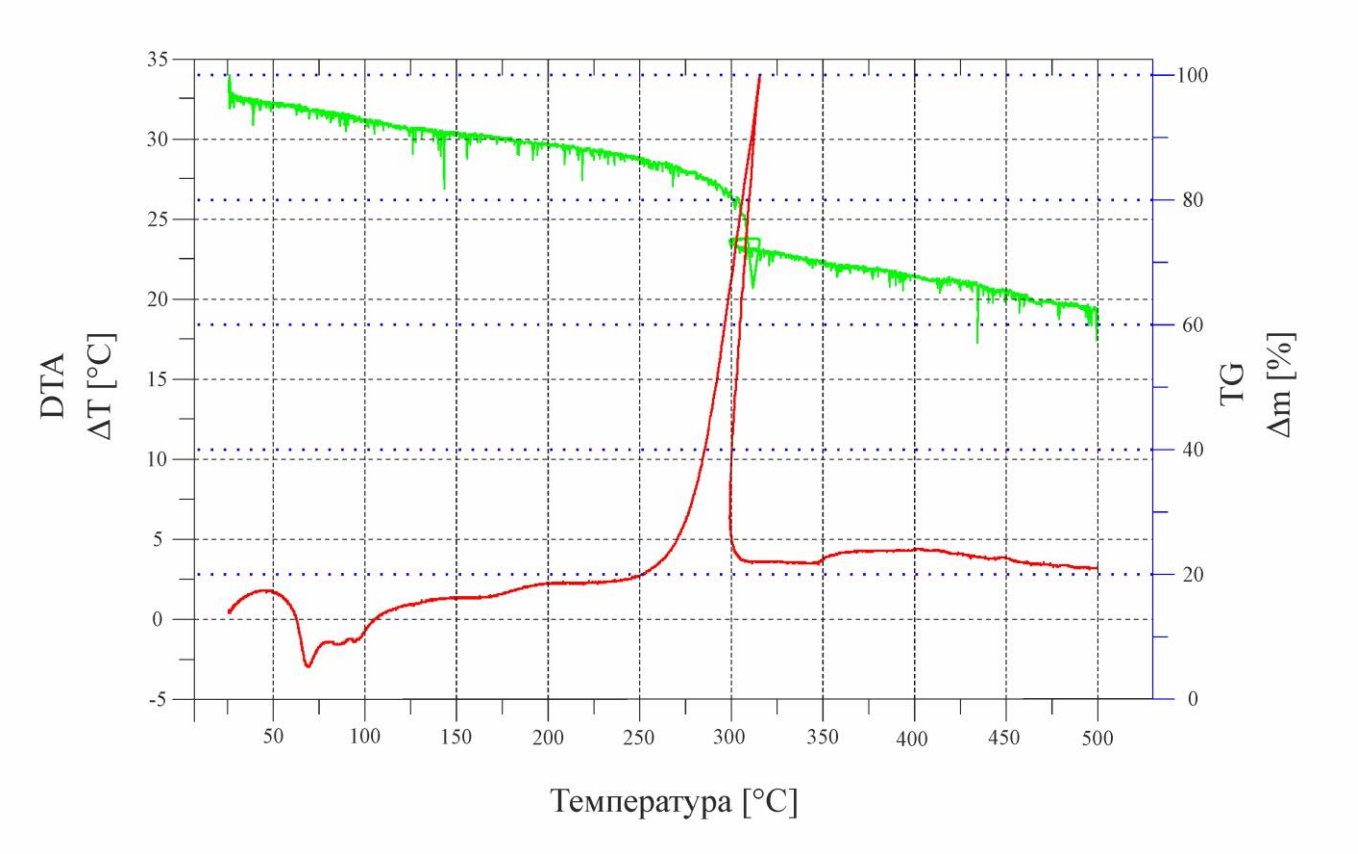


Рис. 4.7. Термограма розкладання суміші аміачної селітри та нітрометану 90:10.

Термодинамічні характеристики композицій на основі аміачної селітри та нітрометану наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Термодинамічні характеристики суміші аміачної селітри з нітрометаном

Найменування показників	Склад аміачна селітра: нітрометан, %		
	80:20	85:15	90:10
Кисневий баланс, %	+8,14	+11,10	+14,07
Теплота вибуху, ккал/кг	880	717	601
Об’єм газів, л/кг	949	958	963
Критичний діаметр детонації, мм	5-6	6-7	7-8
Швидкість детонації, км/с	3370	2985	2370

Термогравіметричні дослідження проводили за допомогою дериватографа Thermoscan-2 для зразків 200 мг, використовуючи швидкість нагрівання 10 °С/хв для всіх зразків. Випробування проводили у повітряному середовищі у всіх випадках. Технічні характеристики приладу Thermoscan-2 наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Технічні характеристики приладу Thermoscan-2

Температурний діапазон вимірювань	25–800 (1000) °С
Режим нагрівання	Дискретний, швидкість нагрівання: 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 20 град/хв
Ємності для зразків	Кварцові, об’ємом 0,5 $см^3$
Похибка визначення температури	±1 град
Точність визначення величини теплових ефектів	~3 Дж/г
Точність визначення зміни ваги зразка	0,02 г

Зміна тепловмісту речовини зі зміною температури реєструється на основі вимірювання різниці температур в досліджуваному зразку і в еталоні, у якому в досліджуваному інтервалі температур не відбувається перетворень. Зміна ваги зразка зі зміною температури визначається за допомогою електронної системи безперервного зважування.

Мікроскопічне дослідження проводили за допомогою мікроскопа Ulab XSP-146T LED, з освітленням за Келлером, який було оснащено цифровою відеокамерою Sigeta UCMOS 3100 3,1 МПікс. У стандартній комплектації мікроскоп призначений для проведення досліджень методом світлого поля в прохідному світлі. Дана модифікація мікроскопа має вбудоване нижнє світлодіодне підсвічування. Цифрова камера Sigeta UCMOS 3100 3,1 МПікс – окулярна цифрова камера для мікроскопа на 3 МПікс, спеціально призначена для передачі зображення досліджуваного об’єкта високого розрішення на комп’ютер.

Усі вимірювання проводилися в геометрії зворотного розсіювання з використанням об’єктива мікроскопа 20× із числовим значенням апертури 0,4, що в комбінації з комплектним окуляром і камерою WF10× дає збільшення 200×.

Результати досліджень демонструють значний вплив скляних мікросфер на процеси термічного розкладу досліджуваних вибухових композицій, зокрема на такі, що містять у якості додаткових окислювачів нітрати калію PN та натрію SN. Процес розкладу композиції з нітратом кальцію не залежить від введення сенсибілізуючої домішки абслотно, що добре ілюструється ідентичними кривими ТГА. Цей вплив корелюється з попередніми даними про розклад пероксиду водню у складі сумішей в процесі зберігання, зокрема те, що нітрат кальцію у якості домішки навіть у присутності скляних мікросфер значно гальмує процес розкладу пероксиду водню і є єдиною домішкою, за якої ефективна концентрація пероксиду водню тримається протягом доби понад 30 мас. %.

Вплив скляних мікросфер на швидкість та повноту розкладу можна частково пояснити залежністю від щільності зразків, яка має прямий вплив на їх швидкість детонації D. Суміші, що містять скляні мікросфери, мають помітно вищу щільність, ніж зразки без них, що призводить до порівняльної різниці у значеннях D для цих сумішей. Але це не пояснює відсутність жодного впливу від додавання мікросфер у суміш з нітратом кальцію. В цьому випадку, з огляду на вказану вище гіпотезу, має бути помітний вплив, оскільки має місце достатня різниця щільності зразків 1A та 1B. Однак цього не відбувається.

Скляні мікросфери завжди додаються до вибухових речовин як інертний сенсибілізуючий агент [144, 235–240]. Механізм їх впливу зазвичай пояснюють збільшенням площі реагування та створенням локальних осередків нагрівання в процесі детонації. Як виявлено у процесі роботи у вибуховій композиції на основі перекису водню та гліцерину, це не зовсім так. Скляні мікросфери помітно прискорюють розпад перекису водню. Розклад перекису водню активує хімічну взаємодію і збільшує швидкість детонації D. Однак така поведінка не може бути пояснена лише збільшенням активної поверхні внаслідок руйнування мікросфер, що призводить до утворення пористих фрагментів, на яких може адсорбуватися перекис водню. Як можна побачити з результатів мікроскопічного дослідження суміші 1В, скляні мікросфери в складі суміші мають набагато більш розвинену поверхню, ймовірно внаслідок адсорбції на їх поверхні малорозчинних сполук кальцію, але це жодним чином не впливає на процес детонації. Очевидно має місце саме хімічна взаємодія складу з поверхнею скляних мікросфер, яка відсутня у випадку використання нітрату кальцію. У роботі [138] було зроблено припущення про утворення на поверхні скла силанольної групи (-OH) під час контакту з водою. Значна частина цих груп депротонується, створюючи негативні поверхневі заряди ($-O^-$), які можуть діяти як активні каталітичні центри, сприяючи збільшенню швидкості термічного розкладу. Також має місце припущення про каталітичний вплив домішок лужних металів, що входять до складу скла.

Отже, необхідні подальші дослідження з метою встановлення механізму взаємодії компонентів суміші та можливого каталітичного впливу компонентів мікросфер.

Щодо вибору окислювача, то вибір будь-якого окислювача, крім нітрату кальцію, можна розглядати як можливий, зважаючи на невелику різницю в енергетичних характеристиках сумішей 2А та 3А. Перевагу може мати суміш з більшою щільністю, щоб максимізувати D вибухової речовини. З огляду на те, що суміш 1А, яка має найбільше значення щільності [139], не є оптимальною за

результатами досліджень, то суміш 2А буде розглядатися як така, що має оптимальний склад [239].

4.3 Термодинамічні розрахунки обраних рецептур

Для кількісної оцінки процесу термічного окислення експериментально аналітичним методом розраховано енергію активації термоокисної деструкції. Чим більша ця величина, тим більш стабільною та менш чутливою до деструкції є речовина, яку досліджують. Розглянуто низку відповідних рецептур.

4.3.1 Розглянуто вибуховий склад 1 – перекис водню + гліцерин + $Ca(NO_3)_2$.

Таблиця 4.5. Розрахунок значень подвійного логарифма втрати маси вибухового складу 1 за отриманою термограмою, в стабільній зоні.

t, ºC	T, K	$T_R = 1000/T$, 1/K	Δm, %	100 – Δm	$Y=\ln\left[\ln\frac{100}{100-\Delta m}\right]$
200	473.15	2.113	21.5	78.5	-1.419
210	483.15	2.070	22.5	77.5	-1.367
220	493.15	2.028	23.0	77	-1.342
230	503.15	1.987	24.0	76	-1.293
240	513.15	1.949	24.5	75.5	-1.269
250	523.15	1.911	25.0	75	-1.246
260	533.15	1.876	26.0	74	-1.200

На основі отриманих даних побудовано графік залежності подвійного логарифма від значення температури зворотного нагріву піротехнічного складу рис. 4.8.

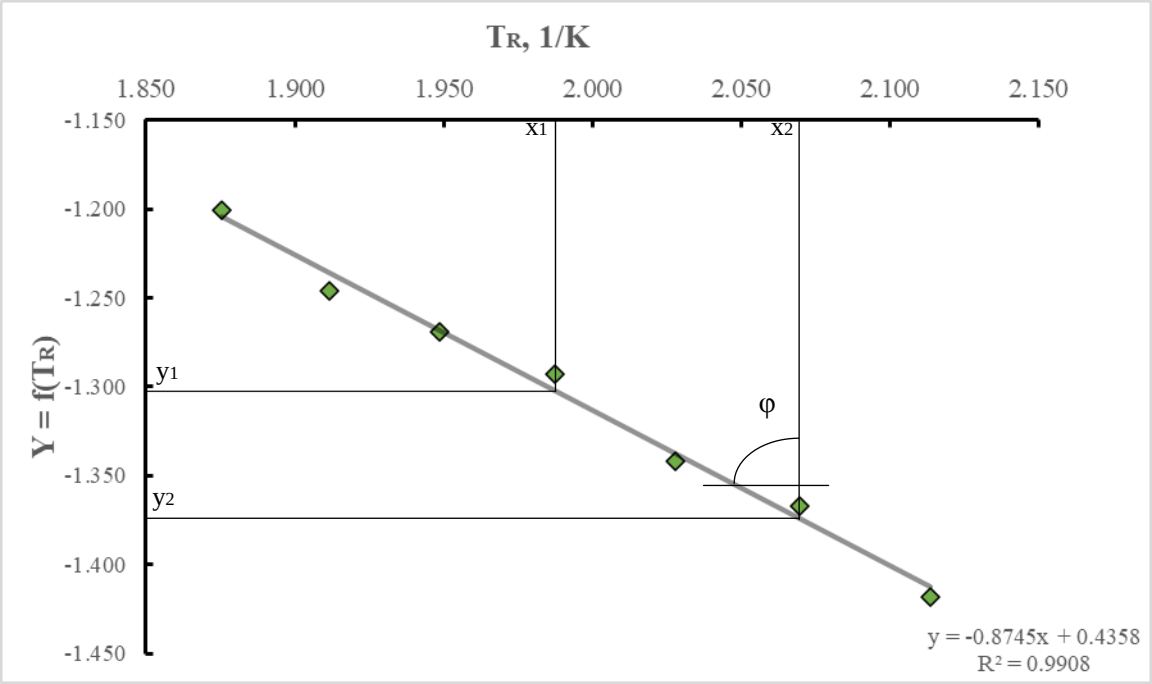


Рис. 4.8. Графік залежності подвійного логарифма від значення температури зворотного нагріву піротехнічного складу: Перекис водню + гліцерин + $Ca(NO_3)_2$ (з лінійною автоматичною апроксимацією даних)

Для вибраної області розраховано tg φ, за формулою 4.2:

$$tg\ \varphi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{4.2}$$

$$tg\ \varphi = \frac{-1.374 - (-1.304)}{2.070 - 1.987} = -0.843$$

Енергію активації (Е), кДж/моль, розраховано за формулою 4.3:

$$E = R \cdot |tg\ \varphi| \tag{4.3}$$

Значення енергії активації:

$$E = 8{,}314 \cdot 0.843 = 7.01\ kJ/mol$$

4.3.2 Розглянуто вибуховий склад 2 – перекис водню + гліцерин + KNO_3.

Таблиця 4.6. Розрахунок значень подвійного логарифма втрати маси вибухового складу 2 за отриманою термограмою, в стабільній зоні

t, °C	T, K	$T_R = 1000/T$, 1/K	Δm, %	100 – Δm	$Y=\ln\left[\ln\frac{100}{100-\Delta m}\right]$
180	473.15	2.207	24.5	78.5	-1.269
200	483.15	2.113	25.0	77.5	-1.246
220	493.15	2.028	26.5	77	-1.178
240	503.15	1.949	27.5	76	-1.134
260	513.15	1.876	28.5	75.5	-1.092
280	523.15	1.808	30.0	75	-1.031

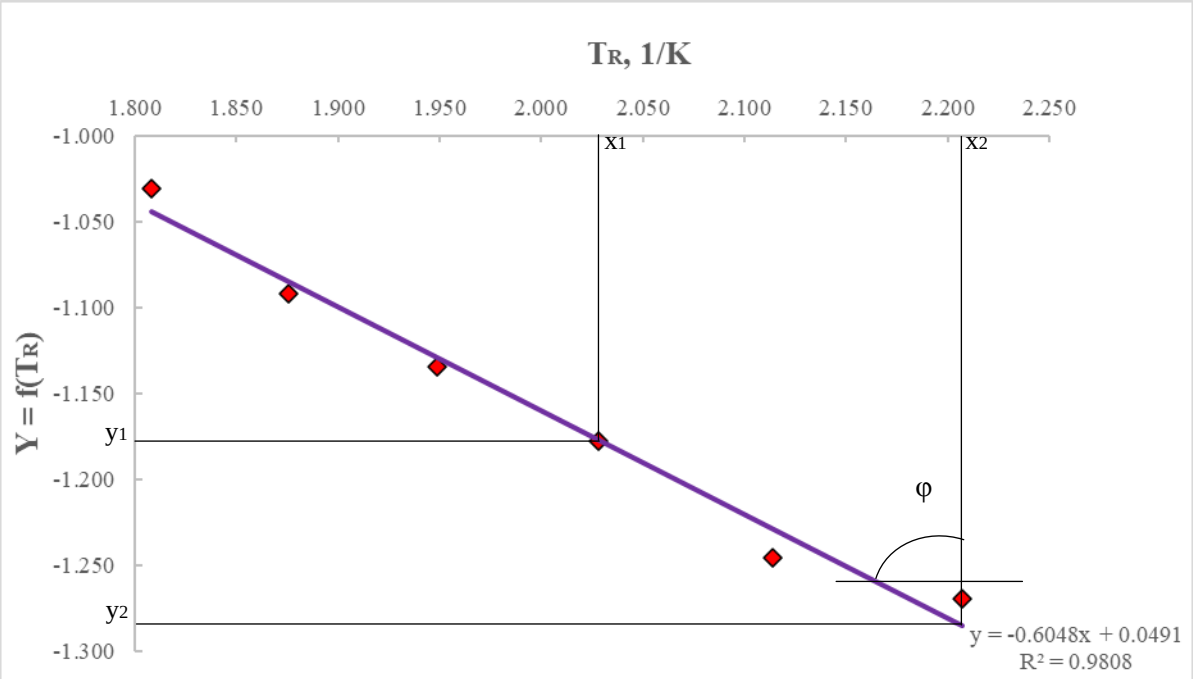


Рис. 4.9. Графік залежності подвійного логарифма від значення температури зворотного нагріву піротехнічного складу: Перекис водню + гліцерин + KNO_3 (з лінійною автоматичною апроксимацією даних)

Для вибраної області розраховано tgφ, формула 4.2:

$$tg\,\varphi = \frac{-1.286 - (-1.177)}{2.207 - 2.028} = -0.609$$

Енергію активації (E), кДж/моль, розраховано за формулою 4.3:

$$E = 8{,}314 \cdot 0.609 = 5.063\ kJ/mol$$

4.3.2 Розглянуто вибуховий склад 2 – перекис водню + гліцерин + $NaNO_3$

Таблиця 4.7. Розрахунок значень подвійного логарифма втрати маси вибухового складу 2 за отриманою термограмою, в стабільній зоні

t, °C	T, K	$T_R = 1000/T$, 1/K	Δm, %	100 – Δm	$Y=\ln\left[\ln\frac{100}{100-\Delta m}\right]$
180	473.15	2.207	23.5	78.5	-1.317
200	483.15	2.113	25.0	77.5	-1.246
220	493.15	2.028	25.5	77	-1.223
240	503.15	1.949	27.0	76	-1.156
260	513.15	1.876	28.5	75.5	-1.092
280	523.15	1.808	29.0	75	-1.072

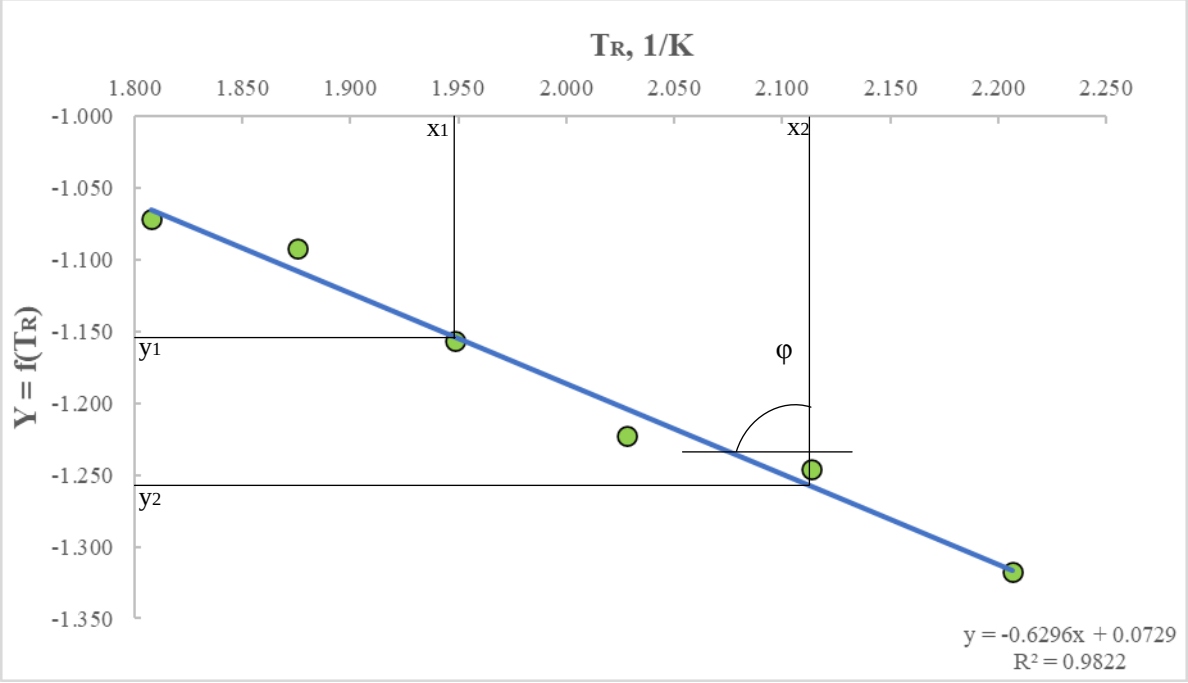


Рис. 4.10. Графік залежності подвійного логарифма від значення температури зворотного нагріву піротехнічного складу: Перекис водню + гліцерин + $NaNO_3$ (з лінійною автоматичною апроксимацією даних)

Для вибраної області розраховано tgφ, формула 4.2:

$$tg\ \varphi = \frac{-1.257 - (-1.154)}{2.113 - 1.949} = -0.628$$

Енергію активації (Е), кДж/моль, розраховано за формулою 4.3:

$$E = 8{,}314 \cdot 0.628 = 5.221\ kJ/mol$$

Результати досліджень та розрахунків енергії активації термоокисної деструкції дають можливість зробити висновок, що вибуховий склад, який містить перекис водню : гліцерин : $Ca(NO_3)_2$, є найбільш безпечним у використанні, тому що має найбільше значення енергії активації термоокисної деструкції 7,01 kJ/mol порівняно з двома іншими.

4.4 Енергія Гіббса як умова вибухового перетворення досліджуваних композицій

З метою визначення найбільш ефективного за енергетичними характеристиками детонуючого складу для проміжного детонатора (бойовика) було проведено розрахунки енергії Гіббса для чотирьох найбільш перспективних вибухових композицій.

Енергія Гіббса, як вже зазначалося раніше, це величина, зміна якої в ході хімічної реакції дорівнює зміні внутрішньої енергії. Енергію Гіббса можна розуміти як найбільш повну потенційну хімічну енергію системи.

Розглянуто детонуючий склад 3 на основі перекису водню та гліцерину.

Реакція термічного розкладення при нульовому кисневому балансі має такий вид:

$7H_2O_2+C_3H_8O_3=3CO_2+11H_2O$

Графік зміни Енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 4.11, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 4.12. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 3.

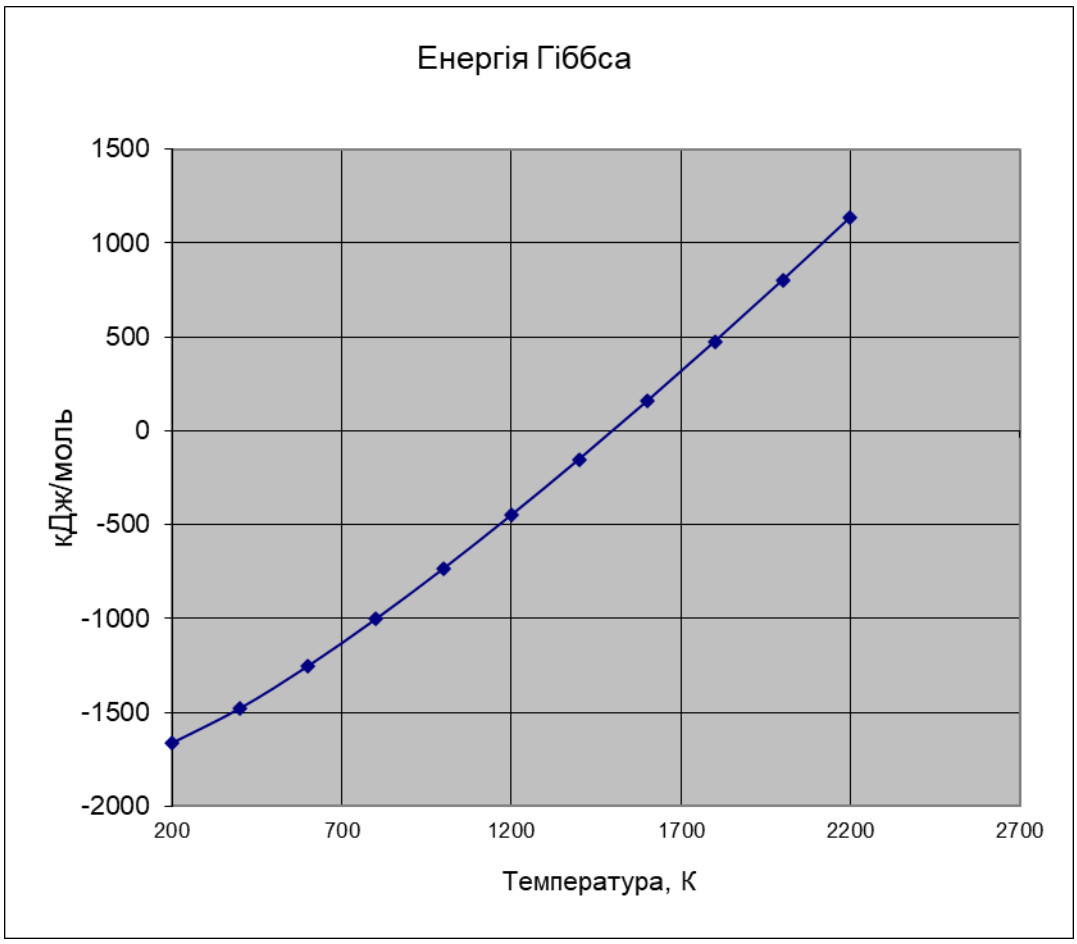


Рис. 4.11. Залежність зміни енергії Гіббса перекису водню та гліцерину від температури

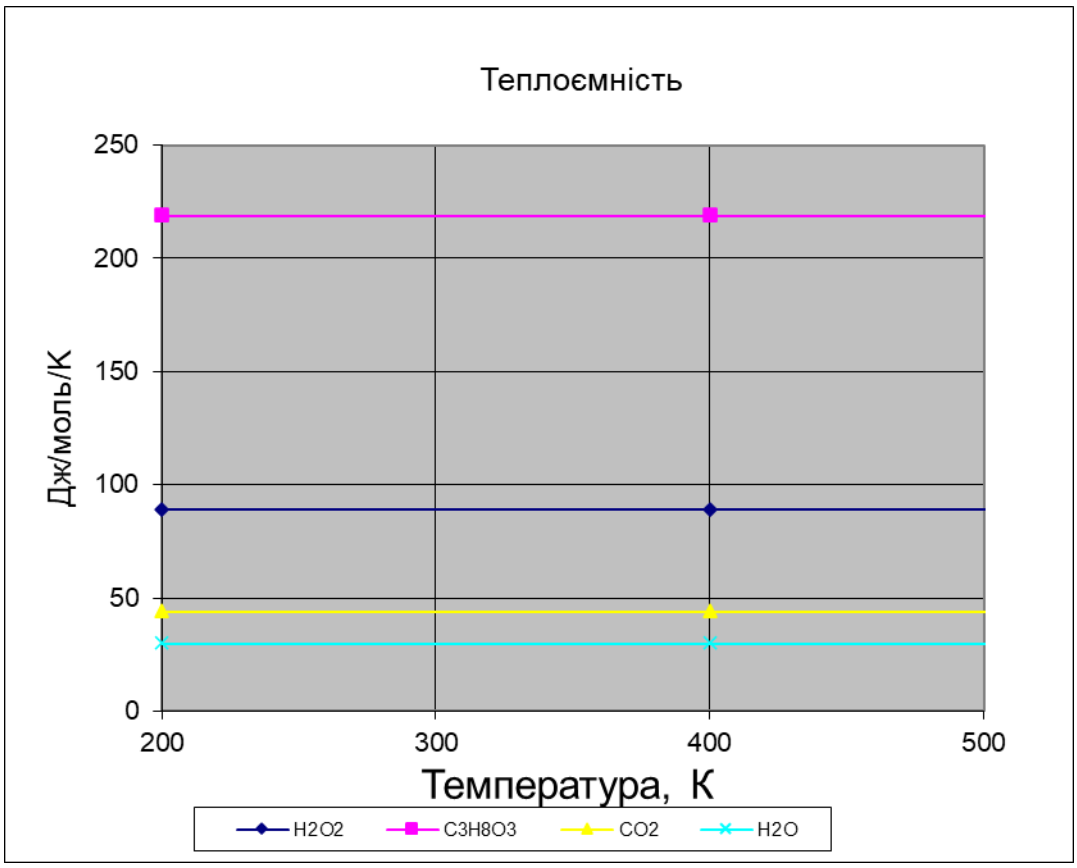


Рис. 4.12. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі перекису водню та гліцерину

Графік зміни енергії Гіббса свідчить про змінення напрямку реакції при температурі 1501 ºС. Це відбувається під час переходу через нульовий показник енергії Гіббса, який є точкою рівноваги (балансу) хімічних процесів, що можуть протікати за термодинамічної реакції. Чим вищий цей температурний показник, тим вищий енергетичний потенціал при вибуховому розкладі суміші.

Розглянуто детонуючий склад 4 на основі перекису водню, гліцерину та нітрату натрію.

Реакція термічного розкладення при нульовому кисневому балансі має такий вид:

$2H_2O_2+C_3H_8O_3+2NaNO_3=3CO_2+6H_2O+N_2+Na_2O$

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 4.13, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 4.14. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 4.

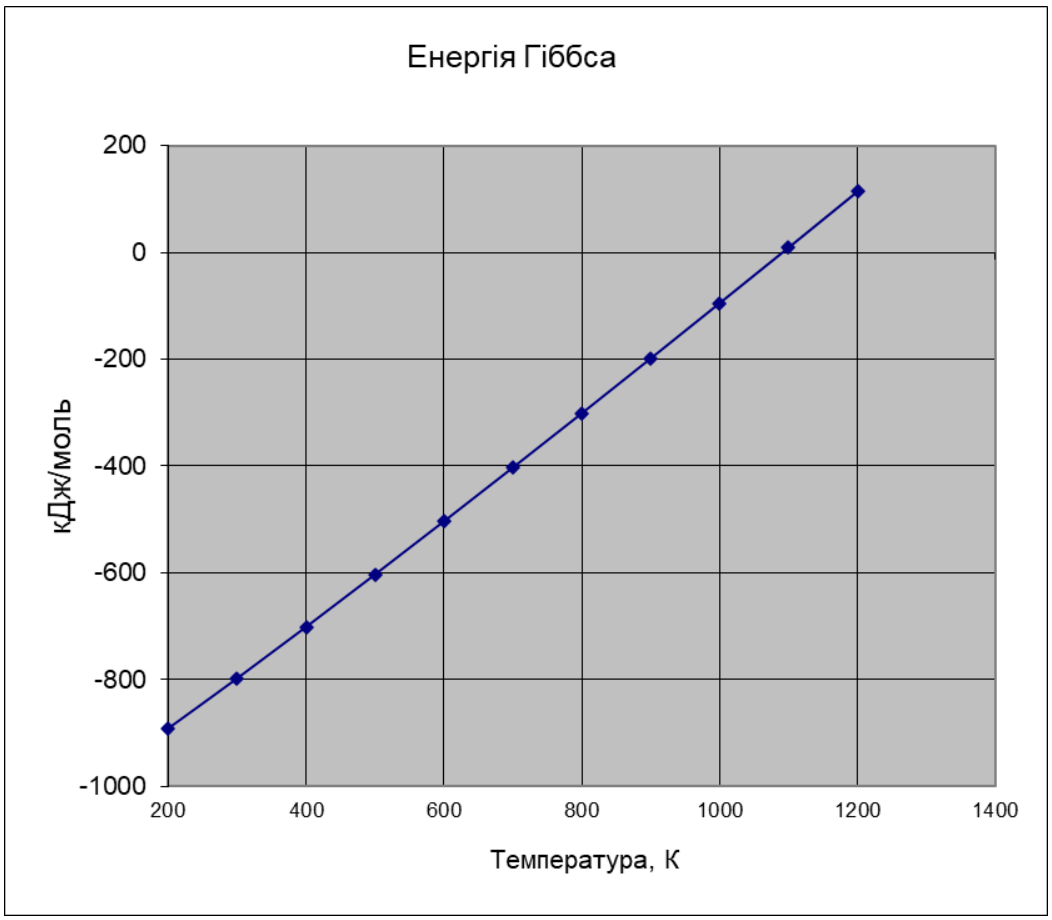


Рис. 4.13. Залежність зміни енергії Гіббса перекису водню, гліцерину та нітрату натрію від температури

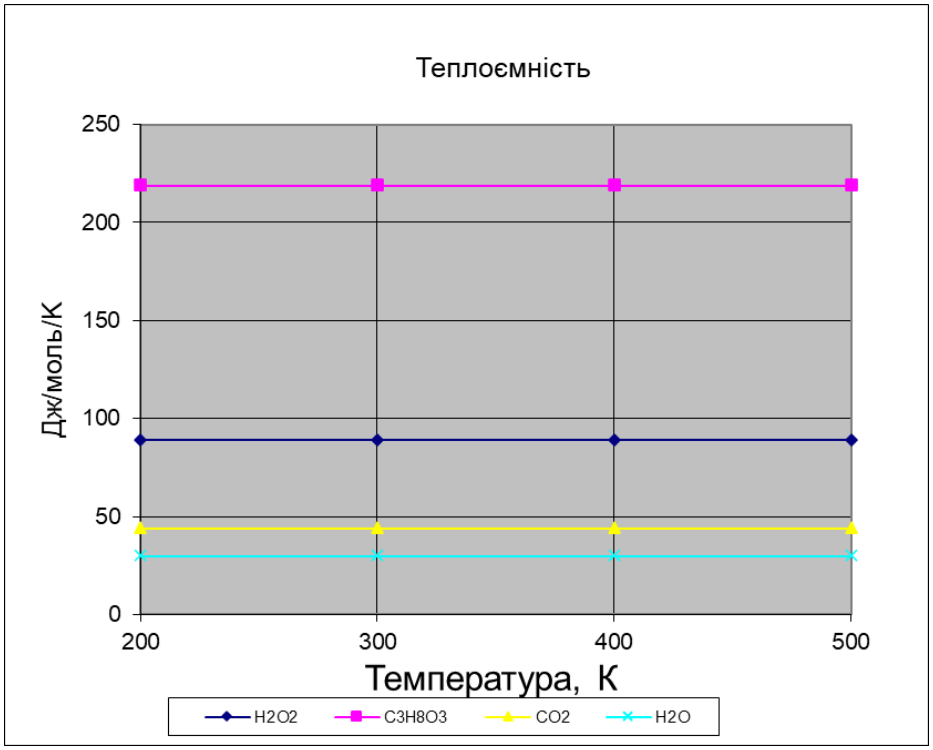


Рис. 4.14. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі перекису водню, гліцерину та нітрату натрію

Графік зміни енергії Гіббса свідчить про зміну напрямку реакції складу 4 при 1088 ºС.

Розглянуто детонуючий склад 5 на основі перекису водню, гліцерину та нітрату калію.

Реакція термічного розкладення при нульовому кисневому балансі має такий вид:

$2H_2O_2+C_3H_8O_3+2KNO_3=3CO_2+6H_2O+N_2+K_2O$

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 4.15, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 4.16. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 5.

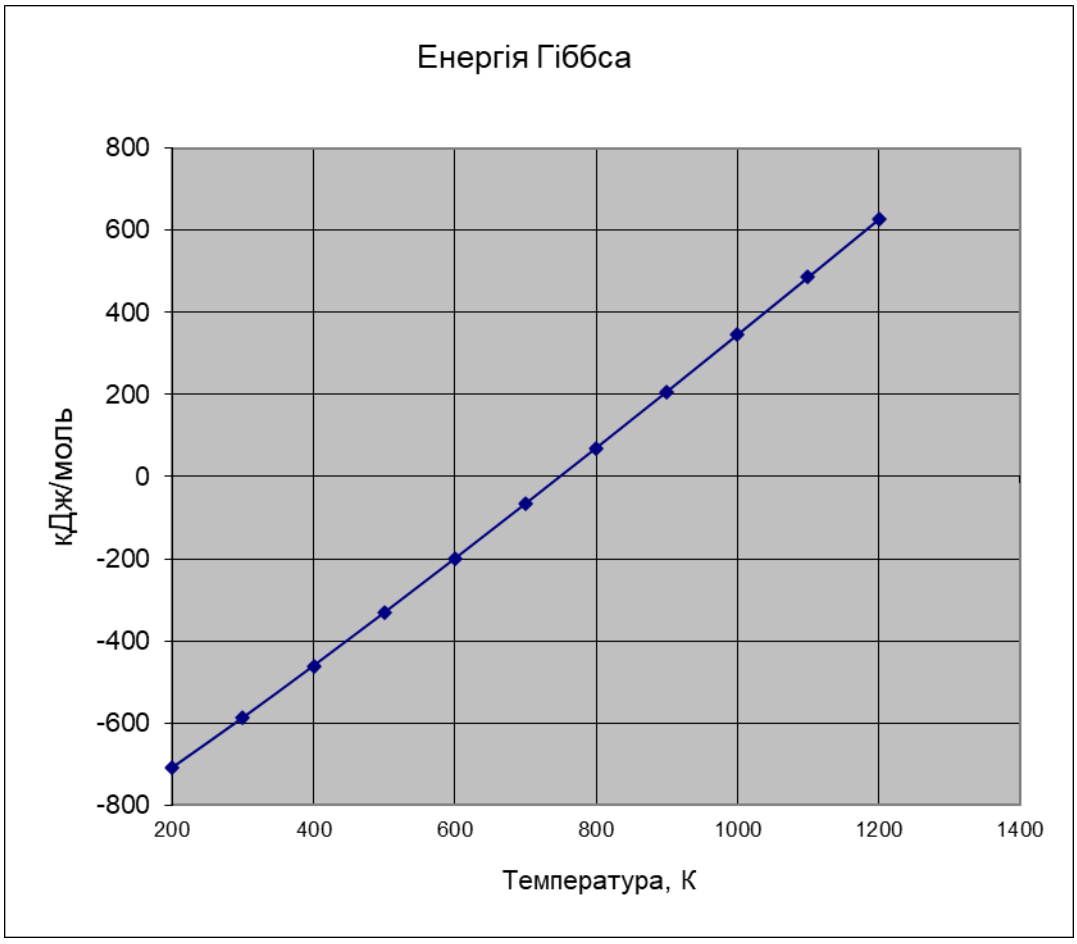


Рис. 4.15. Залежність зміни енергії Гіббса перекису водню, гліцерину та нітрату калію від температури

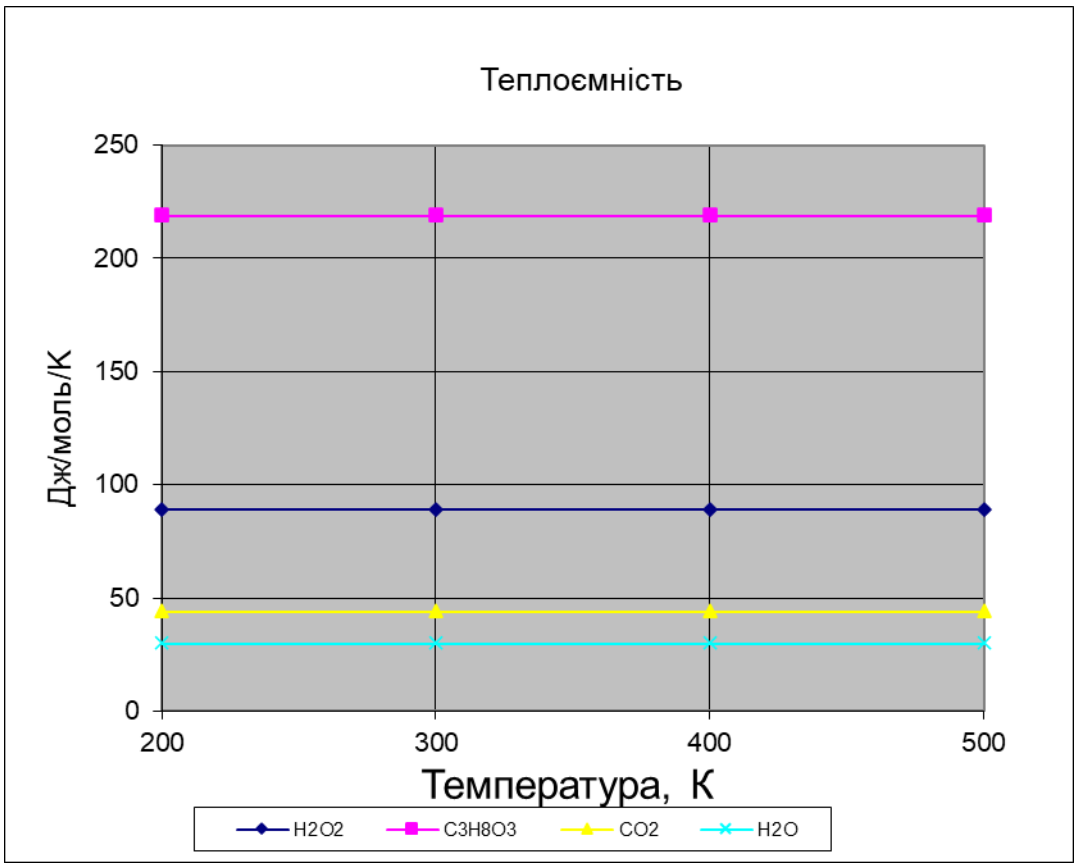


Рис. 4.16. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі перекису водню, гліцерину та нітрату калію

Графік зміни енергії Гіббса свідчить про зміну напрямку реакції складу 5 при 749 ºС.

Розглянуто детонуючий склад 6 на основі перекису водню, гліцерину та нітрату кальцію.

Реакція термічного розкладення при нульовому кисневому балансі має такий вид:

$2H_2O_2+C_3H_8O_3+Ca(NO_3)_2=3CO_2+6H_2O+N_2+CaO$

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 4.17, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 4.18. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 6.

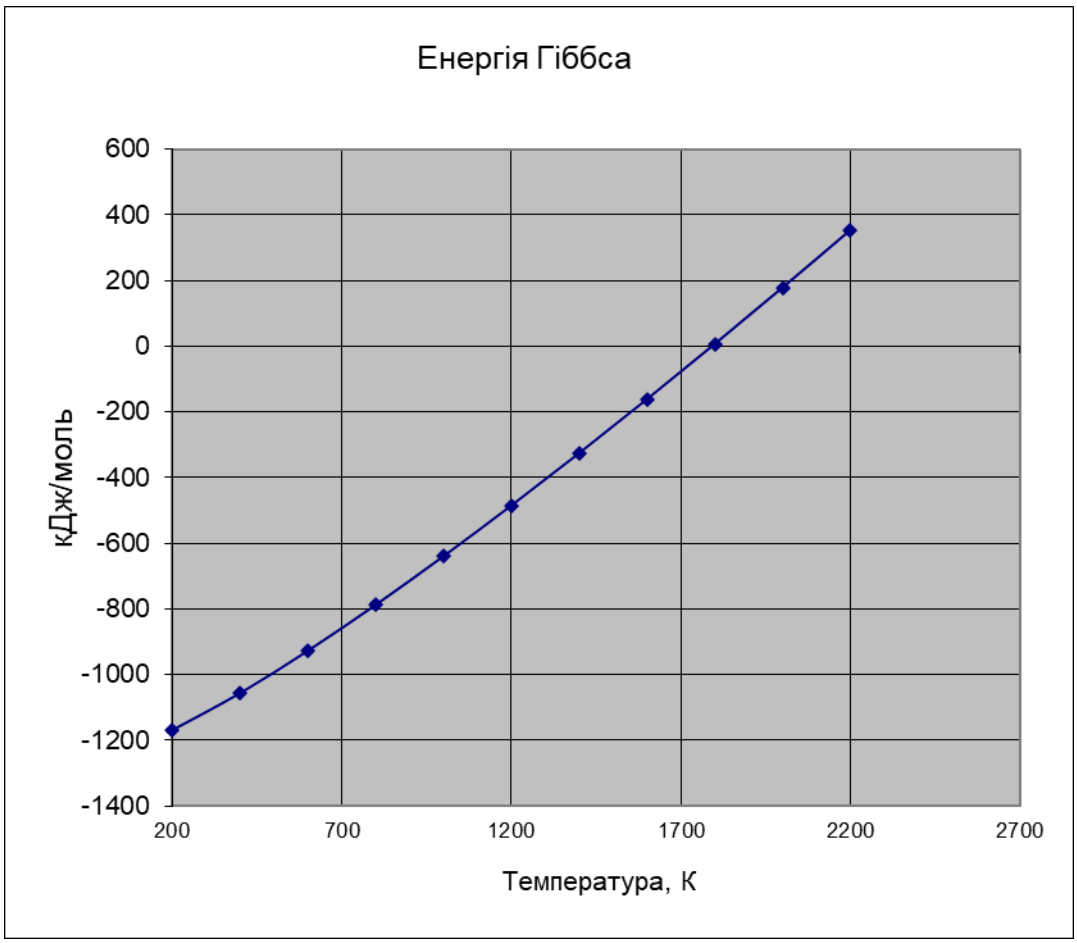


Рис. 4.17. Залежність зміни енергії Гіббса перекису водню, гліцерину та нітрату кальцію від температури

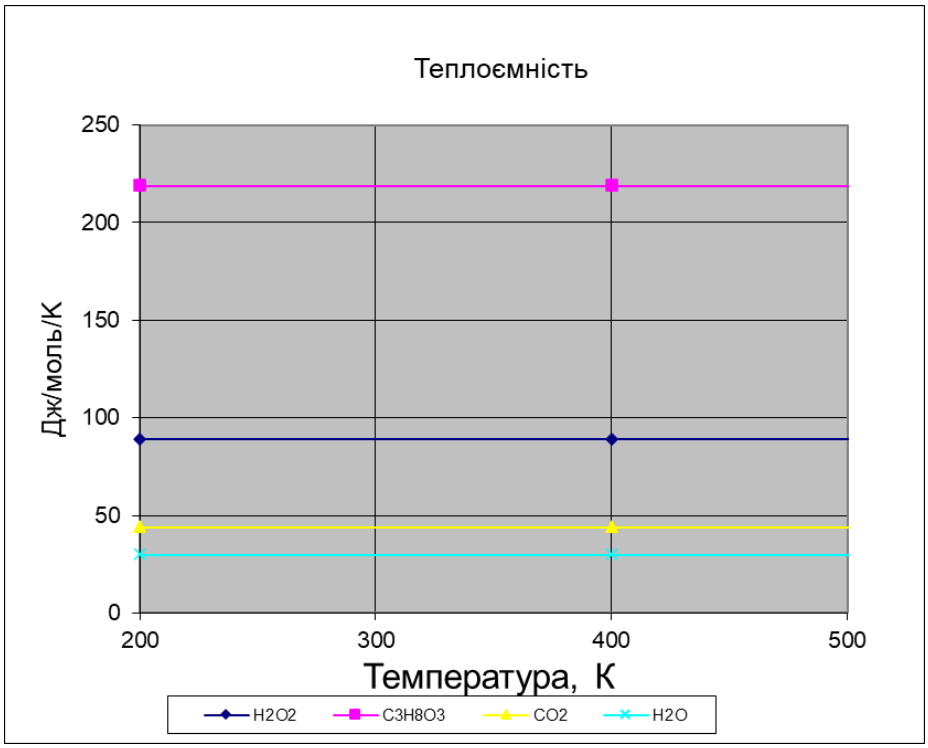


Рис. 4.18. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі перекису водню, гліцерину та нітрату кальцію

Графік зміни енергії Гіббса свідчить про зміну напрямку реакції складу 6 при 1795 ºС.

Розглянуто детонуючий склад 7 на основі аміачної селітри та нітрометану.

Реакція термічного розкладення при нульовому кисневому балансі має такий вид:

$2CH_3NO_2+2N_2H_4O_3=2CO_2+7H_2O+4N_2$

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 4.19, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 4.20. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 7.

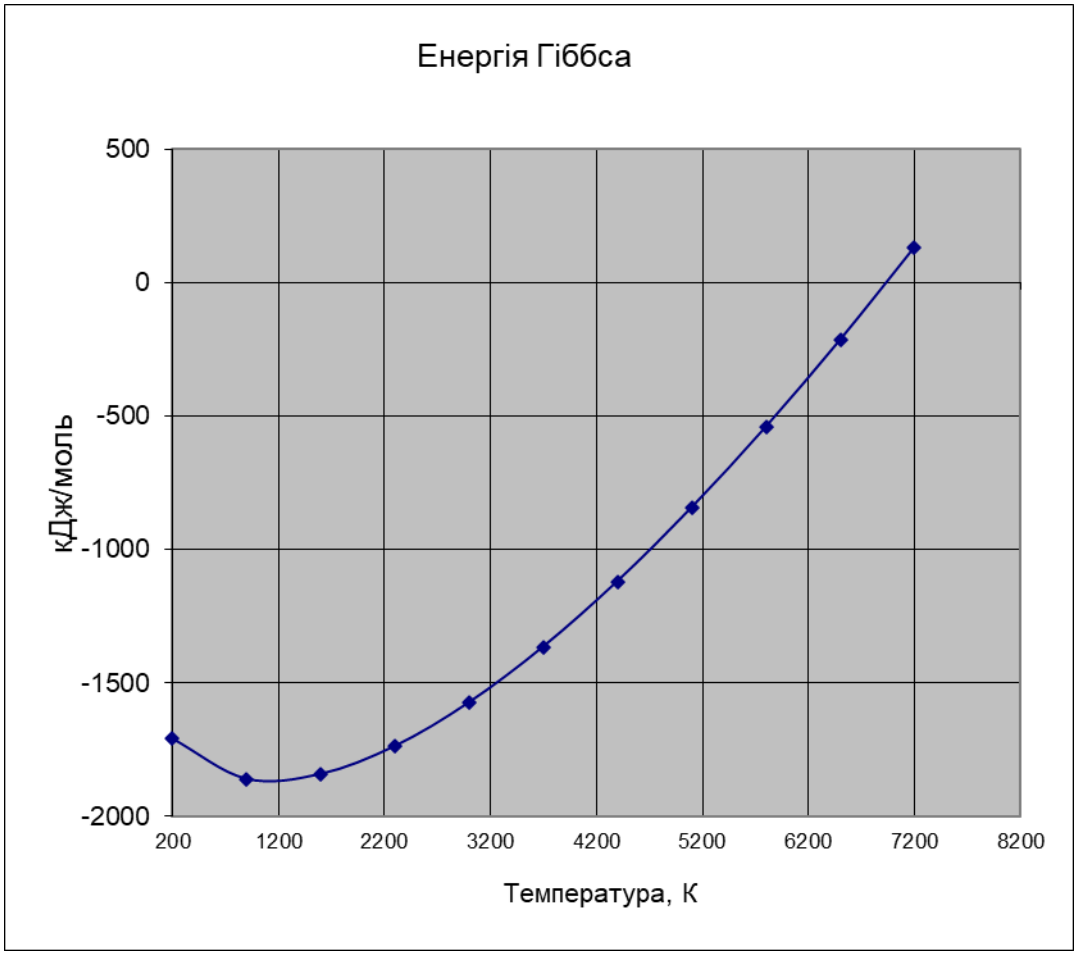


Рис. 4.19. Залежність зміни енергії Гіббса аміачної селітри та нітрометану від температури

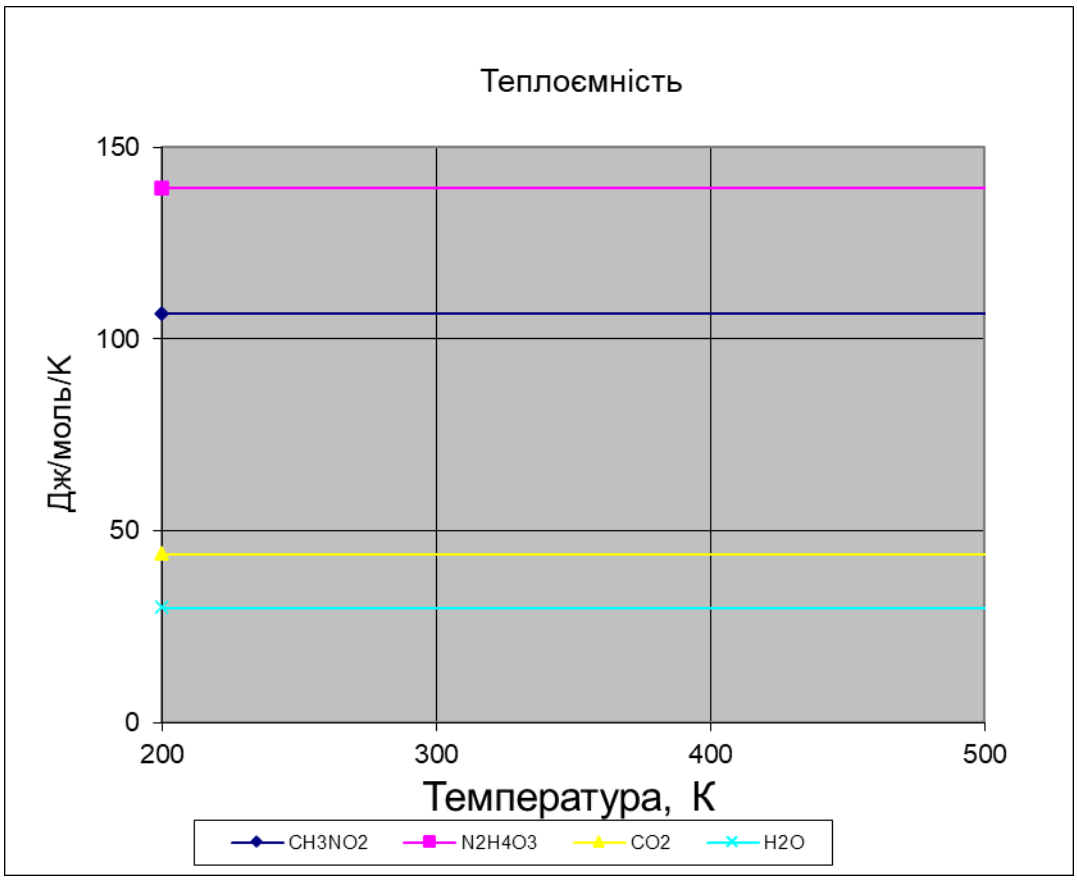


Рис. 4.20. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі аміачної селітри та нітрометану

Всі досліджувані суміші є безпечними порівняно з існуючими штатними детонаторами. Графік залежності енергії Гіббса від температури свідчить про зміну напрямку реакції складу 7 при 6910 ºС. Це означає, що хімічний потенціал вибухової суміші аміачної селітри та нітрометану найвищий серед усіх розглянутих у роботі, що робить проміжні детонатори на її основі найбільш перспективними.

4.5 Вплив геометрії проміжного детонатора на формування енергетичного поля

У роботі виконано експериментальні дослідження впливу форми проміжних детонаторів (бойовиків) на їх ініціюючу здатність у свердловинному заряді. Зосереджені заряди на гірничих роботах переважно використовуються у вигляді

або як проміжного бойовика в основному свердловинному заряді, або як самостійні заряди при вторинних вибухових роботах. Водночас їх геометричні параметри, детонаційні характеристики і характер просторового розподілу енергії, що випромінюється таким зарядом, враховуються мінімально або ігноруються. Відомий приклад зосередженого заряду кумулятивної дії свідчить про можливість створення вибухом складної та керованої картини формування енергетичного поля в часі його вибухового розкладання. Як показують дослідження [152], кумулятивна виїмка в нижньому торці заряду як його конструктивний елемент дозволяє посилити його дію в осьовому напрямку, а саме, в напрямку перебуру, створюючи можливості для скорочення його довжини або для повної відмови від цього конструктивного свердловинного елемента.

У більшості теоретичних розробок щодо керованого механічного ефекту зосередженого заряду вважається, що його ініціювання відбувається миттєво з центру, що значно спрощує рішення. Аналогічно теорії вибуху враховуємо, що детонація подовженого заряду вибухової речовини (ВР) походить від його осі одночасно по довжині заряду. У цьому випадку теоретично симетрія поля напружень та деформацій у навколишньому середовищі за умови її ізотропності повинна концентрично повторювати симетрію заряду у розвитку, особливо у ближній зоні дії вибуху, на контакті з середовищем. У реальних умовах детонації заряду будь-якої конструкції через послідовне переміщення в часі детонаційного фронту від ініціатора до протилежного торця заряду з наступним виходом хвилі детонації, і відповідно продуктів вибуху на межу заряду з середовищем, характер розвитку згаданих полів набагато складніший.

Отже, враховуючи, що продукти вибуху (ПВ), які виконують механічну роботу, розлітаються по нормалі до поверхні заряду, побудовано теорію кумуляції, тобто фокусування потоку ПВ для підсилення пробивної дії заряду. Відповідно варто очікувати, що будь-яка зміна форми заряду призведе до зміни форми силового поля. Відповідно до цього припущення розглянуто можливість підвищення ефективності застосування бойовика у формі усіченого конуса. Досліджувалися конструкції бойовика з кутом конусності від 15° до 45° з

переходом в циліндричну форму в усіченій частині бойовика. Схему конічного заряду наведено на рис. 4.21.

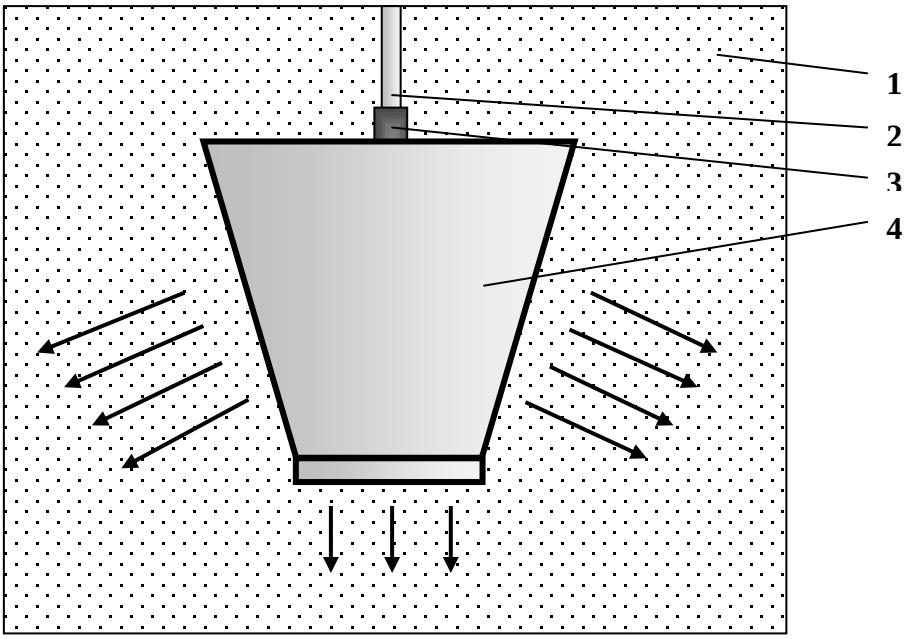


Рис. 4.21. Конічний проміжний детонатор у свердловині:

1 – свердловинний заряд; 2 – детонуючий хвилевід; 3 – капсуль-детонатор; 4 – конічний бойовик (проміжний детонатор ПД)

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

енергія ініціюючого вибухової речовини переходить у робоче тіло заряду ВР і не виходить за його межі.

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

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

При застосуванні конусного ПД як ініціювальний заряд було використано склад на основі аміачної селітри з нітрометаном у співвідношенні 85:15. Швидкість детонації конусного заряду ПД складу «аміачна селітра – нітрометан» у співвідношенні 85:15 становить до 2985 м/с. Таким чином, ініціювання заряду грануліту 79/21 конічним ПД відбувається у режимі недотислої детонації. Суміші АС-НМ мають високу чутливість до ініціюючого імпульсу, що пов'язано з невисоким значенням критичного діаметра детонації. Діаметр широкої конусної частини заряду ПД підібрано 80 мм, що забезпечило кут конусності 25° і рівність діаметрів ПД та заряду, що ініціюється. Рівність діаметрів ПД і заряду дозволить забезпечити стійку швидкість детонації заряду, що ініціюється, на мінімальній відстані від точки ініціювання [146–149, 228, 233]. Результати випробувань зображено на графіку рис. 4.22.

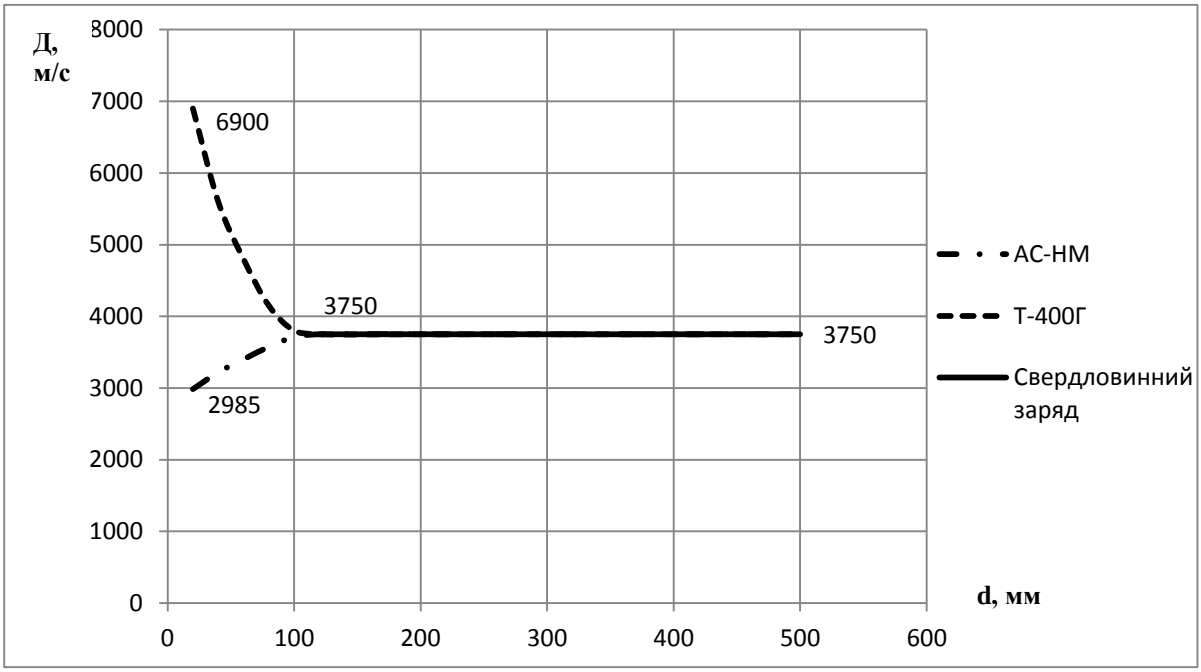


Рис. 4.22. Вплив форми ПД на стійкість швидкості детонації грануліту 79/21 залежно від ініціатора різного типу : 1 – шашка Т-400Г; 2 – ПД конічної форми масою 200 г

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

Аміачна селітра не є вибуховою речовиною і застосовується як добриво у сільському господарстві. Нітрометан CH_3NO_2 [149, 150], у чистому вигляді має досить великий критичний діаметр та низьку чутливість до детонації. Нітрометан не є легкозаймистою речовиною, він нечутливий до капсуля-детонатора № 8. Використовується в промисловості як домішка до автомобільних палив з метою

підвищення їх енергетичних характеристик (октанового числа), або як паливо в авіамодельному спорті.

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

Вивчення ефективності, механізму формування та перерозподілу повного імпульсу вибуху конічного заряду на контакті з середовищем будується насамперед на відомих наукових уявленнях про контактну дію подовженого циліндричного заряду обмеженої довжини. Контактна або бризантна дія вибуху циліндричного заряду, який ініціюється з торця, оцінюється величиною повного імпульсу при зустрічі хвилі детонації з перешкодою [152], розраховується за формулою 4.4:

$$I = \frac{8}{27} s\rho l D = \frac{8}{27} Q D, \qquad (4.4)$$

де S – площа поперечного перерізу заряду;

ρ – густина ВР заряду;

l – довжина заряду ВР;

D – швидкість детонації заряду ВР;

$Q = sl\rho$ – загальна маса заряду.

Якщо циліндричний заряд ініційований з одного торця, а протилежним торцем контактує з перешкодою, на величину осьового імпульсу впливає не повна маса заряду, а так звана його активна частина m_a, що має форму конуса. Продукти детонації цієї частини заряду прямують у бік основи конуса, тобто у бік контакту з перешкодою. Розмір активної маси залежить від місця розміщення ініціатора в заряді: у бік поширення детонації виділяється 4/9 загальної енергії ВР [152, 257–260]. При збільшенні висоти циліндричного заряду та незмінному діаметрі активна маса збільшується до певної межі, після якої маса активної частини заряду залишається постійною.

При використанні циліндричного заряду як проміжного бойовика його ініціююча здатність зростає в міру зростання діаметра. Для реальних зарядів свердловин максимум ефекту досягається за рівності діаметра бойовика діаметра свердловинного заряду.

У зв’язку з тим, що активна маса циліндричного заряду бойовика має форму конуса, доцільно надавати проміжному ініціатор саме таку форму. Все наведене вище стосується відкритого заряду, в якому відсутня міцна зовнішня оболонка. За наявності оболонки можливість бічного розлітання продуктів детонації обмежується, одночасно збільшується бризантна дія цього заряду в осьовому напрямку.

Метою досліджень є практичні та модельні дослідження особливостей детонаційного розкладання, форми та характеру випромінюваного енергетичного поля при вибуху зосередженого конічного заряду ініціюючої ВР, що відповідає формі активної маси циліндричного заряду в його торцевій частині.

Вивчення надзвичайно швидкого детонаційного розкладання заряду на стадії формування детонаційного фронту в заряді та подальшого його перетворення на ударну хвилю за межами заряду можливе шляхом експериментальних досліджень, що вимагають застосування сучасної вимірювальної техніки. Однак через значні витрати на такі експерименти сучасна наука віддає перевагу комп’ютерному моделюванню фізичних процесів.

Обмежена кількість експериментів потрібна лише для встановлення достовірності результатів моделювання.

Для розвитку уявлень про хвильові явища у продуктах детонації (ПД) при вибуху заряду ВР конічної форми в [153–155] виконано математичне моделювання за допомогою авторського програмного комплексу «ГЕФЕСТ».

Постановка базується на принципі математичного переміщення середовищ через нерухому розрахункову сітку і дозволяє визначати високий рівень ступеня деформування середовищ, включаючи різного роду завихрення та перекручування. Водночас кожен розрахунковий елемент може містити суміш декількох матеріалів. У нашому випадку це суміш продуктів детонації та повітря. Для наскрізного розрахунку через контактні межі середовищ використовувався метод концентрацій, а система рівнянь доповнювалася співвідношенням концентрацій.

Перед встановленням завдання комп’ютерного моделювання було проведено полігонні випробування двох серій конічних зарядів (рис. 4.23). Серія № 1 представлена сумішшю тринітротолуолу та аміачної селітри, серія № 2 – сумішшю аміачної селітри (або перхлорату калію) та нітрометану. Вибір саме таких композицій високоенергетичних складів був зумовлений порівнянням характеристик умовно небезпечного та умовно безпечного проміжних конічних детонаторів [156]. Якщо суміш № 1 містить у собі класичну бризантну вибухову речовину тринітротолуол, то компоненти суміші № 2 не є вибуховими речовинами, а стають вибуховим складом лише після перемішування. Обидва склади виявили працездатність під час полігонних випробувань.

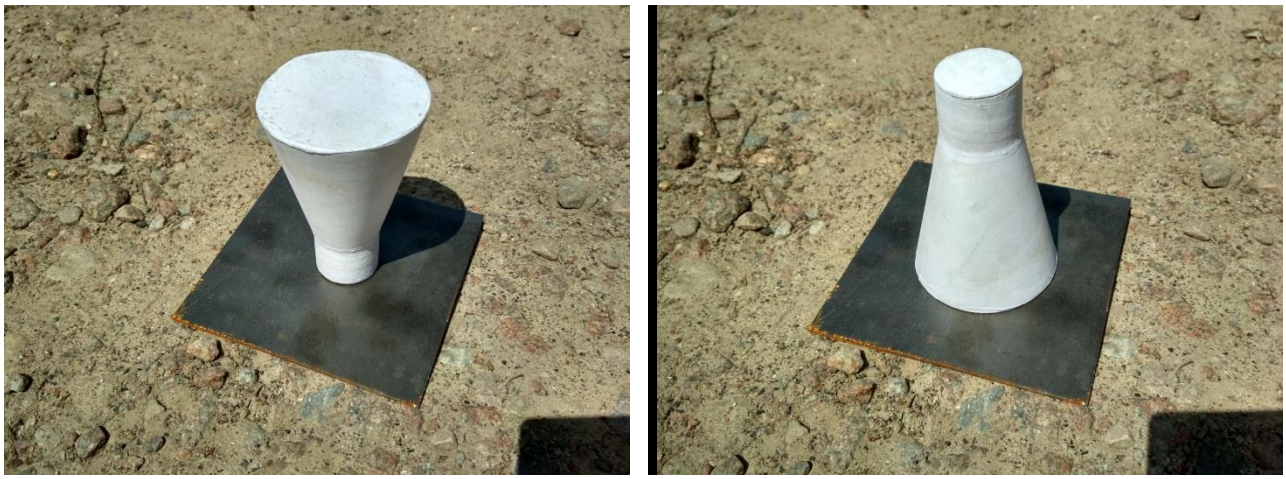


Рис. 4.23. Конічні детонатори на 5-міліметровій сталевій пластині-свідку

У часі випробувань виявлено зміну характеристик вибуху при різному геометричному розташуванні конічних зарядів як суміші № 1, так і суміші № 2 [158, 243]. Бризантні характеристики одного й того ж конічного заряду залежать від його просторового розміщення і помітно збільшуються при його установці на широку поверхню конуса. Це стало підставою для проведення досліджень та математичного аналізу енергетичного поля під час вибуху конічного заряду.

У результаті комп'ютерного моделювання отримано ізолінії щільності продуктів вибуху конічного заряду при його ініціюванні з вузької та широкої основи.

Аналіз динаміки розвитку наведених полів (ізоліній) свідчить про таке:

- форма поля ізоліній щільності ПД зумовлена насамперед формою заряду незалежно від місця його ініціювання;

- за формою поля ізоліній при ініціюванні заряду з вузької частини велика концентрація енергії спостерігається в осьовому напрямку (вздовж осі Z) у бік широкої основи конуса; при ініціюванні конусного заряду з широкої основи розвиток поля і відповідно потоку енергії відбувається у бік вузької основи конуса;

- при вибуху циліндричного заряду переважаючі напрями розвитку енергетичного поля в ПД практично орієнтовані по нормалі до кожної поверхні заряду; спостерігається зміщення поля щільностей ПД від центру заряду у бік, протилежний місцю ініціювання;

- якщо загальну площу поля щільностей ПД пов’язувати з загальною енергією вибуху, надається можливість перерозподілу потоку енергії за рахунок насамперед орієнтації основи та бічних сторін усіченого конусного заряду, а потім – місця його ініціювання;

- умови ініціювання детонації визначають переважний напрямок розвитку енергетичного потоку, а саме – за нормаллю до основи у бік, протилежний місцю ініціювання. На підтвердження цього спостереження зазначимо, що найбільша відстань між сусідніми ізолініями спостерігається у напрямку розвитку детонаційного процесу.

4.6 Результати полігонних випробувань ефективності конічних бойовиків

Дослідження проводили на території випробувальної станції ШКЗ «Імпульс». В якості досліджуваних матеріалів застосовано 4 кг дисперсного лускованого тринітротолуолу, 24 електродетонатори ЕД-8 і 8 метрів детонуючого шнура ДШЕ-6 (надано ШКЗ «Імпульс»), 500 мл нітрометану, 16 пластин-свідків (надано ШІ СумДУ). [249, 252–255].

При дослідженні сумішей тринітротолуолу з нітрометаном в проміжних детонаторах виготовляли конічні проміжні детонатори бойовики з лускованого тринітротолуолу та сумішей тринітротолуол/нітрометан у співвідношенні 95/5, 90/10; 85/15; 80/20; 75/25 з кутом конусності від 15° до 45°. Ініціювання здійснювали за допомогою електродетонатора ЕД-8 або детоную чого шнура ДШЕ-6. Для оцінки працездатності виготовляли по 3 конічні шашки з кожного складу та з кутом конусності 15°, 30° і 45°. Конічні шашки встановлювали усіченою та широкою частиною на металеву пластину-свідок, виконану зі сталі марки 15ХМ товщиною 5 мм.

Найперспективніші результати виявлено у шашок із співвідношенням тринітротолуол: нітрометан 95:5, 90:10, та кутом конусності 30° і 45°.

У період дослідження бризантності конічних проміжних детонаторів виготовляли усічені конічні шашки на основі пап’є-маше з кутом конусності 30° і

45° і висотою 120 мм. Діаметр верхньої усіченої частини становив 38 мм, а нижньої широкої частини для шашок з конусністю 30° – 83 мм, а для шашок з конусністю 45° – 113 мм. В якості вибухової речовини застосовували суміш лускованого тротилу з домішкою 6 % нітрометану. У лускований тротил додавали в необхідній кількості нітрометан і ретельно перемішували до отримання однорідної вологої консистенції. Встановлено, що домішка 6 % нітрометану забезпечує рівномірну змочуваність тротилу. При співвідношенні суміші «тротил – нітрометан 94:6» забезпечується фізична стабільність суміші, оскільки нітрометан розчиняє тротил, і стікання нітрометану не відбувається. збільшуючи вміст нітрометану до 10–12 % отримано однорідну суміш не вдалося, нітрометан стікає вниз і не забезпечується фізична стабільність суміші.

Для оцінки бризантності конічні шашки встановлювали широкою або усіченою частиною на металеву пластину-свідок, виконану зі сталі марки 15ХМ товщиною 5 мм. Ініціювання здійснювали за допомогою електродетонатора ЕД-8. Результати випробувань шашок конусністю 30° наведено на рис. 4.24.



а б

Рис. 4.24. Результати досліджень шашок конусністю 30° на бризантність: *а* – ініціювання з широкої частини; *б* – ініціювання з усіченої частини

Випробування шашок конусністю 45° на пластинах-свідках при ініціюванні електродетонатором ЕД-8 з широкої торцевої частини і з усіченої частини наведено на рис. 4.25.



а *б*

Рис. 4.25. Результати досліджень шашок конусністю 45° на бризантність:
а – ініціювання з широкої частини; *б* – ініціювання з усіченої частини

З рис. 4.24 та рис. 4.25 видно, що бризантність конусних шашок вище при установці на пластину-свідок широкою частиною. Вм’ятина на пластині при установці шашки широкою частиною більша, ніж при установці конусом вниз.

Дослідження фугасності (метальної дії) виконувалися шляхом підривання конічних шашок, заглиблених у ґрунт на їх висоту. Фугасність вибуху кожної шашки оцінювалася за об’ємом воронки.

Після вибуху конічних шашок конусністю 45° з масою вибухової суміші тротил: нітрометан у співвідношенні 95:5 – 480 г широкою частиною вниз отримали воронку викидання ґрунту діаметром 120 см і глибиною 45 см, конусною частиною вниз – воронку діаметром 100 см і глибиною 31 см. Обсяг викинутої вибухом маси землі при випробуванні широкою частиною вниз (ініціювання з конічної частини заряду) становив:

$V = 1/3\ \pi r^2 h = 1/3 \cdot 3{,}14 \cdot 60^2 \cdot 45 = 169560$ см^3 = 169,56 дм^3

Обсяг викинутої вибухом маси землі при випробуванні шашки, орієнтованої конічною частиною вниз (ініціювання з широкої частини заряду) становив:

$V = 1/3 \cdot 3{,}14 \cdot 50^2 \cdot 31 = 81116{,}67$ см^3 = 81,11 дм^3

З даних випробувань видно, що фугасність конічних зарядів однакової конусності та однакової маси заряду залежить від його орієнтації до поверхні й місця ініціювання. Згідно з вимірюваннями при ініціюванні з вузького боку

конусного заряду фугасність вдвічі вища, ніж при ініціюванні з широкої частини заряду при рівних умовах проведення випробувань.

З результатів досліджень зрозуміло, що збільшувати кут конусності конічних шашок понад 45° недоцільно, оскільки діаметр торцевої частини шашки при зазначеній конусності та при розумних габаритах вже становить понад 100 мм. Знижувати кут конусності нижче 30° також недоцільно, оскільки ефективність роботи шашок знижується [257–260, 262–264, 266, 267].

Автор брав участь у розробці конічних проміжних детонаторів, що стало основою для таких документів:

План проведення спільних робіт із дослідження характеристик сумішей тринітротолуолу з нітрометаном і конусних проміжних детонаторів на заводі «Імпульс» наявний у Додатку 12.

Акт Дослідження характеристик сумішей тринітротолуолу з нітрометаном та роботоздатності конічних проміжних детонаторі складу тринітротолуол – нітрометан наведено у Додатку 13.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у ТОВ «Азінтерпартлайиш», м. Баку, Республіка Азербайджан, наявний у Додатку 14.

Висновки до розділу 4

Одним із визначальних чинників успішного започаткування стаціонарного детонаційного режиму в промисловому заряді є проміжний детонатор (бойовик або booster), в якості якого традиційно використовуються тротилові або тротил-гексогенові шашки заводського виготовлення. Відповідно до заявленої основної концепції дисертаційної роботи, розглянуто перспективу заміни цих високовартісних вибухових речовин на композиції місцевого приготування, в яких кожен складник не є вибуховою речовиною і стає такою лише після змішування на місці виконання масового вибуху. В якості серії таких композицій

досліджено суміші пероксиду водню і гліцерину з нітратами кальцію, натрію і калію. В якості сенсибілізаторів використано також допоміжні згущувачі та окислювачі.

Сполучені термогравіметричні і мікроскопічні дослідження закономірностей термічного розкладу вибухових сумішей на основі пероксиду водню, супроводжувані роботою електронної системи безперервного зважування, продемонстрували значну перевагу таких додаткових окислювачів, як нітрати калію і натрію, особливо в присутності скляних мікросфер; як показано в дослідженнях, скляні мікросфери не лише створюють внаслідок механічних взаємодій локальні нагрівання (т. зв. гарячі точки), а також вступають своєю поверхнею у взаємодію з вибуховим складом, утворюючи на поверхні скла силанольні групи під час контакту з водою, які можуть діяти як активні каталітичні центри, сприяючи збільшенню швидкості термічного розкладу.

Досліджено вплив усіченої конічної форми проміжних детонаторів на їхню ініціюючу здатність. Встановлено, що застосування проміжних детонаторів з кутом конусності від 15° до 45° сприяє концентрації імпульсу хвилі детонації вздовж його осі. Це дозволяє забезпечити кращу ініціюючу здатність, що підтверджено встановленням стійкої швидкості детонації свердловинних зарядів на незначній відстані від точки ініціювання. У цьому розумінні конусність компенсує залежність ініціюючої здатності ПД від його діаметра порівняно з циліндричним ПД тієї ж маси, тобто конусність знижує цю залежність. Збільшення максимальної енергії ініціювання конічними ПД дозволить вибрати безпечні композиції, основною умовою яких є низькі значення критичного діаметра детонації, що забезпечує надійне «спрацьовування» від штатних ЕД.

Запропоновано такий склад на основі суміші подрібненої аміачної селітри з нітрометаном у співвідношенні 85–80 до 15–20. Склад має швидкість детонації 3,0–3,3 км/сек, критичний діаметр детонації 6–7 мм. Виготовлення вибухового складу пропонується проводити на місцях проведення підривних робіт шляхом змішування невибухових компонентів – аміачної селітри та нітрометану у наведеному співвідношенні.

Наведене означає, що управління динамікою та напрямом розвитку силового поля можливе шляхом вибору місця розташування ініціатора з протилежної основи заряду для розвитку процесу в потрібному напрямку зосередження енергії вибуху. Характерним елементом процесу є формування силового поля на осі конусного заряду. У напрямку поширення детонаційного процесу в часі у силовому полі по осі конуса спочатку формується випереджальний імпульс. Надалі цей імпульс і силове поле припиняє свій розвиток вздовж осі та починає розширюватися у бічному напрямку. Фактично цей процес виглядає як бічне вклинювання силового потоку в середовище в області розташування вузької основи конуса. В цілому поетапний аналіз розвитку силового поля показує, що його конфігурація насамперед визначається формою самого заряду і менше залежить від умов ініціювання, маючи характерний для цієї форми заряду центральний сплеск уздовж осі конуса, відмінний від форми поля при вибуху циліндричного заряду.

На інтенсивність розвитку силового поля від вибуху конусного заряду також впливає місце та напрямок розвитку детонаційного процесу. Ініціювання у кожному варіанті відбувається з широкої основи зрізаного конуса у напрямку вузької основи. У цьому варіанті ініціювання виразніше проявляє вплив бічних похилих поверхонь заряду. Особливості ефектів, що при цьому спостерігаються, можуть бути використані у технологіях, де місцевий механічний ефект вибуху відіграє домінуючу роль.

Встановлено, що при ініціюванні свердловинного заряду зерногранулiту 79/21 як потужним ПД шашкою Т-400Г, так і конічним ПД низької потужності (у режимі недостиглої детонації) вихід на стаціонарну швидкість детонації відбувається на однаковій відстані від точки ініціювання і підтверджує, що конічний заряд ПД рекомендованого складу при масі меншій, ніж при ПД циліндричної форми, забезпечує стабільну ініціюючу здатність.

РОЗДІЛ 5. ОСНОВИ ПОБУДОВИ БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ВИБУХОВИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1 Розробка вітчизняних сумішевих вибухових речовин підвищеної безпеки для БПР на кар'єрах

Наукові дослідження, спрямовані на вивчення детонаційних процесів у низькошвидкісних режимах, за кінцеву мету мають розробку методів і засобів максимально ефективної з експлуатаційної точки зору передачі певної частини потенційної енергії заряду промислової ВР руйнованому середовищу. Таким чином, заряд промислової вибухової речовини є кінцевою ланкою, якій адресуються ці дослідження. Історія розвитку вибухової справи в гірництві свідчить про переважаючий інтерес дослідників саме до створення нових ПВР, адаптованих до певних, часто специфічних геологічних умов. Вершиною цих розробок стало створення ПВР на основі емульсій типу «вода в олії». Особливості виготовлення цієї універсальної промислової ВР дозволяє змінювати її детонаційні характеристики в широких межах залежно від умов використання і поставлених завдань.

Розробка технології отримання вибухових речовин промислового емульсійного II класу є одним з пріоритетних напрямків вдосконалення техніки і технології ведення масових вибухів на відкритій поверхні [160, 218].

США почали випускати емульсійні вибухові речовини (ЕВР) з середини 60-х років. За 1969–1983 рр. на ЕВР було видано понад 70 патентів.

Найбільшим досвідом у розробці технології та виробництві ЕВР, їх поширенні мають США, Швеція, Канада, Іспанія, Німеччина.

Висока фізична стабільність, підвищена вибухова здатність, низька, порівняно з традиційними ВР, токсичність газів вибуху, можливість у широких межах змінювати рецептуру та характеристики, широкий діапазон умов використання, доступність та дешевизна сировини, висока безпека виготовлення та застосування є причинами того, що ЕВВ визнані в зарубіжних країнах одними з

найбільш перспективних, а обсяги та сфери їх застосування постійно розширюються.

Емульсійні вибухові речовини, що в основі мають емульсії типу «вода в олії» і складаються в основному з водного розчину неорганічного окислювача (аміачної селітри), який у вигляді дрібних крапель є дисперсною фазою, і рідкого пального, що є безперервною фазою. Важливим компонентом ЕВР є емульгатор, оскільки від його ефективності залежить стабільність емульсії.

Компоненти суміші підвищують і знижують чутливість та інші компоненти для створення потрібної консистенції й вибухових властивостей. ЕВР виробляють різні фірми США – «Дюпон», «Івеко-Кемікелз», «Атлас Паудер», «Остін Паудер» та ін.

У колишньому СРСР були створені ЕВР, названі поремітами, в яких як горюча добавка застосовано паливний мазут, пізніше замінений рідкою мінеральною олією, аналогічною застосовуваним у зарубіжних вибухових складах. Пореміти містять у своєму складі енергетичні домішки у вигляді гранулотолу, дисперсного алюмінію, феросиліцію, конверсійних бездимних порохів.

У СРСР було створено дослідне виробництво для отримання ЕВР Емульсен-П. Емульсен-П – це промислова ВР 1 класу, що є зворотною емульсією водного розчину аміачної та натрієвої селітр у нафтопродукті, сенсибілізовану порохом піроксиліновим зерненим [161–162]. Емульсен-П застосовується лише у патронованому вигляді.

Вартість ЕВР порівняно з вартістю штатних ВР в системі детонаційних явищ у 1,3 рази менша, а витрати на буропідривні роботи при його використанні для вибухового руйнування знижуються на 40 %. Безпека та екологічна чистота сучасних технологічних процесів виробництва ВР підвищує їх привабливість для впровадження в Україні, Азербайджані та інших країнах пострадянського простору [163–164].

В Україні розроблено ЕВР Емульхім-ШМ (ШМ – Шостка Модернізований), що є емульсією розчину аміачної та натрієвої селітр у нафтопродукті (індустріальній олії) із сенсибілізуючою домішкою.

Емульсія (матриця) є желеподібною масою жовто-коричневого кольору з динамічною в'язкістю 54,5 Па.с. Матриця не є вибуховою речовиною. Як сенсибілізатор емульсії використовується перлітовий пісок або мікросфери в кількості 2,5 %. Рецептура Емульхім-ШМ збалансована за кисневим балансом. Так, порівняно з грамонітом 79/21, Емульхім-ШМ має більш високий вміст водяної пари та низький вміст монооксиду вуглецю СО. Це є високим ступенем завершеності хімічної реакції ЕВР при вибуховому перетворенні, яка за розрахунками сягає 97 %. Швидкість детонації Емульхім-ШМ становить 4,8 км/с, критичний діаметр детонації у паперовій оболонці 35–45 мм, тоді як швидкість детонації штатної промислової ВР грамоніту 79/21 становить 3,2–3,6 км/с, критичний діаметр детонації – 50–70 мм. Заряди Емульхім-ШМ пройшли комплекс випробувань вибухових характеристик, одна зі схем проведення випробувань зарядів ЕВР наведена на рис. 5.1.

Розроблено Директивний технологічний процес отримання Емульхім-ШМ [165]. На Рубіжанському Казенному Хімічному заводі РКХЗ «Зоря» було створено виробництво Емульхім-ШМ з розрахунковою продуктивністю 20 тис. т на рік. Здійснено відпрацювання технології отримання Емульхім-ШМ на діючому обладнанні та проведено контрольні випробування отриманих зразків.

Емульхім-ШМ було передбачено випускати в патронованому (патрон діаметром 120–240 мм) і непатронованому вигляді (упаковка в поліпропіленові мішки з поліетиленовою вкладкою), (рис. 5.2).

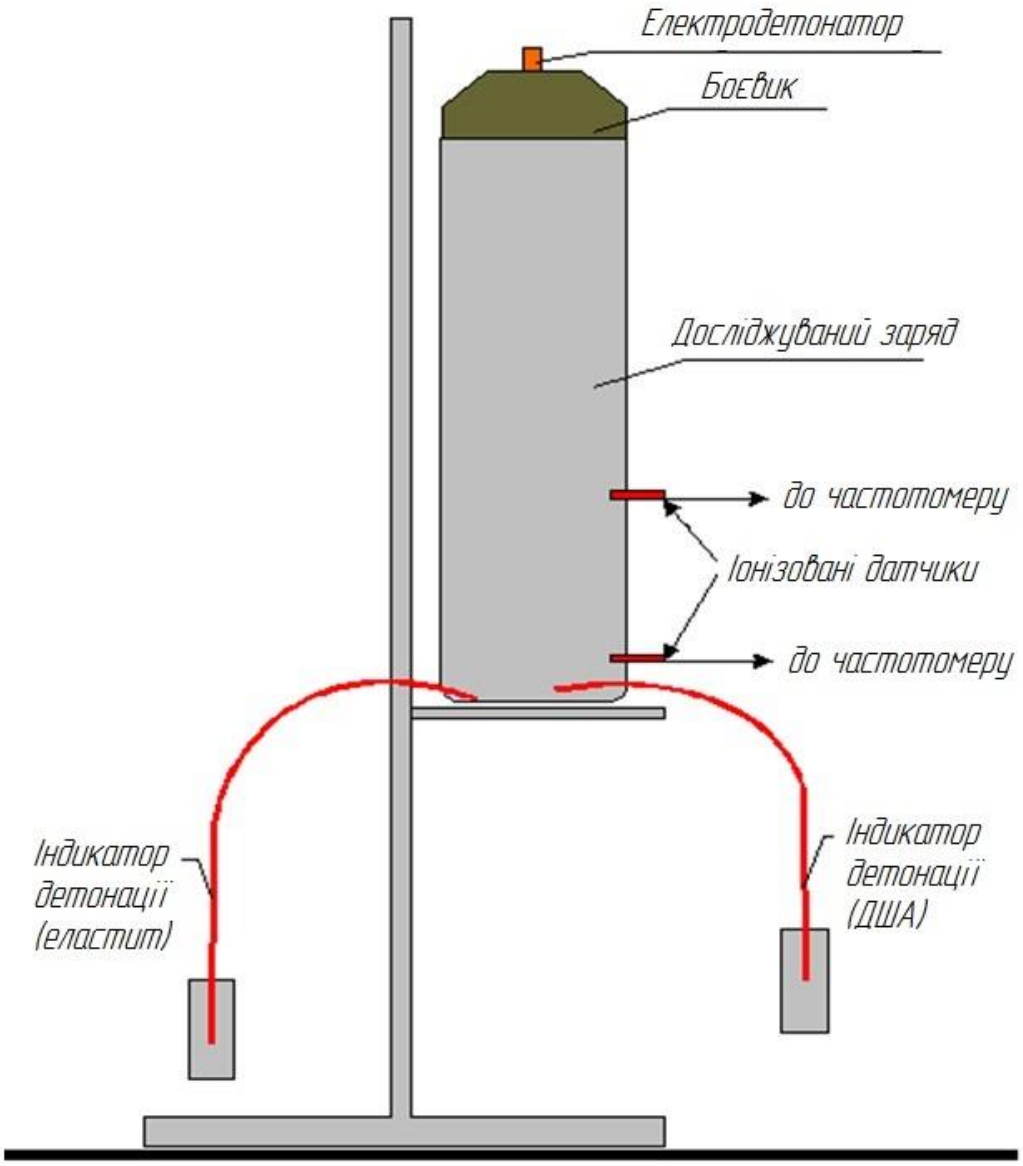


Рис. 5.1. Схема проведення випробувань зарядів ЕВР на швидкість детонації



Рис. 5.2. Патроновані заряди Емульхім-ШМ

На РКХЗ «Зоря» напрацьовано дослідні партії Емульхім-ШМ.

На підприємстві «Кривбасвибухпром» було проведено приймальні випробування Емульхім-ШМ. За результатами приймальних випробувань складено акт, у якому надано рекомендації про допуск Емульхім-ШМ до постійного застосування для проведення вибухових робіт.

Технічні умови на Емульхім-ШМ затверджено та узгоджено Держстандартом, а ЕВР допущено до постійного застосування.

Прийнято в експлуатацію ЕВР «Україніт» розробки Національної Гірничої Академії України та «Анімікс» розробки Криворізького «Інтервибухпром» [218]. Створено цехи з виробництва цих ЕВР (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Цех із виробництва ЕВР «Анімікс»

Сировинна база ЕВР в Україні не обмежена: аміачна і натрієва селітри випускаються у необхідній кількості; дизельне паливо або олія індустріальна або олії інших марок продукуються. Щодо емульгаторів, вони випускаються багатьма фірмами, наприклад, «Барва» Івано-Франківськ, однак розробники ЕВР для своїх рецептур розробляють свої рецепти емульгаторів:

для Україніту-Д – це поліетиленгліколеві ефіри рослинного чи тваринного походження;

для Емульхім-ШМ – спочатку застосовували аміди кислот легкої талової олії та амінонітрилу з оксиетильованими жирними кислотами ріпакової олії, а потім перейшли на продукт конденсації олеїнової кислоти з пентаеритритом з додаванням їдкого натру.

Емульгатор на основі олеїнової кислоти і пентаеритриту забезпечує якість і вибухові характеристики ЕВР Емульхім-ШМ практично на одному рівні з емульгатором фірми «Лубризол».

Важливим компонентом ЕВР є сенсибілізатор. Так, застосування мікросфер як сенсибілізатора підвищує вартість ЕВР вдвічі, тобто вартість мікросфер (їх вміст у ЕВР становить до 2–2,5 %) дорівнює вартості емульсійної матриці. Крім того, в Україні немає спеціального виробництва мікросфер. Застосування перлітового піску має свої труднощі, тому що необхідно підбирати перліт з необхідною пористістю для кожної ЕВР. Як показує досвід, при тривалому зберіганні або знаходженні у свердловинах можливе заповнення порожнин перліту емульсійною матрицею, що призводить до погіршення вибухових характеристик ЕВР.

Цікаві як сенсибілізатори газогенеруючі домішки (ГГД) типу нітриту натрію, тіоціанату натрію. На нашу думку, зазначені домішки найбільш підходять для ЕВР з високою в’язкістю (наприклад, Емульхім-ШМ), тому що в низьков’язких ЕВР бульбашки газу не можуть зберігатися тривалий час. ГГД економічно вигідні, проте нітрит натрію є токсичним продуктом.

До недоліків ЕВР потрібно зарахувати їх низьку калорійність, тому варто як сенсибілізатор застосовувати порошок, наприклад, алюмінію, за допомогою якого можна регулювати потужність ЕВР. Однак порошок алюмінію надто дорогий.

Одним із шляхів сенсибілізації є застосування конверсійних ВР. У роботах Шосткинського інституту СумДУ показано можливість сенсибілізації ЕВР зазначеними ВР [163] та регулювання енергетичних та вибухових характеристик у широкому діапазоні. Проведено дослідно-лабораторні випробування.

На сьогодні в Україні немає змішувально-зарядних машин (ЗЗМ) для доставки та заряджання свердловин високов'язкими ЕВР. Для низьков'язких ЕВР Україніт-Д, Україніт-ПП-2 в даний час застосовують ЗЗМ «Акватол-3», «Україніт-5», призначені для приготування, доставки та заряджання свердловин водонаповненими ВР типу Акватол Т-20Г (рис. 5.4) [218].



Рис. 5.4. Змішувально-зарядна машина серії Україніт-5 [218].

Змішувально-зарядна машина «Україніт-5» виготовлена за ТУ У 29.5-23647075-009:2006 [166] призначена для транспортування емульсійної композиції (ЕК) та ГГД до місця заряджання, роздільної подачі цих вибухобезпечних

компонентів насосом-дозатором через зарядний шланг у сухі або обводнені свердловини діаметром не менше 110 мм та глибиною до 30 м з отриманням емульсійної вибухової речовини – Україніт-ПП-2 марки Б за ТУ У 24.6-00190934-005:2006 безпосередньо у свердловині. ЗЗМ «Україніт-5» виконання – 02 комплектується насосом для перекачування ЕК в інші ЗЗМ або дозаправлення власного бункера ЕК.

ЗЗМ виконано на базі вітчизняного шасі КРАЗ-65101 комплектації 414 із встановленим модернізованим навісним обладнанням змішувально-зарядної машини «Акватол-1уГ».

ЗЗМ складається з:

- бункера ЕК,

- ємності для ГГД,

-шланговитягувача з пристроєм укладання витків зарядного шланга,

- гідрообладнання,

-поршневого насоса-дозатора подвійної дії подачі компонентів ЕВВ з пристроєм для введення ГГД,

- перекачуючого насоса,

- електрообладнання,

- блоку автомата.

Для обігрівання в зимовий час тракта проходження ГГД та насоса-дозатора ємність ГГД та насос-дозатор вмонтовані у теплоізольований кожух із системою обігріву.

Однак високов’язкі ЕВР типу Емульхім-ШМ, Пауергель цими машинами перекачуватися не можуть (хоча водночас ЕВР високої в’язкості мають перевагу перед ЕВР Україніт в тому, що в тріщинуватих породах ЕВР не буде проникати у тріщини, чим збільшується їх ККД і покращується екологія, оскільки виключається очікування в подрібненому блоці не прореагованої ЕВР).

Для цього потрібна розробка спеціальних ЗЗМ з гвинтовими насосами для перекачування ЕВР. За наявності ЗЗМ для високов’язких ЕВР Україна могла б забезпечити виробництво ЕВР на вітчизняній сировині та базі (на зразок ЕВР

Емульхім-ШМ) у необхідному обсязі. 3-4 таких виробництва могли б забезпечити Україну безпечною екологічно чистою ЕВР місцевого виготовлення (рис. 5.5). Для задоволення потреб гірничодобувної промисловості Азербайджанської Республіки достатньо створення однієї подібної виробничої ділянки. Автором спільно з азербайджанськими колегами розроблено ЕВР «Азнітро», яий було запатентовано в Україні [224] та впроваджено у виробництво в Республіці Азербайджан.



Рис. 5.5. Масовий вибух за участі ЕВР на залізорудному кар'єрі, м. Кривий Ріг

5.2 Розробка промислової емульсійної вибухової речовини «Азнітро»

Розробка належить до галузі хімії й технології промислових вибухових речовин і може бути використана для вибухових робіт в гірничій інженерії для видобування корисних копалин.

Широко застосовувані останнім часом в гірничодобувній промисловості емульсійні вибухові речовини (ЕВР) є зворотними емульсіями водних розчинів неорганічних нітратів (аміачної, кальцієвої або натрієвої селітри) у

вуглеводневому середовищі. Емульсійні композиції мало чутливі до зовнішніх фізичних впливів і здатні детонувати лише при введенні в них сенсибілізаторів.

При розробці нової ЕВР «Азнітро» було розглянуто низку існуючих прототипів. Перший з них склад ЕВР [219], який містить (мас. %):

селітру натрієву (або кальцієву) – 15,6–17,1

воду – 13,6–14,4

пальне (індустріальне масло або мазут) – 4,3–8,6

емульгатор – ефіри пентаеритриту і жирних кислот талієвого масла – 1,7–3,4

плавкі вуглеводні, наприклад, парафін – 0,2–3,0

сенсибілізатор – 0,2–2,0

аміачна селітра – решта.

Недоліком цього емульсійного складу є низька стабільність, не більш 15 днів, тобто після цього строку селітра починає розкладатися. Склад зберігає свою властивість протягом не більш 10–14 днів, водночас змінюються не лише стабільність, а і вибухові характеристики.

Найбільш близьким по технічній сутності і призначенню до заявленого винаходу є український емульсійний склад [220], який надалі вважати Прототипом. Склад містить (мас. %):

натрієву або кальцієву селітри, або їх суміш – 9–11

карбамід – 3–5

індустріальне масло – 3,5–4,7

бутилкаучук – 0,1–0,5

амід кислоти легкого талієвого масла і амін нітрилу – 1,6–2,9

оксиетильовані жирні кислоти рапсового масла – 0,6–0,9

сенсибілізатор – 1,5–2,0

вода – 15,6–17,6

аміачна селітра – решта.

Стабільність таких складів дуже залежить від якості емульгатора і для даного складу стабільність емульсії без розшарування і викристалізації становить

не більше 10 днів. Це є недоліком складу, оскільки він не може довго зберігати свою стабільність і втрачає свої властивості, особливо вибухові [231, 242, 244].

В основу розробки було поставлено завдання опрацювати емульсійний вибуховий склад, у якому заміна складових компонентів, дозволила б забезпечити підвищення стабільності при тривалому зберіганні.

Розроблена ЕВР «Азнітро» вміщує аміачну селітру, індустріальну олію та воду за складом відрізняється тим, що додатково включає оцтову кислоту, дизельне паливо, газогенеруючу домішу, емульгатор. Як емульгатор використовується лубризол, який є поверхнево-актвною речовиною з амінними і кисневмісними функціональними групами при наступному співвідношенні компонентів, (мас. %):

оцтова кислота – 0,17–0,23

емульгатор – 1,2–1,6

масло індустріальне – 3,5–4,7

дизельне паливо – 1,2

газогенеруюча добавка ГГД – 0,1–0,2

вода – 9,1–12,3

аміачна селітра – решта, до 100 %.

Газогенеруюча домішка є водним розчином нітриту натрію 23 % і тіоционату натрію 23 % і води 54 %.

Дослідні зразки ЕВР «Азнітро» трьох типів № 1, № 2, № 3 готували в лабораторно-дослідному обладнанні, яке складається із двох реакторів для приготування розчинів окислювача – вологої аміачної селітри та горючої фази (розчину емульгатора в дизельному паливі або індустріальній олії). Приготування емульсії проводили в емульсифікаторі, який є реактором з обігрівом, споряджений мішалкою з кількістю обертів 1150 об/хв при температурі 60 °С протягом 10 хвилин. Горючу фазу при безперервному перемішуванні повільно вводили тонкою цівкою в емульсифікатор з підтримкою температури на рівні 60 °С. Після закінчення дозування перемішування проводили ще 5 хвилин і потім вивантажували готову емульсію (матрицю). Сенсибілізацію емульсійної матриці

проводили в горизонтальному апараті з мішалками шляхом введення газогенеруючої домішки.

Виготовлені дослідні зразки емульсійної вибухової речовини («Азнітро» № 1, № 2, № 3) з різним вмістом компонентів у масових відсотках стали основою для трьох можливих типів ЕВР, табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Вміст компонентів ЕВР «Азнітро»

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

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

Стабільність ЕВР «Азнітро» оцінювали за відсутністю викристалізації аміачної селітри або розшарування компонентів (за збереження консистенції) після встановленого терміну зберігання.

Розроблена ЕВР зберігала свою стабільність впродовж місяця.

Критичний діаметр оцінювали методом конуса. Паперовий конус з кутом конусності 5° при вершині заповнювався ЕВР і підривався штатним засобом ініціювання – тротиловою шашкою Т-400Г. За залишком неспрацьованої (не підірваної) частин конуса оцінювали значення критичного діаметра ЕВР. Оцінку повноти детонації проводили в паперових циліндрах діаметром більше критичного. Дані досліджень наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Фізико-хімічні та вибухові характеристики ЕВР «Азнітро»

Характеристика	Марки ВР			
	Азнітро № 1	Азнітро № 2	Азнітро № 3	Прототип
Кисневий баланс, %	- 2,51	-2,32	-3,42	-1,08
Стабільність, діб	30	30	30	12
Швидкість детонації, м/с	5360	5440	5430	4800
Критичний діаметр детонації, мм	25	24	24	70
Щільність, г/см^3	1,2	1,2	1,2	1,15

Із таблиці видно, що якість емульгатора лубризола в заявленій емульсійній вибуховій речовині дозволяє збільшити її стабільність до 30 діб. Крім того, це дозволяє поліпшити вибухові характеристики – швидкість детонації та критичний діаметр детонації.

Енергія Гіббса для ЕВР «Азнітро» прораховувалася з урахуванням наступного рівняння хімічної реакції:

$C_2H_8N_2+8N_2H_4O_3=2CO_2+20H_2O+N_2$

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 5.6, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 5.7. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 9.

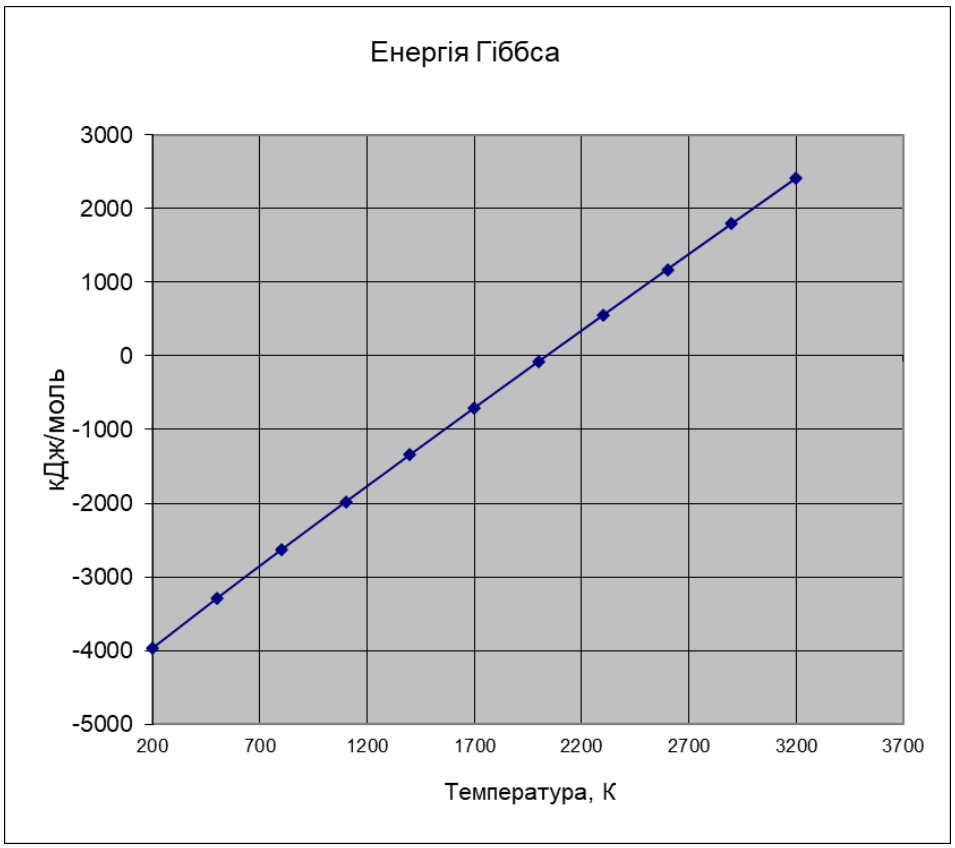


Рис. 5.6. Залежність зміни енергії Гіббса аміачної селітри та нітрометану від температури

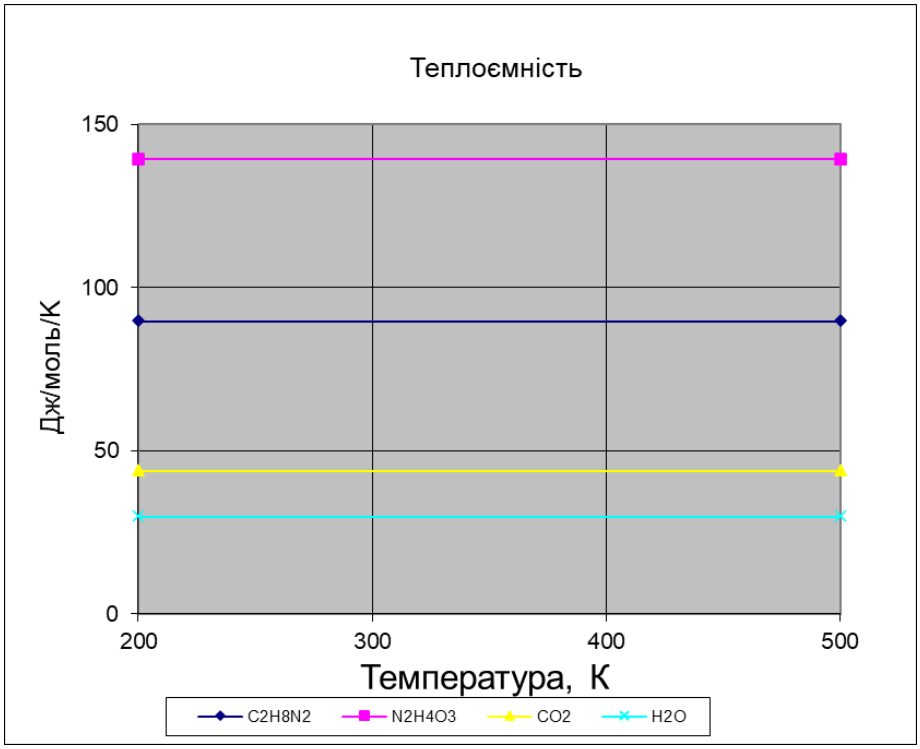


Рис. 5.7. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі аміачної селітри та нітрометану

Емульсійна ВР «Азнітро» є сумішшю аміачної селітри і дизпалива з мастилом індустріальним та іншими додатками. Зазвичай під цим терміном розуміють паливо, що виходить із гасово-газойлевих фракцій прямої перегонки нафти. Гас – горюча суміш рідких вуглеводнів від C_8 до C_{15}. Газойль (гасове мастило) – фракція нафти, застосовувана переважно як паливо для дизелів і як сировина для каталітичного крекінгу суміші вуглеводнів різної будови, переважно C_{12}–C_{35}, і домішок.

Стандартна пропорція для гасово-газойлевих сумішей прийнята на виробництвах становить $C_2H_8N_2$, її й приймаємо для розрахунків. Зміна знаку енергії Гіббса у точці 2015 К свідчить про достатньо стабільні вибухові характеристики розглянутої ЕВР та її високу потужність.

Низький критичний діаметр детонації ЕВР «Азнітро», який становить 24–25 мм, надає можливість використовувати цю вибухову речовину у зарядах малого діаметра в умовах низько швидкісного режиму детонації.

Автор брав участь у розробці виробництва ЕВР у Республіці Азербайджан. Директивний технологічний процес виробництва емульсійної вибухової речовини Геоніт (HANFO) та сумішевої вибухової речовини, гранулита Ігданіт (ANFO) розміщено у Додатку 15.

Акт впровадження ЕВР Азнітро у Республіці Азербайджан розміщено у Додатку 16.

5.3 Визначення ризиків при транспортуванні та зарядженні ЕВР

Існує тверде переконання, що у зв’язку з відсутністю у складі емульсійних вибухових речовин будь-яких вибухонебезпечних компонентів, наявністю значної кількості води та текучої консистенції, це виробництво матиме надзвичайно високий рівень безпеки. Незважаючи на видиму безпеку емульсійної технології, важливо пам’ятати, що будь-яка суміш окислювача та палива потенційно вибухонебезпечна і ймовірність виникнення небезпечної ситуації й тяжкість її наслідків залежить від чутливості продукту до різного роду впливів, враховуючи випадкові, хімічної сумісності компонентів, характеру та інтенсивності

технологічних дій, конструкції обладнання, ЗЗМ та ухвалених проєктних рішень. Як показує аналіз статистики аварій на виробництві водовмісних вибухових речовин, більшість випадків пов’язані з процесами перекачування емульсійної матриці [247, 248].

Відомі випадки займання ЕВР, які не спричинили тяжких наслідків, вигоряння ущільнення в насосі з перекачування розчину окислювача, займання колеса змішувально-зарядної машини при транспортуванні компонентів ЕВР та інше. Як правило, аварія не є наслідком однієї причини. Звичайно, виявляється цілий комплекс факторів технічного, організаційного та психологічного характеру, які спричинили аварію та визначили тяжкість її наслідків.

Транспортування емульсії ЕВР здійснюється при температурі СЗМ близько 70–80 °С. Клас 5.1 передбачає ризики пожежонебезпеки при транспортуванні та зарядці свердловин. Варто враховувати, що температура екзотермічного розкладання ЕВР Україніт-ПП-2Б становить 190 ºС.

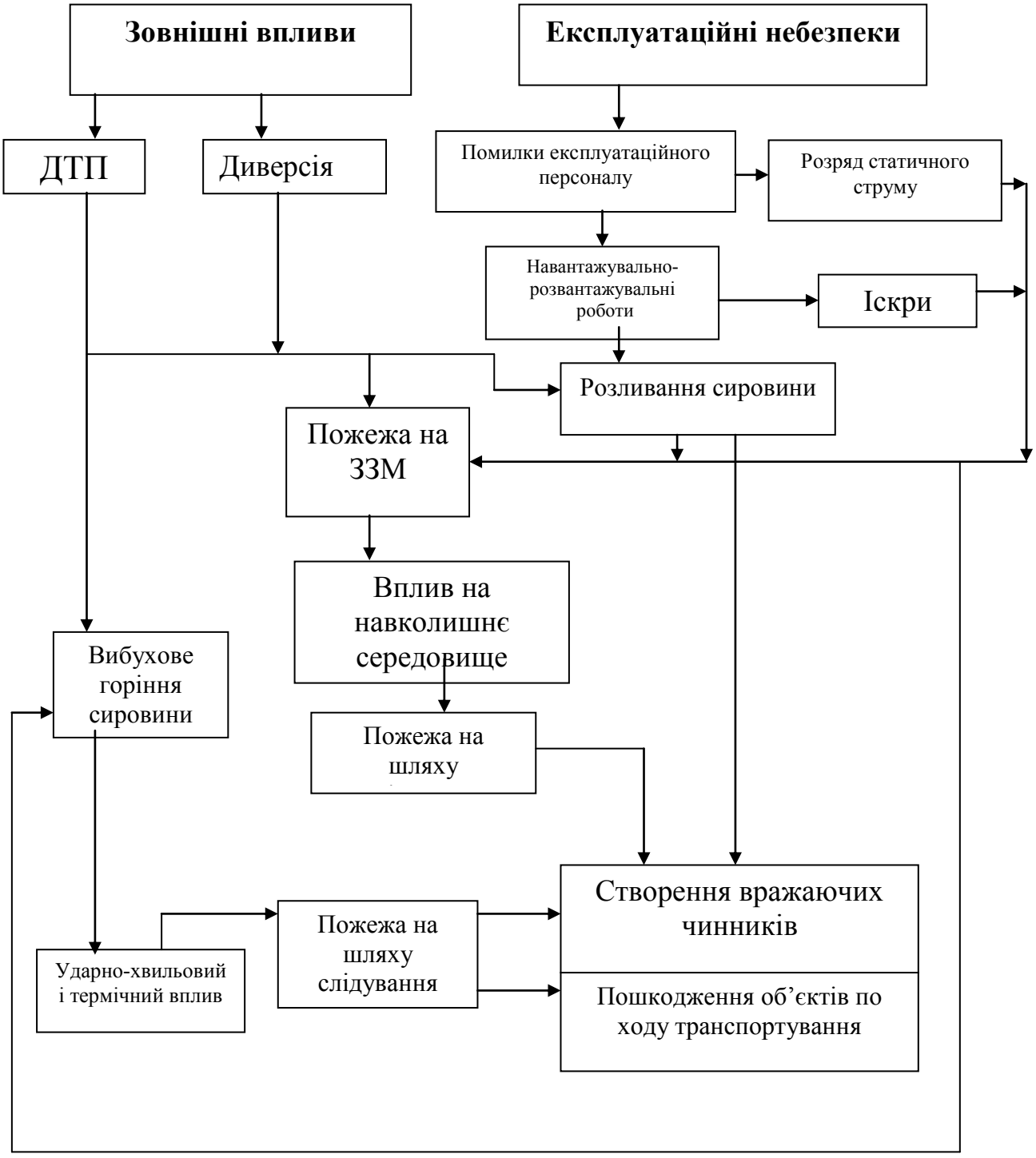


Рис. 5.8. Типовий сценарій виникнення та розвитку аварійної ситуації при зарядженні емульсії ЕВР

Розрахунок ймовірності враження об’єкта (ЗЗМ) блискавкою.

Імовірність розряду атмосферної електрики на об'єкті (ЗЗМ) визначаємо за формулою 5.1:

$$P_1 = 1 - \prod_{n=1}^{2} [1 - P(C_n)], \quad (5.1)$$

де P(Cn) – ймовірність реалізації будь-якої із Cn причин, наведених нижче;

n – порядковий номер причини;

$P(C_1)$ – ймовірність ураження *i*-го елемента об'єкта блискавкою протягом року;

$P(C_2)$ – ймовірність вторинного впливу блискавки на *i*-й елемент об'єкта протягом року.

Враження об'єкта блискавкою можливе при спільній реалізації двох подій: прямого удару блискавки (подія t_2) та наявність несправності, неправильного конструктивного виконання або відмови блискавковідводу (подія t_1).

Імовірність $P(C_1)$ обчислюємо за такою формулою 5.2:

$$P(C_1) = P(t_1) \cdot P(t_2), \quad (5.2)$$

де $P(t_1)$ – ймовірність наявності несправності, неправильного конструктивного виконання або відмови блискавковідводу, що захищає *i*-й елемент об'єкта;

$P(t_2)$ – ймовірність прямого удару блискавки в *i*-й елемент об'єкта протягом року.

Імовірність $P(t_2)$ прямого удару блискавки в об'єкт (ЗЗМ) обчислюють за такою формулою 5.3:

$$P(t_2) = 1 - e^{-N_{ум} \cdot \tau_p}, \quad (5.3)$$

де Nум – кількість прямих ударів блискавки в об'єкт протягом року, формула 5.4;

τ_p – тривалість періоду спостережень, рік.

$$N_{ум} = (S + 6H)(L + 6H) \cdot n_y \cdot 10^{-6}, \quad (5.4)$$

де S – довжина об'єкта, м;

L – ширина об'єкта, м;

H – найбільша висота об'єкта, м;

n_y – середня кількість ударів блискавки на 1 км^2 земної поверхні.

Габарити ЗЗМ беремо pf найбільшою ЗЗМ-4.

$$N_{ум} = (8{,}2 + 6 \cdot 3{,}8)(4{,}2 + 6 \cdot 3{,}8) \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 0{,}00586$$

$$P(t_2) = 1 - e^{-0{,}00586} = 0{,}004609$$

Вірогідність $P(t_1)$ визначаємо за формулою 5.5:

$$P(t_1) = \frac{k_\sigma}{\tau_p} \sum_{j=l}^{m} \tau_l + (1 - \beta), \qquad (5.5)$$

де k – коефіцієнт безпеки; $k\sigma = 1$;

τ_p – аналізований період часу, хв;

τ_l – час існування несправності блискавковідведення при *j*-й її реалізації протягом року, хв;

β – ймовірність безвідмовної роботи блискавкозахисту; (β = 0,995)

$$\tau_{l(рік)} = 365 \cdot 24 \cdot 60 = 525600 (хв)$$

$$P(t_1) = \frac{1}{525600} 0.1 + (1 - 0.995) = 2 \cdot 10^{-7}$$

$$P(C_1) = P(t_1) \cdot P(t_2) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}004609 = 9{,}22 \cdot 10^{-10} \text{ рік}^{-1}$$

Вірогідність $P(C_2)$ вторинного впливу блискавки на об'єкт визначаємо за формулою 5.6:

$$P(C_2) = P(t_2) \cdot P(t_3) \qquad (5.6)$$

де $P(t_2)$ – вірогідність відмови захисного заземлення протягом року;

$P(t_3) = 2 \cdot 10^{-5}$

$$P(t_2) = 1 - e^{-N_{ум} \cdot \tau_p}$$

$$(8{,}2 + 6 \cdot 3{,}8 + 100)(4{,}2 + 6 \cdot 3{,}8 + 100) \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 0{,}116459$$

$$P(t_2) = 1 - e^{-0.116459} = 0{,}10438$$

$$P(C_2) = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}10438 = 2{,}09 \cdot 10^{-6}$$

$$P_1 = 1 - \prod_{n=1} [1 - P(C_1)] \cdot [1 - P(C_2)] = 1 - [1 - 9{,}22 \cdot 10^{-10}] \cdot [1 - 2{,}09 \cdot 10^{-6}] = 2{,}091 \cdot 10^{-6}\ рік^{-1}$$

Розрахунок ймовірності виникнення аварії на ЗЗМ від механічного удару.

Імовірність настання небажаної події (наприклад, зіткнення ЗЗМ з іншим автомобілем) визначається статистично, формула 5.7:

$$P_2 = 1 - e^{-\lambda} \qquad (5.7)$$

де λ – сумарна інтенсивність аварійних ситуацій;

$$\lambda = \frac{1}{T}$$

Т – строк безаварійної експлуатації автомобіля (прийнято 15 років) у годинах (131040 годин).

$$P_2 = 1 - e^{-0{,}0000023} = 2{,}3 \cdot 10^{-6}\ рік^{-1}$$

Розрахунок ймовірності виникнення аварії на об’єкті внаслідок диверсії.

За статистичними даними прийнято:

ймовірність диверсії:

- у мирний час – 10^{-8} рік$^{-1}$
- у воєнний час – 10^{-6} рік$^{-1}$

Приймаємо $P_3 = 10^{-6}$ рік$^{-1}$

Імовірність виникнення аварії під час експлуатації.

Відповідно до статистико-імовірнісних розрахунків небезпеки перевезення хімічних вантажів, ймовірність аварії (R_4) становить:

$R_4 = 3 \cdot 10^{-5}$ рік$^{-1}$

З усіх розглянутих аварій, що виникають внаслідок зовнішніх впливів, найвірогіднішою є аварія, пов’язана з експлуатацією ЗЗМ:

$Qi = 3 \cdot 10^{-5}$ рік$^{-1}$

Оцінка ризику можливих наслідків аварій.

Кожна небажана подія може відбутися до певної жертви – об’єкта ризику. Співвідношення об’єктів ризику та небажаних подій дозволяє розрізняти індивідуальний, технічний, екологічний, соціальний та економічний ризик.

Кожен вид ризику зумовлюють характерні джерела та чинники ризику, класифікація та характеристики яких наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Чинники ризику

Вид ризику	Об’єкт ризику	Джерело ризику	Небажані події
1	2	3	4
Індивідуальний	Людина	Умови життєдіяльності людини	Захворювання, травма, інфекція, смерть
Технічний	Технічні системи та об’єкти	Технічна недосконалість, порушення правил експлуатації технічних систем та об'єктів	Аварія, вибух, катастрофа, пожежа, руйнування
Екологічний	Екологічні системи	Антропологічне втручання в природне середовище, техногенні надзвичайні ситуації	Антропогенні, екологічні катастрофи, екологічні лиха
Соціальний	Соціальні групи	Надзвичайна ситуація, зниження якості життя	Групові травми, захворювання, загибель людей, зростання смертності
Економічний	Матеріальні ресурси	Підвищена небезпека виробництва або природного середовища	Збільшення витрат на безпеку. Збитки від недостатнього захисту

Вражаючі чинники великомасштабної аварії можуть мати негативні на об’єкти «турботи» суспільства. У цьому випадку, враховуючи зони дії факторів ризику, що вражають, об’єктом турботи є людина або соціальна група, для яких індивідуальний або соціальний ризик досягає певного травмування, загибелі людей, які знаходиться в даному регіоні, від можливих джерел небезпеки на об’єкті підвищеної небезпеки.

Величину індивідуального ризику отримати смертельне враження розраховуємо за такою формулою 5.8:

$$R_i = Q_i \cdot Q_{in}, \quad (5.8)$$

де Q_i – ймовірність виникнення аварії з вибухом продукції на небезпечному об'єкті становить: Qi = $3 \cdot 10^{-5}$ рік$^{-1}$

Q_{in} – умовна ймовірність ураження людини надлишковим тиском з віддаленням R від центру події. Смертельне враження людини можливе при надмірному тиску ударної хвилі Р = 60 кПа.

$Q_{in} = 0$

$R_{im} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 0 = 0$ рік$^{-1}$

Соціальний ризик – ймовірність загибелі людей понад певну кількість (або очікувану кількість загиблих) у цьому регіоні протягом року від можливих джерел небезпеки з урахуванням ймовірності їх перебування в зоні враження.

Оскільки дія вражаючих факторів великомасштабної аварії при перевезенні, завантаженні, заряджанні емульсії ЕВР (займання всього обсягу емульсії, з можливим переходом у вибухове горіння) здатних призвести до смертельного наслідку, поширюється лише по території підприємства або кар'єру і не торкається об'єктів «турботи» суспільства, соціальний ризик від аварії цього типу дорівнює 0.

5.4 Безпека технологічних процесів виробництва вибухових матеріалів

Оцінка безпеки технологічного процесу при виробництві вибухових матеріалів (ВМ) і засобів ініціювання (ЗІ) є важливою частиною проєктування виробництв промислових вибухових речовин (ВР) та систем їх ініціювання [167–169]. Вона ґрунтується на порівнянні рівня вибухових властивостей матеріалу, що переробляється, тобто визначенні умов досягнення критичних параметрів впливів, що призводять до початкового осередку загоряння і розвитку вибухових процесів, з одного боку, і рівнем впливів на ВМ і ЗІ вироблених у процесі його переробки, з іншого боку [170–172, 251, 256, 261]. Останній забезпечується надійністю і

точністю роботи технологічних апаратів і контрольно-вимірювальних приладів. Точність апаратів і приладів та їхня надійність визначають не лише якість виготовлених із ВМ виробів, але і безпеку їхньої переробки. Наприклад, на первісному етапі відпрацьовування змішувальних апаратів для приготування паливних мас використовували дозуючі (для компонентів) пристрої високої точності, але, як з'ясувалося, з недостатнім для забезпечення технологічного циклу виготовлення виробу часом роботи на відмову (низька надійність). Таким чином, у процесі роботи могла відбуватися зміна співвідношень компонентів палива з утворенням системи, що володіє підвищеним рівнем вибухонебезпечних властивостей, тобто утворенням системи з більш високою ймовірністю виникнення аварійної ситуації (що, природно, могло відбуватися і при недостатній точності цих пристроїв). Доробка дозуючих пристроїв у частині їхньої безвідмовності (надійності) підвищили вибухову безпеку виробництва даного класу палив.

Для підвищення безпеки технологічних процесів, пов'язаних з вибуховими речовинами та засобами їх ініціювання, украй необхідно удосконалення загальної методики побудови вибухонебезпечних технологічних процесів, а саме при виборі технологічного процесу виготовлення виробу, з обов'язковим забезпеченням вибухової безпеки процесу його виробництва, необхідно керуватися:

- рівнем показників вибухових властивостей (чутливість до механічних впливів, схильність до переходу горіння у детонацію (ПГД), сприйнятливість до детонації тощо) не лише кінцевого рецептурного регламентованого складу, але також проміжних композицій, з можливими відхиленнями вмісту вихідних вибухових компонентів від регламентованого складу;

- аналізом технологічних апаратів з погляду їх задоволення вимогам вибухової безпеки щодо рівня вибухових властивостей конкретного ВМ і ЗІ;

- категорійністю фаз виробництва залежно від рівня вибухозахисту устаткування для визначення заходів захисту обслуговуючого персоналу при аварійній ситуації.

Наведені положення не виключають вимог чисто технологічного характеру (реологія, живучість, в'язкість тощо), пропонованих до ВМ і ЗІ. Однак ці питання тут не розглядаються, а звертається увага суто на чинники, безпосередньо пов'язані з захистом від вибуху при переробці ВМ і ЗІ.

Наприклад, перхлорат амонію (ПХА, анозит) у чистому вигляді є досить безпечним ВМ і організація його переробки (сушіння, здрібнювання, розсівання) при виробництві ЗІ не вимагає вживання особливих заходів забезпеченню вибухової безпеки, тому що він не горить при звичайних умовах, для його підривання необхідний потужний ініціатор з іншої ВР, а схильність до ПГД дуже мала. Суміші ж ПХА з горючими порошками як органічного, так і неорганічного походження, мають підвищений рівень вибухових властивостей, навіть при невеликому вмісті горючих домішок. Чистий ПХА з розміром часток 50 мкм не горить на відкритому повітрі, а горить лише при тиску більше 3 МПа. Детонація в ньому може бути зрушена при діаметрі заряду більше 30 мм за допомогою потужного проміжного детонатора. Для ПХА перехід горіння в детонацію (ПГД) вдалося здійснити лише в трубі діаметром 60 мм, водночас довжина переддетонаційної ділянки становила більше 1800 мм. Водночас суміш ПХА з 1,5 % паливної домішки горить на відкритому повітрі, детонує в діаметрі менше 10 мм і дає стійкий ПГД у стандартних умовах при довжині переддетонаційної ділянки 600...700 мм. Організація переробки таких сумішей пов'язана з застосуванням спеціальних вибухозахищених апаратів і організацією спеціальної фази виробництва.

Водночас правильний вибір порядку введення компонентів дозволяє суттєво спростити технологічний процес і підвищити його вибухову безпеку.

До того ж, проміжні продукти або їхні суміші можуть мати значно більш високий ступінь вибухонебезпечності, ніж кінцевий продукт. Наприклад, введення в змішувач одночасно всієї наважки ПХА (або іншого окислювача, кристалічної ВР тощо) призводить до тимчасового утворення проміжних сумішей, що володіють підвищеною вибухонебезпечністю за рахунок високого вмісту окислювача і зниженої щільності сумішей. Завантаження необхідної кількості

компонента окремими порціями значно підвищує безпеку фази змішування паливної маси.

Таким чином, заходи щодо гарантування безпеки обслуговуючого персоналу і сусідніх виробничих будинків мають прийматися виходячи з найбільш вибухонебезпечного стану перероблюваної продукції [265, 268].

Організація будь-якого технологічного процесу базується на застосуванні таких апаратів, конструкція і якість виготовлення яких відповідають вимогам безпеки. Використовувана у виробництві апаратура має відповідати таким основним вимогам:

- тривалість наробітку на відмову (ресурс) апарата в цілому має перевищувати тривалість циклу технологічного процесу;

- рівень тривалих та імпульсних механічних впливів не повинен перевищувати критичних значень цих впливів, що спричиняють запалювання матеріалу, який переробляється;

- одноразове завантаження апарата, у якому є найбільша ймовірність виникнення вибухових процесів, має обмежуватися величиною, за якої забезпечується локалізація вражаючих факторів вибуху перероблених ВМ у приміщенні, де розміщене устаткування. Водночас мають гарантуватися безпечні відстані між будинками відповідно до галузевих правил;

- з метою зниження ефекту вибуху всі апарати, ємності, транспортні трубопроводи повинні мати статичне і динамічне ослаблення, що забезпечує виконання граничних умов з відсутності переходу горіння у вибух (детонацію);

- фази виробництва і апарати, з’єднані безперервним технологічним потоком продуктів, повинні мати надійні розриви від місць концентрації ВР. Це може бути досягнуто як дискретністю виробництва, так і у вигляді аварійного розкриття і відсікання масопроводів.

Дотримання наведених вимог до конструкцій апаратів і умов їх використання є необхідною умовою гарантування безпеки при виготовленні виробів. Однак виконання цих вимог у повному обсязі у деяких випадках спричиняє труднощі, пов’язані з відсутністю вихідних даних про властивості

перероблених ВМ, матеріалів для виготовлення апаратів, присутністю так званого «людського фактора» тощо. Отже, у реальному виробництві не можна повністю виключити виникнення аварійної ситуації. Тому, для захисту обслуговуючого персоналу і устаткування встановлюються певні правила щодо обладнання виробництв ВМ і їхньої експлуатації, у яких технологічні процеси і операції класифікуються за можливими наслідками (вибухонебезпечні та пожежонебезпечні) і масштабам аварій.

Категорійність небезпечних технологічних процесів:

А – Процеси (операції), під час проведення яких можливий вибух руйнує будинок і створює для оточення небезпечну зону.

Ал – Процеси (операції), при проведенні яких можливий вибух локалізується в приміщенні (спорудженні) засобами захисту,

Б - Процеси (операції), під час проведення яких імовірність вибуху не перевищує 10^{-4} на рік.

В – Процеси (операції), під час проведення яких можливе загоряння не локалізується усередині будинку (спорудження) і створює пожежно небезпечну зону.

Г – Процеси (операції), під час проведення яких можливе загоряння локалізується усередині будинку (спорудження).

Критерієм такої класифікації є максимальна проєктна аварія і такий підхід дозволяє в ширших межах змінювати номенклатуру матеріалів і виробів з них, якщо завантаження ВМ не перевищує проєктну, а можлива аварія не підвищує категорію будинку.

Вражаючі фактори, характерні для аварії із ВМ: ударна хвиля, уламки, висока температура, сейсмічна дія – є наслідками тієї обставини, що процес енерговиділення при хімічних реакціях розкладання ВМ іде з великою швидкістю. Для кожного з цих факторів існує узагальнення їх експериментально визначених інтенсивностей залежно від потужності і відстані до джерела, наявності захисних споруд, перешкод, параметрів навколишнього середовища тощо. У більшості

випадків загальний вид залежності 5.9 інтенсивності вражаючого фактора I від потужності джерела m і відстані до нього r виражається формулою:

$$I = f(k \cdot m^b / r^a), \qquad (5.9)$$

де коефіцієнт k та індекси *a*, b змінюються в ширших межах і залежать від виду вражаючого фактора, наявності та конструкції захисних пристроїв і споруд і деяких інших особливостей конкретного промислового об'єкта. Їхні значення наведені у відповідних розділах «Правил влаштування підприємств…» [170].

Зупинимося тут докладніше лише на одному понятті: тротиловому еквіваленті (ТЕ) вибуху (α). Відомо, що максимальна величина ТЕ ВМ може бути визначена експериментально за вимірами параметрів повітряної ударної хвилі (ПУХ) як відношення маси ТНТ до маси ВМ, еквівалентних по дії ПУХ, або, що іноді зручніше з достатньою для практики точністю, за співвідношенням значень теплоти вибухового перетворення конкретного ВМ і тротилу, формула 5.10:

$$\alpha = Q(v)_{ВМ} / Q(v)_{ТНТ}, \qquad (5.10)$$

де враховано, що $Q(v)_{ТНТ} = 1000$ ккал/кг = 4184 кДж/кг.

Однак, наведена залежність справедлива лише при повному виділенні енергії, тобто при детонаційному процесі. Величина тротилового еквіваленту ВМ значною мірою впливає на розмір капіталовкладень у будівництво виробничих приміщень і їхнє розташування. Теплота вибухового розкладання сучасних ВМ досягає 5000–7000 кДж/кг, тобто величина їх ТЕ при детонаційному процесі буде становити (з урахуванням втрат) величину 1,2–1,7. При примусовому детонаційному процесі, як показують великомасштабні польові випробування натуральних виробів, ТЕ може досягати значень 2,5–2,8.

Реальна ж величина ТЕ залежить не стільки від загального енергетичного рівня ВМ і ЗІ, скільки від можливості та ступеня реалізованості того або іншого вибухового процесу, що визначає кількість і швидкість виділення енергії стиснутих газів. Принципова можливість детонаційного процесу у ВМ ще не означає можливість його виникнення в реальних умовах переробки або експлуатації і тому не дає підстав використати максимально можливе значення ТЕ при визначенні вибухового ефекту. Наприклад, ВМ, що містять у своєму складі

кристалічні ВР, є детонаційно спроможними вибуховими системами. Однак було б неправильно вважати, що загоряння паливної маси в змішувальному апараті або загоряння твердого палива, вибух виробів при стендових випробуваннях призведуть до детонації, і тому вибуховий ефект необхідно оцінювати виходячи з повного ТЕ. Інша справа, якщо технологічний потік продуктів має нерозривний зв'язок і у цьому потоці є хоча б один апарат, у якому може реалізуватися ПГД. Наприклад, якщо відбудеться загоряння порошкоподібної ВР у ємності або трубопроводі, що не відповідають вимогам відсутності ПГД, то в такому випадку ТЕ вибуху визначається за максимальним значенням і ефект вибуху обчислюється із сумарного завантаження технологічного потоку. Так, у реальному виробництві чистий перхлорат амонію є в цьому сенсі безпечною речовиною, не здатною до ПГД. Тому його зберігання і переробку зараховують до категорії «Г». Однак, якщо його зберігання і переробку здійснювати одночасно з октогеном, гексогеном або іншим ВМ, здатним давати ПГД у реальних умовах (операції категорії «А»), то категорійність у цьому випадку визначається виходячи з можливого результату аварії як з найбільш вибухонебезпечним продуктом, і можливий ефект вибуху необхідно обчислювати із сумарного завантаження цих ВМ.

Організація сучасного виробництва ВМ спрямована на те, щоб виключити можливість таких явищ, і як показує практика, реалізація детонаційного процесу при аварійній ситуації – подія вкрай рідкісна. Тому практичний ТЕ для технологічних сумішей і готових виробів значно нижчий, і ефект вибуху відбувається за рахунок згоряння значних кількостей ВМ у замкнутому обсязі. У цьому випадку «тротиловий еквівалент залежить від повноти перетворення ВМ у газ при безмежному адіабатичному розширенні», формула 5.11:

$$A = P_1 \cdot V/(n-1)[1 - (P_2/P_1)^{(n-1)/n}], \qquad (5.11)$$

де А – робота розширення, Дж; P_1 – початковий тиск газів, МПа; P_2 – атмосферний тиск, МПа; V – об'єм технологічного апарата, $м^3$; n – показник адіабати продуктів горіння.

Можна розрахувати роботу вибуху при конкретних умовах загоряння, якщо об'єм апарата вимірюється в $м^3$, а тиск у ньому в момент розриву – у МПа, то для

оцінки ТЕ вибуху при згорянні ВМ у замкнутому об'ємі застосовують таку формулу 5.12:

$$C = 0{,}239/(n-1)\cdot P_1 \cdot V\,[1 - (P_2/P_1)^{(n-1)/n}]\,, \qquad (5.12)$$

де С – еквівалент вибуху технологічного апарата, кг ТНТ.

На основі результатів полігонних випробувань технологічного устаткування, а також оцінки параметрів полів враження вибуховими ефектами, що виникають при враженні натурних виробів кулями і уламками, було отримано формулу 5.13, зручна для інженерних розрахунків ТЕ розриву оболонки при горінні ВМ (без ПГД) у замкнутому об'ємі:

$$C = k\cdot P\cdot V, \qquad (5.13)$$

де С – еквівалент вибуху, кг ТНТ; Р – тиск розриву оболонки, МПа; V – об'єм, $м^3$; k – емпіричний коефіцієнт, величина якого залежить від енергетичного рівня ВМ, стану поверхні горіння, швидкості наростання тиску при горінні ВМ або проміжних технологічних сумішей у замкнутому обсязі, деяких інших факторів; він коливається в межах від 0,1 до 0,2.

Прийнято вважати, що найбільшу небезпеку несе повітряна ударна хвиля УХ, тому що в зоні своєї дії вона вражає у будь-якій точці.

Критерії ураження повітряною ударною хвилею при вибухах ВМ залежать від тиску у фронті ударної хвилі, кПа:

Для повного оскління будинків і споруд на максимальній відстані від центра вибуху руйнівний тиск становить 0,5–0,8 кПа;

Руйнування віконних пройомів, дверей, легких перегородок – 1–1,5 кПа;

Повне руйнування цегляної кладки, легких бетонних споруджень 2–2,5 кПа;

Контузія людини можлива за рівня тиску 30–70 кПа;

Летальний результат для людини можливий за >300 кПа.

Під час повного руйнування будинку і устаткування з утворенням вирв на 1 кг ВМ в еквіваленті тротилу викидається 0,05–0,06 $м^3$ ґрунту.

Це пояснюється тим, що при аварійному вибуху енергія витрачається не лише на викидання ґрунту, але і на деформацію устаткування, будинків, фундаментів тощо. Таким чином, застосовуючи наведені вище формули,

можливо, з одного боку, раціонально розмістити будинки і споруди, здійснити достатній захист персоналу, з іншого боку, провести коректну оцінку потужності вибуху і його наслідків при аварії з ВМ.

Для локалізації та/або зменшення інтенсивності вражаючих факторів дуже часто устаткування, у якому може відбутися вибух, розміщують у спеціальних кабінах або будинках, здатних повністю або частково запобігти впливу вражаючих факторів на навколишні об’єкти. Для будинків спеціальної конструкції припускають локалізацію вибуху, еквівалентного 2–3 т ТНТ за можливості його подальшого ремонту.

Зниження інтенсивності вражаючих факторів і звуження зони їх дії може забезпечуватися застосуванням обвалування як активних, так і пасивних будинків.

Крім того, будинки і спорудження на території підприємства розміщуються на таких відстанях між собою і від оточуючих підприємство об’єктів, щоб рівні впливу на пасивні будинки усередині території підприємства не перевищували встановлених припустимих норм (внутрішні припустимі відстані) і не могли заподіяти збитку за межами промислового майданчика (зовнішні безпечні відстані).

У тих же будинках, де запалювання перероблених ВМ може закінчитися лише пожежею, з метою зниження можливого збитку від аварійних вибухів застосовують легко руйновані та легко скидні конструкції (ЛСК). До конструкцій, що руйнуються легко, зараховують оскління віконних пройомів, руйнування яких забезпечує практично миттєве розкриття приміщення при мінімальному збитку. До конструкцій, що скидаються легко, зараховують поворотні засклені пройоми, стінові панелі і плити перекриттів, руйнування яких відбувається протягом деякого проміжку часу. У процесі спрацьовування легко скидних конструкцій і вихід продуктів згоряння із приміщення відбувається зниження навантажень на устаткування, що призводить до значного зменшення збитку.

Практично всі будинки, у яких проводять роботи із ВМ, обладнуються системами автоматичного пожежного захисту – комплексом пристроїв, що виявляють загоряння і включають автоматичну подачу вогнегасної речовини

(зазвичай води). Для виявлення загорянь застосовуються датчики, що забезпечують надійне виявлення осередків загоряння і не дають помилкових спрацьовувань. Найчастіше це фотодатчики, що реагують на спектр випромінювання палаючої продукції. Системи подачі води мають різний час спрацьовування – від 0,1 с до 10–30 с і обладнуються розпилювальними насадками різної конструкції, вибір яких визначається завданнями, що ставляться перед конкретними системами пожежного захисту. Ефективність систем пожежного захисту при виробництві пожежобезпечних речовин (порохів, палив) може бути досягнута за умови подачі вогнегасного засобу в зону горіння при тиску 0,6–0,8 МПа не пізніше 2–3 с з моменту спрацювання датчиків виявлення горіння, з інтенсивністю зрошення 4–6 л/с на 1 $м^2$ протягом не менше 10 с.

Висновки до розділу 5

Поширення в світовій гірничій практиці вибухових речовин емульсійного класу завдячує їх багатьом перевагам, серед яких фізична стабільність, широко регульовані експлуатаційні характеристики і діапазон застосування, менша на 30 % вартість ЕВР і на 40 % нижчі сумарні витрати на вибухове руйнування гірських порід, безпека та екологічна чистота технологічних процесів як на виробництві ЕВР, так і в часі їх масового використання. Поява універсальних промислових ВР емульсійного класу типу «вода в олії» дозволяє змінювати їх детонаційні характеристики в широких межах залежно від умов використання і поставлених завдань. Ці обставини в сполученні з розроблюваними напрямками розвитку заявлених і науково обґрунтованих у роботі прийомів та засобів реалізації низькошвидкісних ініціюючих систем взаємно доповнюються в межах теми дисертаційної роботи. Українські фахівці вже на переломі тисячоліть активно працювали над створенням вітчизняних ЕВР. У відповідних роботах на рівні цих наукових розробок та їх промислового виробництва в значній мірі брали участь науковці НДІХП і Шосткинського інституту СумДУ.

У ході цих досліджень розроблено технічні умови та Директивний технологічний процес отримання ЕВР Емульхім-ШМ (Шостка Модернізований), що є емульсією розчину аміачної та натрієвої селітр у нафтопродукті з сенсибілізуючою домішкою, відпрацьовано технологію, технічні умови затверджено Держстандартом та створено відповідне виробництво.

Надважливою рисою емульсійного класу вибухових речовин є їх придатність для транспортування емульсійної композиції та ГГД до місця заряджання, роздільної подачі вибухобезпечних компонентів насосом-дозатором до змішувальної камери і подачі через зарядний шланг у сухі або обводнені свердловини.

У співпраці ШІ СумДУ з науковцями і гірничими підприємствами Азербайджанської Республіки розроблено ЕВР «Азнітро» трьох типів, особливістю яких є стабільність детонаційних властивостей та задана для складних геологічних умов потужність. Враховуючи доступність і дешевизну сировини, відсутність у складі ЕВР індивідуальних вибухових речовин, ліквідацію проблеми перевезення та зберігання небезпечних речовин, можливості механізації процесу виробництва ЕВР з регульованими характеристиками та зарядних робіт, в комплексі з низькошвидкісними ініціюючими засобами розроблена ЕВР здатна задовольнити потреби республіканського гірництва.

Показано, що оцінка безпеки продукції ВМ і ЗІ ґрунтується на порівнянні рівня вибухових властивостей матеріалів, що переробляються, тобто на визначенні умов досягнення критичних параметрів впливів, що призводять до початкового осередку загоряння і розвитку вибухових процесів, з одного боку, і рівня впливів на ВМ і ЗІ, вироблених у процесі його переробки, з іншого боку.

З усіх розглянутих аварій при виробництві ЕВР, що виникають внаслідок зовнішніх впливів, найвірогіднішою є аварія змішувально-зарядної машини, пов’язана з експлуатацією СЗМ: $Qi = 3 \cdot 10^{-5}$ рік$^{-1}$. Зрозуміло, у цьому випадку, чим ближче знаходиться виробник емульсії, тим нижчі ризики під час її транспортування. Чим менше населених пунктів та об’єктів «турботи» по дорозі, тим нижчий фактор ризику.

Оскільки дія вражаючих факторів великомасштабної аварії під час перевезення, завантаженні, заряджанні емульсії ЕВР (займання всього обсягу емульсії, з можливим переходом у вибухове горіння), здатних призвести до смертельного наслідку, поширюється лише по території підприємства або кар’єру і не торкається об’єктів «турботи суспільства – соціальний ризик від аварії цього типу дорівнює 0.

РОЗДІЛ 6. НИЗЬКОШВИДКІСНІ ДЕТОНАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ЗАРЯДАХ ТИПУ К-ТРУБ МІСЦЕВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ

6.1 Фізико-хімічні та енергетичні характеристики вибухових систем для зарядів К-труб

Завдяки високій зносостійкості та унікальним декоративним властивостям українського облицювального каменю існує висока потреба в його видобуванні.

Поряд з низкою механічних способів різання блочного каменю, які відрізняються невисокою продуктивністю, на відділенні монолітів успішо використовуються інтенсивні вибухові методи. Високопродуктивна техніка вибухового відділення монолітів від масиву довгий час передбачала застосування димного пороху або ниток детонуючого шнура (ДШ). Враховуючи, що димний порох не є безпечним матеріалом через його високу чутливість до тертя і вогню, а його підвищена гігроскопічність в промислових умовах нерідко призводить до відмов ініціювання, на практиці віддавалася перевага значно більш надійному детонуючому шнуру. Завдяки високій детонаційній здатності ДШ здатний забезпечити відповідну енергетику розколу, однак одночасно він справляє інтенсивний динамічний вплив на структуру каменю. Це призводить до зниження міцності порід, що пояснюється дією докритичних навантажень у масиві на дислокаціях, зростанням геометричних параметрів мікротріщин, порушенням монолітності каменю через виникнення нових систем мікротріщин. Мікротріщини у кам’яних виробах надалі розширюються під дією атмосферних впливів (зволоження, заморожування-розморожування тощо), що знижує їх довговічність виробів, а отже, ці явища поповнюють технологічні втрати сировини.

Найбільш раціональним динамічним способом відділення блочного каменю від масиву в останні десятиліття вважається застосування при шпуровому методі підривання так званих К-труб, що є заповненими вибуховою сумішшю та з’єднами послідовно пластиковими трубами зменшеного діаметра порівняно з діаметром шпура. На жаль, для гарантії стабільної детонації такого заряду в

шпурі, тобто його сенсибілізації, склад суміші передбачає потребу в застосуванні нітроефірів (суміші нітрогліцерину з нітрогліколем), яка не гарантує повної безпеки у використанні і, крім того, потребує виготовлення К-труб в умовах спеціалізованих підприємств з подальшими особливими умовами їх транспортування.

Українською компанією «Лагран» запропоновано технологію відділення від масиву монолітного каменю шляхом застосування шпурових зарядів – патронів, заповнених сумішевим генератором хімічного тиску «Літокол». Через дискусії щодо класифікації цього засобу (вибухового або газового статикодинамічного), екологічності рецептури і умов її приготування ускладнюється широке впровадження методу в гірничу практику.

У переважній більшості застосовуваних динамічних методів проблемою стає не лише вирішення питання оптимізації параметрів робочого імпульсу в шпурі в «мякому» режимі впливу на оточуючий масив, а й процес виготовлення і транспортування усіх засобів висадження.

Враховуючи це в роботі поряд з добором і науковим обґрунтуванням ефективного складу безпечної вибухової суміші для спорядження К-труб значну увагу приділено розробці способу виготовлення на місці вітчизняного аналога К-труб на основі малочутливих низькошвидкісних вибухових сумішей для якісного і безпечного відбивання блочного каменю.

Розроблено гетерогенні вибухові системи на основі окисника – перхлорату калію в якості основного компонента і нітрометану або дизельного палива в якості пального, а також оксиду марганцю (IV) – каталізатора термічного розкладання.

Термодинамічні характеристики складів на основі ПХК, наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Фізико-хімічні та розрахункові термодинамічні характеристики складу на основі ПХК

Характеристика	Значення для сумішей	
	з ДП	з НМ
Кисневий баланс, %	+25,67	+37,7
Теплота вибуху, кДж/кг	2165,8	858,1
Температура вибуху, К	2003,65	1523
Об’єм газів, л/кг	334,4	374
Щільність складу, г/см^3	0,99–1,02	1,05–1,10
Фугасність, мл	85	95
Тротиловий еквівалент	0,51	0,55
Критичний діаметр детонації, мм	15–19	10–12
Швидкість детонації, км/с	1,8–2,1	1,0–1,55

Досліджуваний склад з дизпаливом у якості пального має невисокі значення температури вибуху і теплоти вибуху − 1730,5 °С (2003,65 К) і 2165,8 кДж/кг відповідно, незначний об’єм газоподібних продуктів – 334 л/кг, фугасність 85 мл та тротиловий еквівалент 0,51.

Порівняно з цим склад з нітрометаном у якості палива має ще нижчу теплоту та температуру вибуху, але водночас об’єм газів, що виділяються при вибуху, а також фугасність у даного складу на 12 % вищі, а також на 8 % вищий тротиловий еквівалент. Крім того, критичний діаметр детонації в складі з нітрометаном у якості палива меншій за аналог з дизпаливом майже удвічі.

Швидкість детонації обох складів відповідає концепції роботи.

Крім того, заряди надійно спрацьовують від штатних засобів ініціювання – електродетонаторів ЕД-8 і детонуючого шнура ДШЕ-12. Враховуючи це і низьку чутливість до механічної дії, склад може застосовуватися в якості зарядів для відбивання блочного каменю.

Ці суміші засипають в пластикові трубки з внутрішнім діаметром до 27 мм, виходячи з критичного діаметра детонації цього складу, і відповідно такі заряди можуть розміщуватися в шпурах діаметром 36−42 мм, які найбільш використовуються в Україні при відбиванні блочного каменю.

Ініціювання здійснюється за допомогою детонуючого шнура з наважкою вибухової речовини 10−12 г на погонний метр, який контактує з кожним трубчастим зарядом в шпурі.

Головною перевагою розроблених трубчастих зарядів є можливість їх місцевого виготовлення, без необхідності створення підприємства та уникаючи небезпеки їх логістики. Іншими перевагами трубчастих зарядів є:

− простота заряджання;

− відсутність розсипання вибухової речовини;

− легкість регулювання кількості ВР в шпурі;

− можливість просторового розміщення зарядів;

− наявність повітряного простору між зарядом і стінками шпуру знижує піковий тиск при детонації, що сприяє зменшенню тріщин у відокремлюваному блоці;

− використання ДШ дає можливість ініціювати трубчасті заряди, що знаходяться в шпурі, майже одночасно, що забезпечує практично рівне навантаження тиску вибуху по усій довжині заряду;

− відсутність контакту обслуговуючого персоналу з вибуховою речовиною;

− зменшення витрати ВР порівняно з насипним пороховим зарядом;

− зниження кількості викидів шкідливих газів в атмосферу внаслідок малого об’єму їх виділення.

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

$2CH_3NO_2+2KClO_4=2CO_2+3H_2O+K_2O+2ClO_2+N_2$

Графік зміни енергії Гіббса реакції залежно від температури наведено на рис. 6.1, графік теплоємності компонентів реакції на рис. 6.2. Розрахунки, що стали основою для побудови графіків, наведено у Додатку 8.

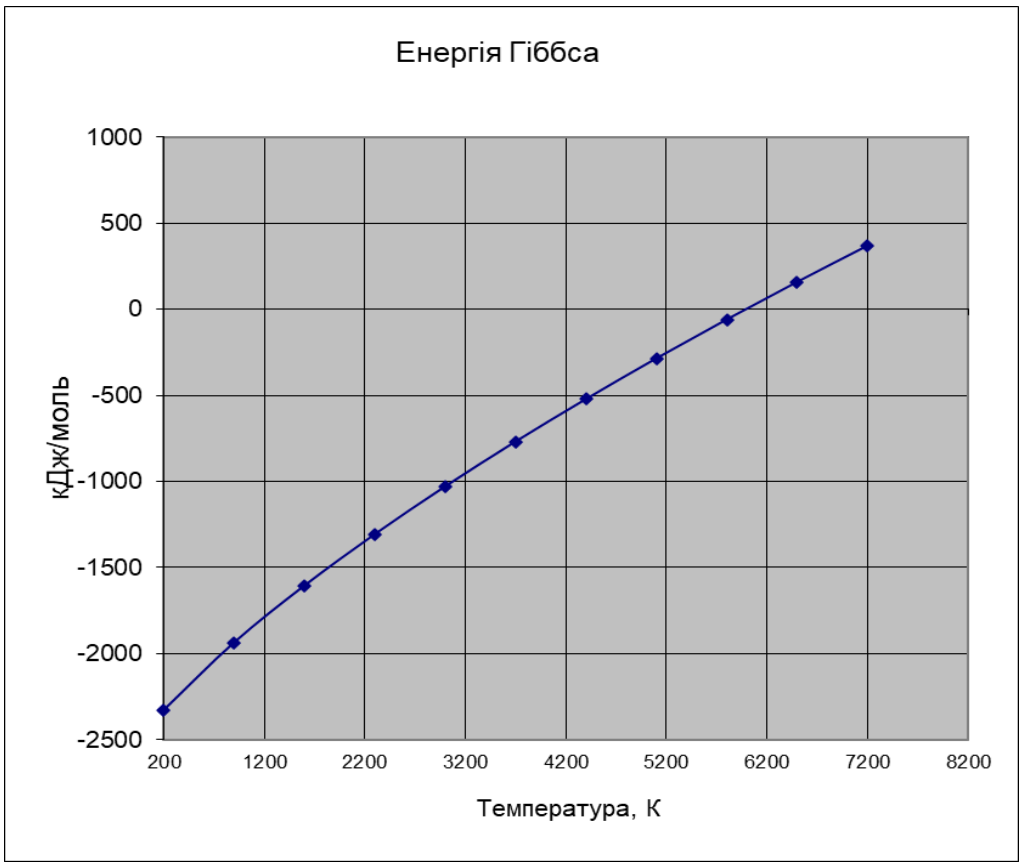


Рис. 6.1. Залежність зміни енергії Гіббса перхлорату калію та нітрометану від температури

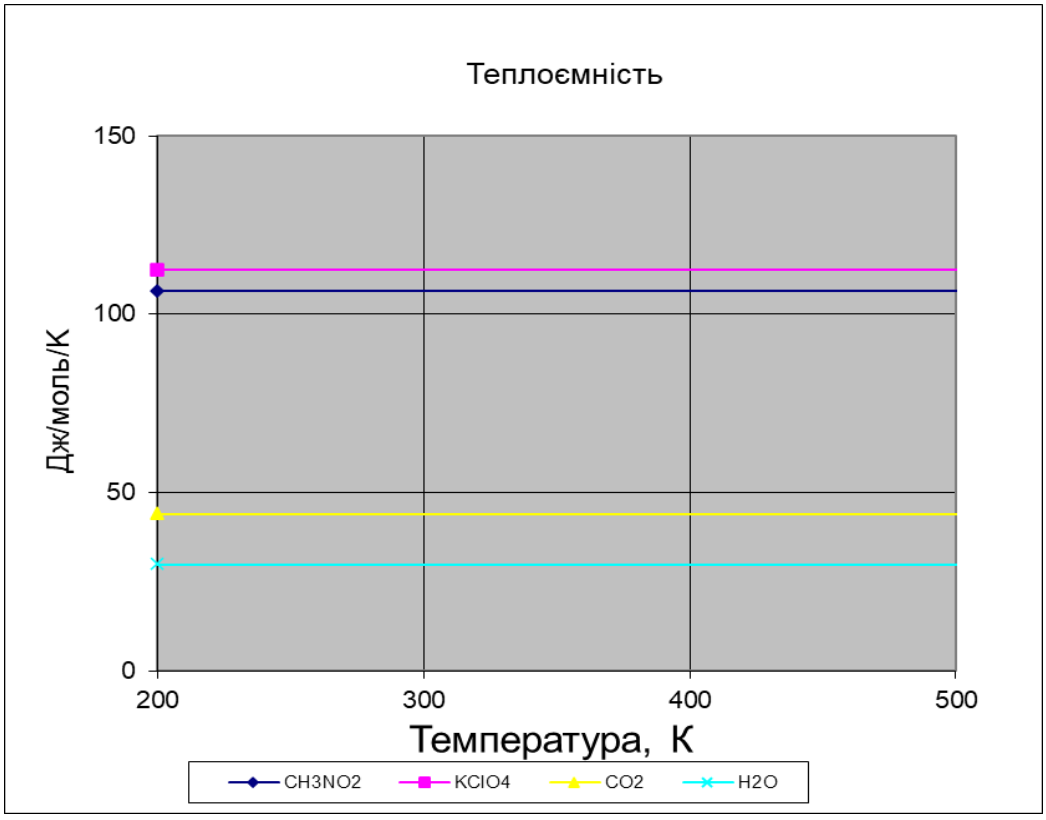


Рис. 6.2. Теплоємності компонентів реакції вибуху складу на основі перхлорату калію та нітрометану

Графік зміни енергії Гіббса свідчить про зміну напрямку реакції вибухового складу перхлорату калію та нітрометану при 5890 °С.

Це достатньо високий показник, який значно перевищує стандартні енергії Гіббса для штатних промислових ВР і свідчить про можливість використання суміші нітрометану та перхлорату калію для складних вибухових пристроїв типу К-труб, і навіть для проміжних детонаторів.

6.2 Розробка способу отримання сферичних кристалів перхлоратів ізогідричним методом

Найбільш енергетичностабільною геометричною формою кристалу, або речовини є куля або сфера. Для багатьох вибухових пристроїв, що використовуються у гірництві та оборонній галузі, наявність високодисперсної ВР, або її компонентів сферичної форми підвищує ефективність їх застосування. Цей принцип було обрано за основу під час розробки методики кристалізації потужних окисників, таких як перхлорати.

Процеси кристалізації дуже важливі для функціонування хімічної промисловості, виробництва промислових вибухових речовин, фармацевтики. Вивчення та вдосконалення даних процесів, розробка обладнання для кристалізації є актуальним завданням протягом багатьох десятиліть, і буде такою перманентно.

Застосування частинок речовини сферичної форми дозволяє істотно поліпшити насипну щільність і сипкість продукту. Ступінь укладання частинок порошку під час заповнення тари визначається їх формою, розмірами та гранулометричним складом. Насипний обсяг залежить головним чином від взаємного розташування частинок порошку, контактів і зчеплення між частинками, а також від міжчасткових порожнин. Наприклад, для отримання вибухових або піротехнічних складів необхідні високодисперсні частинки сферичних компонентів. При отриманні димного пороху окислювач KNO_3 подрібнюють механічним шляхом. Відомо, що критичний діаметр вибухових

складів на основі перхлорату калію для відбивання блочного каменю менший, чим тонкодисперсніші кристали [173]. Запропонований метод дозволяє отримувати монодисперсні сферичні частинки необхідного діаметра.

Як відомо з літератури, кристали необхідних розмірів можна отримувати кристалізацією [174]. Необхідну округлу форму кристала отримують використовуючи ефект стирання механічним шляхом. Кристали в суспензії за великих швидкостей руху стирають кути та ребра, перетворюючись на округлі частки. У роботі [175] було зазначено, що за швидкостей циркуляції суспензії кристалів у трубах, що перевищують 2,5 м/с форма кристалів округляється. Те саме було підкреслено і при підвищенні інтенсивності перемішування. Відповідно до патенту США [176], сферичні кристали отримують у кристалізаторі способом поперемінного пропускання кристалів у спеціальній ємності з зони кристалізації в зону розчинення.

На сьогодні для отримання кристалів різних солей найбільш затребуваним є лопатевий роторний кристалізатор [177]. Суть процесу кристалізації полягає в перемішуванні маси водного розчину солі з її поступовим охолодженням, завдяки чому гранули солі висаджуються з розчину, а гострі грані стираються від тривалого обертання і тертя. Метод показав себе у дії з позитивної сторони, проте отримання кристалів ідеально сферичної форми даним способом є проблематичним. На кристали діють дві рушійні сили – відцентрова сила, створювана лопатями мішалки кристалізатора, і сила тяжіння. Перпендикулярно до напрямку обертання кристалів діє сила тертя. Водночас, зі збільшенням швидкості обертання сила тяжіння стає незначною порівняно з відцентровою силою і, як наслідок, кристали солей обертаючись в одній площині, під дією однієї сили мають усталений закон обертання. За правилом найменшого опору, при взаємному терті кристалів та їх терті об потік суспензії вісь обертання, в основному, проходитиме по центру мас кожного кристала (що утворюється в геометрично найбільш довгому перерізі кристала). З чого стає очевидним, що кристал зростатиме і округлятиметься за рахунок тертя нерівномірно.

Для усунення цієї проблеми та надання кристалам правильної сферичної форми було розроблено кристалізатор-модифікатор (КМ).

За прототип для створення власної методики було взято американський метод виробництва округлих кристалів перхлорату амонію [221]. Відповідно до цього методу, сферичні кристали отримують в кристалізаторі способом поперемінного пропускання кристалів перхлорату амонію в спеціальній ємності з зони кристалізації в зону розчинення. Розчинення відбувається найбільш швидко по краям і кутам, тим самим сприяючи округленню кристалу. Основними недоліками даного способу є складність управління ступенем округлення кристала, тривалий час протікання процесу через періодичність кристалізації та розчинення, а також наявність габаритного допоміжного обладнання.

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

За результатами проведених досліджень запропоновано спосіб, який полягає у розчиненні вхідної сировини та кристалізації сферичних кристалів ізогідричним методом із розчину з використанням трьох зон кристалізації, що доповнюють одна одну і мають різні закони переміщення маси водної суспензії під дією декількох фізичних сил за рахунок керованого зазору між мішалкою і днищем апарату кристалізатора-модифікатора (КМ). Процес кристалізації в КМ полягає у створенні кількох зон кристалізації (рис. 6.3), що доповнюють одна одну і мають різні закони переміщення маси водної суспензії під дією декількох фізичних сил.

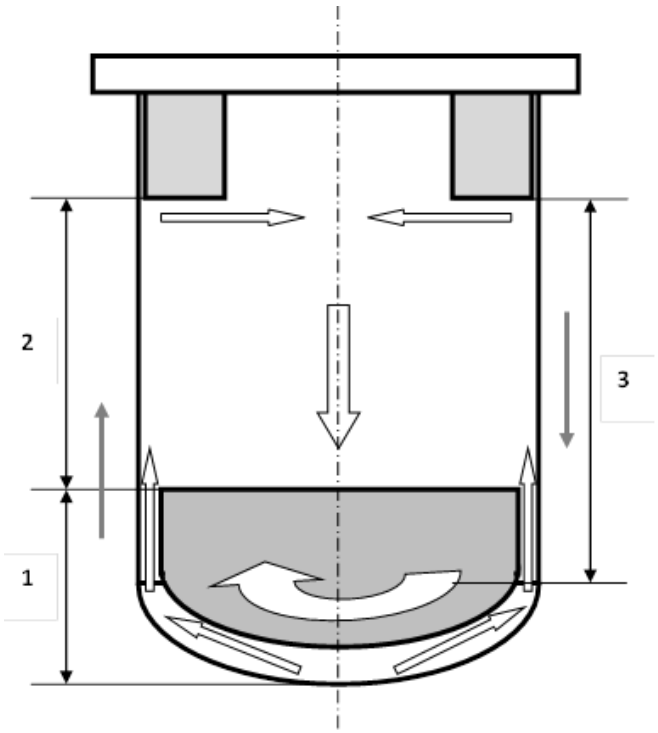


Рис. 6.3. Схема потоків у кристалізаторі-модифікаторі

Отримання сферичних кристалів у КМ поділяється на дві стадії:

1. Розчинення вхідної сировини у розчиннику.
2. Кристалізація сферичних кристалів ізогідричним методом із розчину.

Процес кристалізації відбувається таким чином. У першій (рис. 6.3, «1») (нижній, донній) області кристалізації основною рушійною силою є відцентрова сила, що виникає за рахунок роторної мішалки, що повторює форму дна кристалізатору і за рахунок керованого зазору між овальної мішалкою і днищем апарату створює при обертанні значну відцентрову силу, яка сприяє розтіканню потоку по стінках обічайки КМ.

Вектор руху потоку спрямований по радіусу кривизни донної частини КМ спіралеподібно в сторону обічайки. У другій (центральної навколостінної) зоні кристалізації (рис. 6.3, «2») потік тонким шаром турбулентно спіралеподібно розтікається по внутрішній порожнині обічайки. Вектор руху потоку спрямований вгору. Градієнти векторів швидкостей спрямовані як уздовж спіралі, так і перпендикулярно їй, що сприяє безперервному різнобічному обертанню кристалів. За рахунок незначної товщини (кілька міліметрів) спіралеподібного потоку дію сили тертя обмежено товщиною потоку, а відцентрова сила, яка долає

силу тяжіння, є рушієм процесу. В результаті фактично різносторонній режим обертання кристалів речовини сприяє округленню багатогранних кристалів за рахунок їх обертання в різних площинах.

Третя область кристалізації (рис. 6.3, «3») – область відсікачів. Без її існування висота шару другої зони кристалізації була б фіксованою і рух кристалів по зонам обертового потоку суспензії є незначним. У даній області, завдяки відсікачам, розташованим перпендикулярно щодо відцентрової сили потоку і руху маси суспензії, потік змінює закон свого руху. Відсікачі механічно направляють (скидають) підняту на певну висоту суспензію назад, в першу, донну область кристалізації, за рахунок сили тертя і сили тяжіння. Вектор руху потоку спрямований нормально (строго вниз). Суспензія потрапляє в отвір роторної мішалки в дезорієнтованому вигляді й цикл повторюється, сприяючи округленню гранул кристалів до сферичної форми [269, 270].

Спосіб отримання сферичних кристалів у кристалізаторі-модифікаторі був апробований у лабораторних умовах для отримання сферичних кристалів перхлорату калію та амонію. Спосіб містить такі операції:

1. На технічних вагах береться наважка сировини. У мірній ємності відмірюється необхідна кількість дистильованої води. Вода і речовина, яка кристалізується, вносяться до КМ (коефіцієнт заповнення 0,2–0,25).

2. У кристалізатор-модифікатор встановлюється мішалка з фіксованим зазором між лопатями та днищем апарату, після чого встановлюється гумова прокладка і кришка КМ герметично фіксується за допомогою 4-х різьбових з’єднань М6.

3. Розчин вхідної речовини на водяній бані нагрівається до повного розчинення кристалів речовини у воді при перемішуванні (n = 600–2000 об/хв). Контроль температур в баку-нагрівачі та кристалізаторі-модифікаторі ведеться за допомогою термопар, виведених на контролер.

4) Після розчинення речовини у воді нагрівання припиняється і в КМ направляється потік холодної води для розбавлення концентрації розчину і стимулювання утворення центрів кристалізації.

5. По закінченні процесу кристалізації суміш кристалів і дистильованої води з КМ переноситься на фільтр у вакуумну воронку, де фільтрується, промивається і просушується при вакуумі 50–80 кПа.

6. Отримані сферичні кристали висушуються, після чого піддаються дослідженню характеристик (насипна щільність, залишкова вологість, величина кристалів).

Природні голчасті кристали перхлорату калію показано на рис. 6.4. Сферичні кристали перхлорату калію діаметром 80–100 мкм, отримані способом ізогідричної кристалізації з використанням кристалізатора-модифікатора, наведено на рис. 6.5.

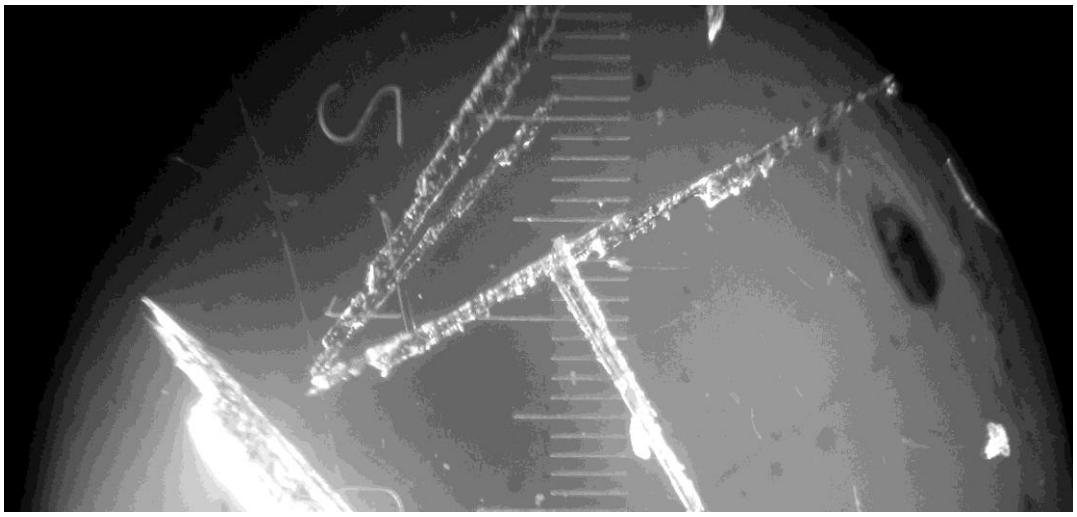


Рис. 6.4. Кристали $KClO_4$, отримані природнім шляхом

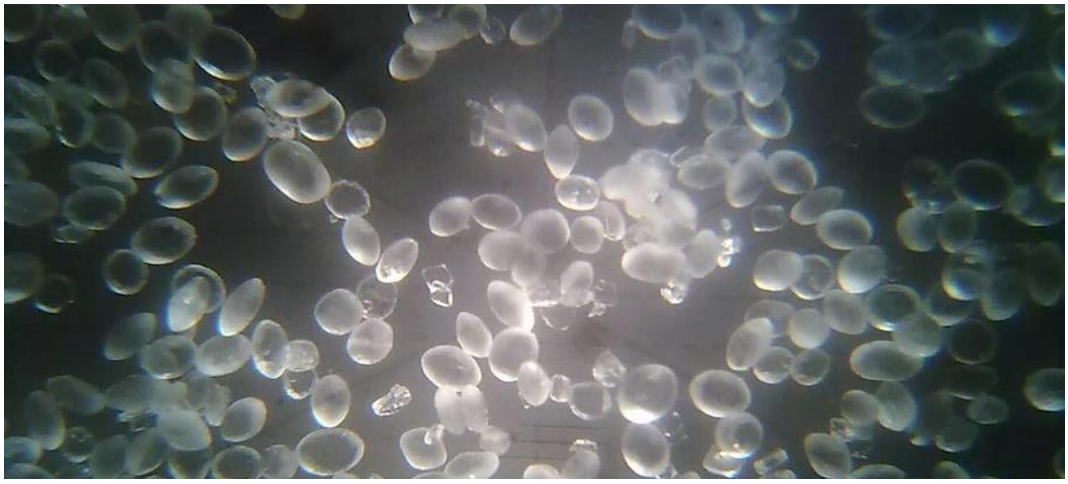


Рис. 6.5. Кристали $KClO_4$, отримані в КМ.

У межах дослідження процесів, що відбуваються у КМ та відпрацювання технологічних режимів кристалізації, проведено низку експериментів. Відпрацьовувалися режими розчинення $KClO_4$ у дистильованій воді. Заповнення реактора регулювалося від 10 до 40 % обсягу. При заповненні в 10 % суспензії недостатньо для того, щоб утворити безперервний шар на стінках КМ, при 30 % і більше товщина шару суспензії нерівномірна і ділянками перевищує ширину відсікачів. За оптимальне обрано заповнення КМ у межах 20–25 % від його обсягу. Експериментально підібрані режими обертання мішалки роторної від 900 до 1500 об/хв, для отримання кристалів різних фракцій і форми.

Найменш показові результати наведено нижче. Кристали, отримані без впливу механічних факторів при охолодженні розчину, і кристали, отримані в КМ, показано на рисунках 6.4 та 6.5 відповідно.

Отримання фракціонованих, тонкодисперсних, сферичних кристалів солей із застосуванням кристалізаторів-модифікаторів з конструктивним регулюванням потоків суспензії є перспективним напрямом проведення досліджень в напрямку розробки ефективних технологічних методів оптимізації. Розроблений метод отримання сферичних кристалів у кристалізаторі-модифікаторі дозволяє отримати кристали різних фракцій, наближених за геометричною формою до сферичної [178–180, 184–187, 245, 271].

Розроблений метод стосується галузі управління масообмінними процесами хімічної технології і, зокрема, питань отримання кристалів хімічних речовин сферичної форми заданої величини методом ізогідричної кристалізації [269, 270].

Автор брав участь у розробці даної технології, яка була впроваджена на Павлоградському хімічному заводі та стала основою для «Директивного технологічного процесу ДТП виробництва сферичного анозиту ПОХП.001.000.00.00.00 ДТП», Додаток 17.

Також технологія використовується на ТОВ «Техностарт» для отримання сферичних кристалів високоенергетичних матеріалів ізогідричним способом, «Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук», Додаток 18.

6.3 Визначення вибухових характеристик та процесів низькошвидкісної детонації в К-трубках

Критичний діаметр детонації ПВР визначали в зарядах конічної форми, в яких діаметр основи свідомо більше визначеного критичного діаметра. Заряд конічної форми виготовляли з паперу для патронування ВР. Діаметр основи конуса становив 40 мм, довжина − 410 мм, кут конусності − 5°. На поверхні конуса нанесено поділки, які означали локальний діаметр конуса.

Заповнення конуса вибуховими сумішами на основі ПХК проводили невеликими порціями, ущільнення ПВР здійснювали струшуванням для підвищення щільності заряджання. Маса суміші в конічному заряді становила 180−200 г. Ініціювання конусного заряду здійснювали електродетонатором миттєвої дії ЕД-8. Діаметр, за якого сталося загасання детонації заряду, визначали за наявністю залишку оболонки конуса після вибуху. Критичний діаметр детонації гетерогенних сумішей склав 5−20 мм.

Швидкість детонації ПВР визначали методом Дотриша, який засновано на порівнянні відомої швидкості детонації детонуючого шнура (ДШ) з невідомою швидкістю детонації досліджуваної суміші на основі ПХК [122]. Визначення швидкості детонації проводили на зарядах в паперових циліндричних оболонках діаметром 40 мм і завдовжки не менше шести діаметрів заряду, а саме 400 мм. Швидкість детонації склала 1,8−2,2 км/с.

Визначення повноти детонації проводили відповідно до ГОСТ 14839.19 методом А на зарядах в паперовій оболонці діаметром 30 мм, завдовжки 300 мм, масою 220 г. Про повноту детонації свідчить утворення воронки на пластині-свідку і відсутність залишків гетерогенної суміші після вибуху.

Вибухові характеристики складів наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Експериментальні вибухові характеристики складу ПХК - НМ

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

Дослідження канального ефекту К-труб.

Піротехнічні заряди застосовуються для відбивання блочного каменю спільно з шпурами завдовжки близько 2 м і діаметром від 36 до 42 мм. Відомо, що при застосуванні подовжених зарядів малого діаметра насипної щільності можливе загасання детонації, що може бути пов’язано з канальним ефектом, тобто ущільненням вибухової речовини попереду фронту детонації ударною хвилею.

Для встановлення детонаційної здатності подовженого піротехнічного заряду проведені випробування складу того, що складається з 94,5 % ПХК дисперсністю 200 мкм, 0,5 % каталізатора MnO_2 і 5 % дизельного палива. Діаметр заряду дорівнював 40 мм, довжина 1000 мм. Швидкість детонації вимірювали на початковій ділянці подовженого заряду, на відстані 80 мм від торця з базою виміру 80 мм і у кінці заряду (від 820 мм до 900 мм) з базою теж 80 мм. Проводили три паралельні випробування. Ініціацію здійснювали електродетонатором ЕД-8. Швидкість детонації на початковій ділянці заряду становила 1800 м/с, а в кінцевій частині заряду вона підвищилася на 20 % до 2160 м/с. Підвищення швидкості детонації у кінці заряду імовірно зв’язувалося з ущільненням заряду по довжині ударною хвилею.

Для з’ясування цього припущення виміряно насипну щільність піротехнічного заряду з утрускою і з ущільненням дерев’яним пуансоном.

Насипна щільність заряду з утрускою становила 1,04 г/см^3, а підпресованого – 1,14 г/см^3. При випробуванні ущільненого заряду отримано значення швидкості детонації 2100 м/с. Це підтверджує механізм ущільнення вибухового складу подовжених зарядів попереду фронту детонації. Точно визначити міру цього ущільнення при вибуху не є можливим, але ясно, що величина ущільнення заряду в даному випадку сприяє підвищенню швидкості детонації і не призводить до загасання детонації.

6.4 Порівняльні характеристики розроблених зарядів і засобів для відбивання блочного каменю

На сьогодні внаслідок швидкого розвитку і появи нових архітектурних рішень при будівництві різного роду споруд, все актуальнішим стає питання з ефективного і продуктивнішого добування блочного каменю.

Донедавна добування блочного каменю проводили за допомогою димного пороху, який засипався в шпури, просвердлені по контуру відокремлюваного блоку. Проте, димний порох дуже чутливий до тертя і вогню, має високу гігроскопічність, що в умовах експлуатації, особливо при високій вологості, призводить до відмов ініціації [222, 226, 227, 230, 232].

Найбільш продуктивний сьогодні − вибуховий спосіб, але з використанням техніки «м'якого» вибуху за допомогою спеціально для цього розроблених зарядів ВР з низькою швидкістю детонації. Такого виду заряди в Європі випускаються шведською фірмою Dino Nobel Gurit і фінською фірмою під назвою OY Forcit. Вони виготовляються на підприємствах, а гірники на кар'єрах працюють лише із зарядом-трубкою і не мають контакту з вибуховою речовиною, що покращує техніку безпеки.

Заряди такого ж типу розроблено в Швеції («Гурит-А»). Проте вони мають дещо більш високу швидкість детонації (4,0 км/с), що не дозволяє провести м'якого відділення блоку від масиву [222, 240, 242, 245].

Розроблені заряди мають невисокі значення температури і теплоти вибуху − 1730,5 °С (2003,65 К) і 516,9 ккал/кг відповідно і незначний об’єм газоподібних продуктів − 334 л/кг.

Таблиця 6.3. Порівняльні характеристики вживаних засобів для відбивання блочного каменю

Характеристика	OY Forcit	Димний порох	Гранілен-3	Заряди з НМ	Заряди з ДТ
Щільність заряду, г/см^3	0,95	0,9-1,0	1,86	1,05-1,10	0,99-1,02
Швидкість детонації, м/с	1700–2000	1200-1600	2400	1300	1800–2100
Теплота вибуху, кДж/кг	1200–1500	3024	2070	858,1	2165,8
Лінійна маса ВР, кг/м	0,11–0,24	0,80-1,20	0,36	0,16-0,30	0,12–0,26
Об’єм газів, л/кг	160	280	440	334	310
Діаметр заряду, мм	11–17	32–42	17,0	5–20	10–20
Діаметр шпуру, мм	27–32	32–42	42–50	27–32	27–32

З таблиці 6.3 видно, що за теплотою вибуху, швидкістю детонації і об’ємом газів розроблені заряди знаходяться на рівні кращих світових зразків, наприклад, «К-труб» фінського виробництва, які мають великий попит в Європі.

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

Оскільки вибухова суміш знаходиться в герметичній трубці, заряджання шпурів може виконуватись за будь-яких погодних умов, а працівники кар'єрів не мають прямого контакту з вибуховою речовиною. Це підвищує безпеку при виконанні вибухових робіт і культуру роботи на блочних кар'єрах. [246, 271, 272]

Розроблена технологія місцевого виготовлення дозволяє отримати К-труби будь-якої необхідної довжини (зразки труб зображено на рис. 6.6).



Рис. 6.6. Подовжені заряди К-труб на випробуваннях

До того ж, стикувальні елементи дозволяють нарощувати труби для отримання потрібної довжини, а фіксуючі елементи дозволяють фіксувати труби співвісно зі шпуром.

Випробування показали, що К-труби, виготовлені з ПЕВТ 15803-020 методом екструзії, повністю придатні, надійно захищають заряд від вологого середовища, не втрачають цілісності під час транспортування, витримують попадання прямих сонячних променів.

Про повноту детонації зарядів у трубах зроблено висновки за наявністю воронки та відсутності залишків ВР на місці вибуху.

У результаті проведених випробувань отримані такі результати:

- швидкість детонації заряду – 1,6–1,8 км/с,
- рівень детонації – повна детонація;
- усі патрони з ВР для зарядів типу К-труб детонували повністю, залишків поліетилену та зарядів не виявлено.

Висновки до 6 розділу

Пошук і розвиток інтенсивних методів відділення або розколу монолітів декоративного каменю невідворотно базується на застосуванні енергії вибуху. Оскільки динаміка в реалізації вибухових технологій пов’язана з загрозою порушення природної структури цінної сировини, паралельно ведуться пошуки способів і прийомів пом’якшення проявів цих явищ без суттєвих енергетичних втрат. Абсолютно природно, що основою цих пошуків має стати пропонована в дисертаційній роботі техніка ощадливого відділення монолітів із залученням низькошвидкісних засобів ведення вибухових робіт.

Відомо, що розробники поширеної в світовій практиці технології на основі зарядів К-труб не відмовилися від часткового введення до складу цих зарядів нітроефірів з метою досягнення заданої енергетики процесу м’якого тріщиноутворення відколювання. Відповідно в практичній площині це ставить К-заряди в один ряд зі звичайними промисловими ВР, що заперечує концепцію, прийняту в нашій роботі. З метою добору і наукового обґрунтування ефективного складу безпечної вибухової суміші для спорядження К-труб значну увагу нами приділено розробці способу виготовлення на місці виконання вибухових робіт вітчизняного аналога К-труб на основі малочутливих низькошвидкісних вибухових сумішей для якісного і безпечного відбивання блочного каменю. Як основний компонент пропонованої вибухової композиції обрано перхлорат калію (окисник), який в поєднанні з дизпаливом або нітрометаном (палива) та оксиду марганцю (каталізатор термічного розкладання). Вивчення детонаційних і термодинамічних характеристик, доповнене розрахунками енергії Гіббса хімічних реакцій термічного розкладання пропонованих композицій, свідчать про переваги розробленої вибухової системи над класичними зразками.

Отримання фракціонованих, тонкодисперсних, сферичних кристалів солей із застосуванням кристалізаторів-модифікаторів з конструктивним регулюванням потоків суспензії є перспективним напрямом проведення досліджень в напрямку розробки ефективних технологічних методів оптимізації. Розроблений метод

отримання сферичних кристалів у кристалізаторі-модифікаторі дозволяє отримати кристали різних фракцій, наближених за геометричною формою до сферичної.

Заряди, що розробляються, пропонується виготовляти безпосередньо на місці проведення вибухових робіт. Компоненти ПВР не є вибуховими речовинами. Це дозволяє підвищити безпеку при виготовленні та використанні вибухового складу, оскільки не вимагає перевезення вибухових компонентів шляхами України. Пропоновані заряди мають низьку чутливість до механічних впливів (чутливість до удару 36−40%, чутливість до тертя 3650−3740 кг/см^2), що виключає небезпеку при їх застосуванні в якості засобів відбивання блочного каменю.

Проведені випробування подовжених зарядів встановили, що при довжині заряду 25 діаметрів загасання детонації не відбулося. Зіставлення характеристик розроблених зарядів з іншими засобами для відбивання блочного каменю показує, що розроблені заряди мають низку переваг:

− зменшення витрат ВР порівняно з насипним зарядом;

− зниження кількості викидів шкідливих газів в атмосферу;

− низькі значення теплоти вибуху і швидкості детонації, що сприяє досягненню техніки «м’якого» вибуху.

З досліджень маємо висновок, що за теплотою вибуху, швидкістю детонації і об’ємом газів розроблені заряди знаходяться на рівні кращих світових зразків, наприклад, «К-зарядів» фінського виробництва, що користуються значним попитом у Європі.

РОЗДІЛ 7. РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ НИЗЬКОШВИДКІСНИХ СИСТЕМ ПІДРИВАННЯ

7.1 Розробка вітчизняної вдосконаленої неелектричної системи ініціювання

У часі тривалого промислового впровадження вітчизняної неелектричної системи «Імпульс» визначилися певні технологічні недоліки, які спровокували подальшу роботу над неелектричними системами ініціювання вітчизняного виробництва. Результатом цих робіт є розробка нового вдосконаленого варіанта вітчизняної неелектричної системи ініціювання «Хвиля» (далі – НСІ). За результатами досліджень автор брав участь у розробці ТУ «Система ініціювання неелектрична «ХВИЛЯ». Технічні умови» та ДТП «Директивний технологічний процес ДТП 24020192.06300.00005 виробництва по збиранню системи ініціювання неелектричної «Хвиля» на дільниці ПрАТ «Інтервибухпром», Додатки 10 та 11 відповідно.

Система ініціювання неелектрична придатна для ведення вибухових робіт на земній поверхні, у вибоях підземних виробок (рудниках та шахтах, безпечних за вмістом газу та пилу), дозволяє створювати схеми миттєвого та уповільненого підривання в діапазоні інтервалів часу уповільнення від 0 мс до 9000 мс. Система розрахована на основних споживачів НСІ – підприємства гірничодобувної промисловості України.

Пропонована неелектрична система ініціювання є комплексом з таких елементів:

П (поверхнева) – призначена для передачі ініціюючого імпульсу у поверхневих мережах;

С (свердловинна) – призначена для передачі ініціюючого імпульсу у свердловині, шпурові та інші заряди.

Т (тунельна) – призначена для передачі ініціюючого імпульсу зарядам у підземних умовах, тунелях та в будівництві.

Температура використання НСІ – від мінус 30° до плюс 75 ^{o}С.

Для ведення вибухових робіт на земній поверхні система складається з поверхневого ініціюючого пристрою з уповільненням (6 серій уповільнення від 0 до 109 м/с), яке виготовляється в двох варіантах:

- НСІ П зі з'єднувачем під 6 хвилеводів, свердловинного ініціюючого пристрою з уповільненням (20 серій уповільнення від 25 до 500 м/с).
- НСІ С і стартового пристрою (НСІ П з детонатором без уповільнення).
- НСІ Т (тунельний) для ведення робіт у шахтах складається з шпурових систем ініціювання зі з'єднувачем під 5 хвилеводів, ініціюючого пристрою з уповільненням (29 серій уповільнення від 100 до 9000 м/с).

Основні характеристики, параметри і розміри.

Елемент П складається з капсуля-детонатора № 6 з часом уповільнення від 0 до 176 мс, закріпленого у з'єднувачі, гумової ущільнюючої втулки і хвилеводу довжиною від 2 до 40 м.

Елемент С складається з капсуля-детонатора № 8 з часом уповільнення від 0 до 500 мс (інтервал уповільнення – 25 мс), гумової ущільнюючої втулки і хвилеводу довжиною відповідно до 40 м. Призначений для ініціювання проміжних детонаторів (шашки тротилові, патроновані вибухові речовини тощо) свердловинних, шпурових та накладних зарядів.

Елемент Т складається з капсуля-детонатора № 8 з часом уповільнення 0, 75, 100 – 1000 мс (інтервал уповільнення 100 мс), 1000–2000 (інтервал уповільнення 200 мс), 2000–7000 (інтервал уповільнення 500 мс), гумової ущільнюючої втулки і хвилеводу довжиною до 40 м. Призначений для ініціювання тунельних, свердловинних і шпурових зарядів, сформованих з емульсійних вибухових речовин, чутливих до капсуля-детонатора № 8.

Хвилевід ініціюється від іскророзрядних (пускових) пристроїв, допущених до постійного застосування, від капсуля-детонатора іншого типу НСІ при з'єднанні їх за допомогою з'єднувача, від детонуючого шнура ДШЕ з наважкою 6 і більш г/м, від електродетонатора ЕД-8-Ж.

Характеристики хвилеводу зведено до табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Характеристики детонуючого хвилеводу

Показник	Значення
Швидкість детонації, м/с	2000±200
Зовнішній діаметр хвилеводу, мм	3,0
Кількість активної речовини у 1 м, г	15–20
Міцність хвилеводу на розрив, N, після витримки при температурі: - мінус (35±5)°С; - (20±5)°С; - (85±5)°С	 не менше 12 не менше 11 не менше 9
Межа плинності хвилеводу після впливу температури мінус (35±5)°С та плюс (85±5)°С, кг	не менше 7
Граничне подовження хвилеводу, при якому зберігається передача детонації після впливу температури мінус (35±5)°С і плюс (85±5)°С, %	не менше 200
Сприйнятливість до ініціюючого імпульсу від електродетонатора, стандартного капсуля-детонатора, детонуючого шнура з наважкою не менше 6 г/м, іскророзрядного пристрою	Повна

Технічні характеристики поверхневих неелектричних систем ініціювання П:

- капсуль-детонатор № 6 (з уповільненням);
- час уповільнення: 0, 17, 25, 42, 67 і 109 мс;
- основний заряд – 0,3 г PENT;
- первинний заряд – 0,2 г флегматизованого азиду свинцю;
- матеріал гільзи – алюміній;
- діаметр гільзи зовнішній – 7,5 мм;

- довжина гільзи – 58–93 мм;
- довжина хвилеводу – відповідно до специфікації замовника ±5 % (може становити від 2 до 40 метрів);
- зовнішній діаметр хвилеводу – 3 мм;
- внутрішній діаметр хвилеводу – 1,2±0,1 мм;
- маса ВР/ 1м (хвилеводу) – 0, 17 г PENT;
- швидкість детонації у хвилеводі – 2000 м/с;
- діапазон температур – від мінус 24 до +45 °С;
- ударостійкість – >10Дж;
- міцність на розтягування хвилеводу -> 40 Н;
- з'єднувач на 5 хвилеводів;
- термін придатності – 2 роки з дати виготовлення (зберігання при температурі від мінус 30 до +35 °С) у заводський упаковці;
- клас небезпеки – 1.1 чи 1.4;
- група сумісності – В чи S.

Для контролю і візуального визначення часу уповільнення при використанні у промислових умовах систем ініціювання неелектричних їх з'єднувачі мають різний колір.

Колір з'єднувачів залежно від часу уповільнення: П (0 мс) – зелений, П (17 мс) – жовтий, П (25 мс) – червоний, П (42 мс) – білий, П (67 мс) – блакитний, П (109 мс) – чорний.

Детонатори DetEX можуть бути замінені на аналогічні інших виробників.

Технічні характеристики свердловинних систем ініціювання С:

- час уповільнення: від 0 до 500 мс (інтервал – 25 мс);
- основний заряд – 0,7 г PENT (пентаеритриттетранітрат, тен);
- довжина хвилеводу – відповідно до специфікації замовника ±5 %
- корпус/діаметр – алюмінієвий 7,6±0,1 мм;
- маса ВР/м (хвилеводу) – 0, 17 г PENT;
- зовнішній діаметр хвилеводу – 3 мм;
- внутрішній діаметр хвилеводу – 1,2±0,1 мм;

- з’єднувач на 6 хвилеводів;
- швидкість детонації у хвилеводі – 2000 м/с;
- термін придатності – 2 роки з дати виготовлення (зберігання у заводський упаковці при температурі від мінус 25 до +45 °С).

Системи ініціювання неелектричні С мають номери 1.... 20, інтервал сповільнення між номерами становить 25 мс починаючи з 25 мс (1-й номер – 25 мс, останній 20-й номер – 500 мс).

Технічні характеристики тунельних систем ініціювання Т:

- основний заряд – 0,14 г PENT;
- матеріал гільзи – алюміній;
- діаметр гільзи зовнішній – 7,5 мм;
- довжина гільзи – 58–93 мм;
- довжина хвилеводу – відповідно до специфікації замовника ±5 %;
- зовнішній діаметр хвилеводу – 3 мм;
- внутрішній діаметр хвилеводу – 1,2±0,1 мм;
- маса ВР/1 м (хвилеводу) – 0, 17 г PENT;
- швидкість детонації у хвилеводі – 2000 м/с;
- електростатична стійкість – 20 кВ/500 пФ; 1000 В АС/60 сек;
- діапазон температур – від мінус 24 до +45 °С;
- ударостійкість – >10Дж;
- міцність на розтягування хвилеводу -> 40 Н;
- з’єднувач на 6 хвилеводів;

Для контролю і візуального визначення часу уповільнення при використанні у промислових умовах систем ініціювання неелектричних їх хвилеводи мають етикетки з номером, який відповідає часу уповільнення.

Технічні характеристики хвилеводу до НСІ:

- зовнішній діаметр – 3 мм;
- внутрішній діаметр – 1,2±0,1 мм;
- овальність – 0,08 мм, максимально;
- маса РМ/1 м трубки – 0,17 г;

- швидкість детонації – 2000 м/с;
- довжина хвилеводу – на котушках 2000–3000 м;
- міцність на розтягування – > 40Н;
- термін придатності – 2 роки з дати виготовлення (зберігання при температурі від мінус 25 до +45 °С) у заводський упаковці;
- діапазон температур при використанні – від мінус 30 °С до +75 °С.

Для створення уповільнення в поверхневих вибухових мережах застосовують пристрої типу П (сторона П з поверхневим капсулем-детонатором), при використанні в поверхневій вибуховій мережі як джерело ініціювання детонуючого шнура, – піротехнічні реле типів РП-Н, РП-Д або РП-8М.

З'єднання хвилеводів пристроїв типу П, С та Т з пристроями типу П здійснюється за допомогою з'єднувачів.

При монтажі вибухової мережі до кожного капсуля-детонатора з уповільненням пристрою типу П (сторона П з поверхневим капсулем-детонатором) за допомогою з'єднувача приєднується до 6 хвилеводів ініційованих пристроїв.

Вільні кінці хвилеводів пристроїв типів П, С або Т, що виходять із з'єднувача, для виключення їхнього роз'єднання зав'язуються у вузли.

При монтажі вибухової мережі активну частину хвилеводу пристроїв типів П (відрізок хвилеводу від місця ініціювання до місця його з'єднання з поверхневим капсулем-детонатором) випрямляють без сильного натяжіння та закріплюють у з'єднувачах таким чином, щоб на хвилеводі не було кілець, петель або спіралей.

Щоб уникнути пошкодження уламками гільзи капсуля-детонатора пристрою типу П (сторона П з поверхневим капсулем-детонатором) хвилеводів інших пристроїв, останні необхідно розташовувати якнайдалі від з'єднувача. Довжина активної частини хвилеводів пристроїв, що ініціюються, не повинна бути меншою 600 мм, пасивної – менше 80 мм. Активною частиною хвилеводу пристроїв типу П, С або Т є відрізок хвилеводу від місця ініціювання до місця

з’єднання з капсулем-детонатором, пасивною частиною – від місця ініціювання до вільного кінця.

Після закінчення монтажу вибухову мережу перевіряють на правильність та повноту приєднання хвилеводів у з’єднувачі, відсутність пошкоджень та правильність розташування активних частин хвилеводів.

Схеми монтажу вибухових мереж наведено на рис. 7.1

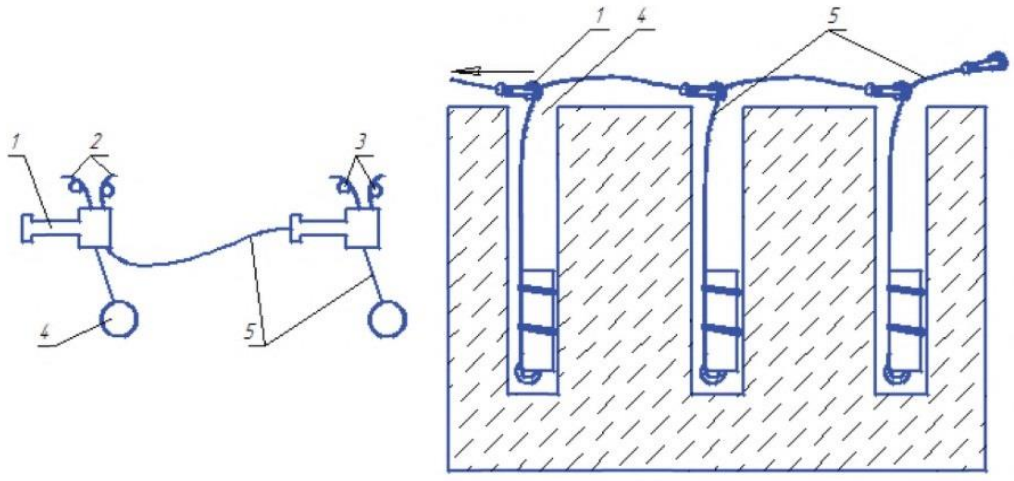


Рис. 7.1. Схеми монтажу вибухової мережі:

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

При використанні в поверхневій вибуховій мережі детонуючого шнура як джерела ініціювання, з’єднання з ним пристроїв типу П, С або Т виконують перехресно, петлею (спеціальним вузлом – один повний оборот і два напіввузли) або за допомогою з’єднувача, відповідно до рис. 7.2, у поздовжній проріз з’єднувача. Поперечний проріз призначений для фіксації детонуючого шнура.

Дозволяється застосування з’єднувачів інших конструкцій.

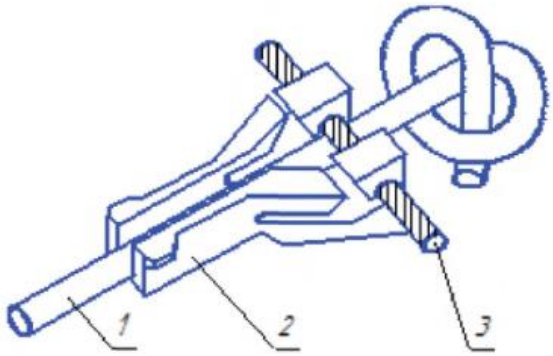


Рис. 7.2. Схема ініціювання пристроїв від детонуючого шнура за допомогою з'єднувача: 1 – хвилевід пристрою, що ініціюється; 2 – з'єднувач; 3 – детонуючий шнур

З'єднання хвилеводів пристроїв з капсулем-детонатором або електродетонатором, а також з'єднувачі в змонтованій вибуховій мережі необхідно прикривати шматком цупкого паперу або картону, присипати піском або ґрунтом, прикопувати.

При ініціювання пристроїв типу Т від детонуючого шнура, при з'єднанні його петлею (спеціальним вузлом – один повний оборот і два напіввузли) зі зв'язкою хвилеводів, хвилеводи збирають у зв'язку і обв'язують ізоляційною стрічкою або дротом у двох місцях – перше обв'язування якомога ближче до вибою, а довжина вирівняної ділянки зв'язки має бути не менше 300 мм. На вирівняній ділянці зв'язки детонуючий шнур обв'язується петлею (спеціальним вузлом – один повний оборот та два напіввузли).

Місце затягування детонуючого шнура має знаходитися між двома обв'язками на відстані 200 мм від обв'язки, ближньої до вибою. Вільний кінець детонуючого шнура фіксується ізоляційною стрічкою або дротом до зв'язування хвилеводів з боку, віддаленого від вибою. Ініціювання детонуючого шнура здійснюється капсулем-детонатором або електродетонатором. Довжина відрізків хвилеводу, що збираються у зв'язки, має перевищувати глибину шпуру на (2,0 + 0,5) м. Ініціювання всіх пристроїв, що використовуються у масовому вибуху, здійснюється одночасно. Під час проведення масових вибухів використовують пристрої однієї партії.

Для забезпечення заданої послідовності підривання свердловинних зарядів внутрішньосвердловинні уповільнення вибирають залежно від поверхневого міжрядового і міжсвердловинного уповільнення. Для більш ефективного використання енергії вибуху свердловинні та шпурові заряди необхідно ініціювати з донної частини заряду.

При дубльованому ініціюванні свердловинного заряду використовують дублюючий пристрій з тим же часом уповільнення, що і час уповільнення основного пристрою, і розміщують його у верхній частині свердловинного заряду. Основний та дублюючий пристрій ініціюють від одного джерела.

З'єднання пристроїв типу С (сторона С із внутрішньосверловинним капсулем-детонатором) з шашками типів ТГ-850 і Т 400, для виготовлення бойовиків, виконують відповідно до рис. 7.3 і 7.4

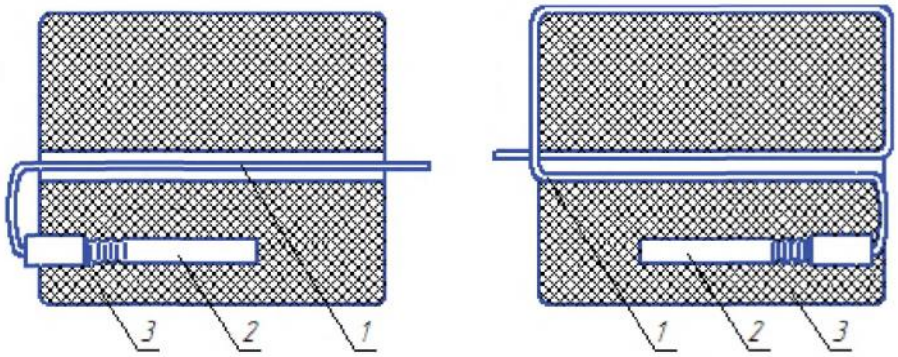


Рис. 7.3. Схема з'єднання пристроїв з шашкою типу Т-850 з отвором під капсуль-детонатор: 1 – хвилевід пристрою; 2 – капсуль-детонатор із уповільненням; 3 – шашка.

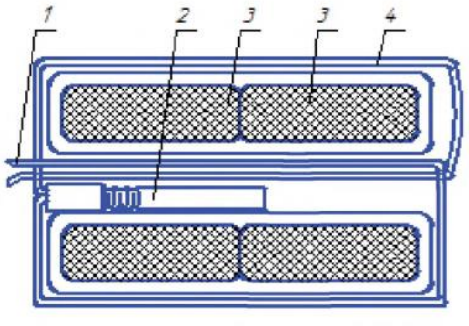


Рис. 7.4. Схема з'єднання пристроїв з шашкою типу Т-400 без отвору під капсуль-детонатор (одно-наскрізний отвір під детонуючий шнур): 1 – хвилевід пристрою; 2 – капсуль-детонатор із уповільненням; 3 – шашка; 4 – ДШ

З’єднання пристроїв типів Т, С (сторона С із внутрішньосвердловинним капсулем-детонатором) з патронами ВР для виготовлення бойовиків, має відповідати рис. 7.5.

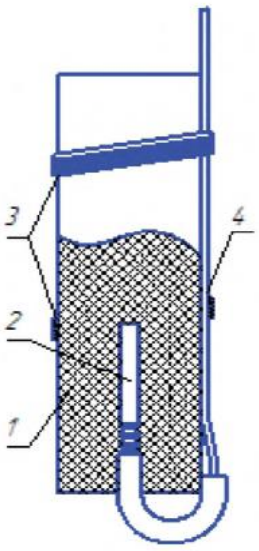


Рис. 7.5. Схема з’єднання пристроїв з патроном ВР:

1 – патрон ВР; 2 – капсуль-детонатор з уповільненням; 3 – дріт; 4 – хвилевід пристрою

7.2 Практичні аспекти реалізації внутрішньосвердловинних уповільнень з використанням пасивного розгалужувача

Процес хімічного перетворення вибухової речовини, що супроводжується формуванням детонаційної хвилі з переходом її енергії в ударну хвилю, суттєво залежить від повноти детонації заряду, яка так само визначається щільністю заряджання, конструкцією заряду, особливостями його ініціювання та технологією ведення вибухових робіт.

Явище загасання детонації, вигоряння ВР або повної відмови детонації можна пов’язати зі змінами режиму детонації під впливом типу і потужності ініціатора [189], з фізичними властивостями ВР в заряді, характером взаємного розташування зарядів у системі, співвідношенням між діаметром заряду та зарядної виробки, черговістю вибуху зарядів та частин зарядів при каскадному ініціюванні.

Відома низка причин неповної детонації та вигоряння ВР в шпурах, серед яких виокремлюється мала щільність заряджання, наявність радіальних зазорів (канальний ефект), переущільнення зарядів при груповому підриванні під дією ударних хвиль, що генеруються вибухом суміжних зарядів, тобто акустичної взаємодії зарядів. Наслідком зіткнення або послідовного впливу ударних хвиль може бути як переущільнення ВР заряді, так і зсув частин заряду в свердловині або патронів у шпурі з погіршенням умов поширення детонаційного процесу [146]. Деформація частин свердловинного заряду ВР, а також детонаторів хвилями стиснення від вибуху сусідніх зарядів або частин зарядів призводить до втрати детонаційної здатності ВР та ініціюючої здатності детонаторів.

Відомо, що конструкції зарядів, схеми їх розташування в системі та послідовність підривання значною мірою визначають вибір засобів ініціювання. Поєднання цих елементів системи підривання має забезпечувати як необхідний ступінь руйнування породного масиву, так і надійність спрацьовування зарядів у системі, що є основою успішного застосування відомих способів ініціювання. Водночас поєднання застосовуваних способів ініціювання із системами зарядів різної конструкції не завжди дають позитивні результати. Це пов’язано з тим, що у процесі формування зарядів за відповідних засобів їх ініціювання не враховується характер розвитку процесу детонації залежно від конструктивних елементів заряду та ініціатора. Тому обґрунтування механізму розвитку процесу детонації під час вибуху зарядів різної конструкції (суцільних, розосереджених, з осьовими зазорами та інших.) разом із елементами прийнятої системи ініціювання є важливою науково-прикладним завданням.

Масштабно вживаний у вітчизняній практиці спосіб ініціювання на основі детонуючого шнура досить повно продемонстрував не лише його переваги, але і недоліки. До останніх слід віднести необхідність розробки та застосування на одному масовому вибуху певного асортименту детонуючих шнурів. Це дозволить забезпечити:

- надійну передачу ініціюючого імпульсу від детонатора бойовику;

- мінімальну інтенсивність повітряної ударної хвилі під час вибуху наземної магістральної та дільничної мережі ДШ;

- захист свердловинного заряду сумішевої ВР від переущільнення при вибуху внутрішньосвердловинних відрізків ДШ, що ведуть до донного бойовика;

- виключення утворення каналів у матеріалі набійки, призначеної для надійного замикання продуктів вибуху на початковій стадії його розвитку.

Потреба у досить широкому асортименті ДШ не стільки ускладнює процес його виробництва, скільки створює труднощі на стадії ведення зарядних робіт із застосуванням різних типів шнурів. Водночас застосування ДШ як високошвидкісного засобу передачі ініціюючого імпульсу між частинами розосередженого заряду дозволяє реально використовувати у вибуховій техніці фактор взаємодії ударних хвиль у режимі мікросекундних уповільнень, що недоступно при інших менш швидкісних способах передачі ініціюючого імпульсу.

Розглянемо роль ініціюючих конструктивних елементів низькошвидкісної неелектричної системи ініціювання. Істотні переваги детонуючих хвилеводів полягають в універсальності системи неелектричного ініціювання, що дозволяє практично вперше масово освоїти давно доведені переваги каскадного ініціювання розосереджених зарядів, а також технології зустрічного ініціювання в контурному підриванні та відділенні монолітів при видобутку блочного каменю. Відсутність бічних пошкоджень хвилеводу забезпечує збереження заданих фізичних характеристик набійки та заряду, а досить потужний стрибок тиску на виході з трубки хвилеводу (порядку 2,5–3,0 МПа) гарантує надійне спрацьовування капсуля або передачу імпульсу приєднаному співвісно відрізку хвилеводу.

Розглянемо переваги і недоліки систем ініціювання на основі ДШ і хвилеводу спираючись на детонуючі характеристики детонуючих елементів цих систем у світлі завдань короткосповільненого підривання, наприклад, при каскадному ініціюванні свердловинних зарядів. В цілому масова реалізація методу свердловинних сповільнень до появи детонуючих хвилеводів була

практично малоздійсненною, оскільки вимагала донного ініціювання частин розосередженого свердловинного заряду. Водночас у випадку технології електричного ініціювання сповільнюючий елемент – капсуль-електродетонатор потрібно розміщувати в нижній частині заряду, що не допускається чинними правилами, а при підриванні з використанням ДШ потрібно застосування малопотужних його різновидів з посиленням в області бойовика для гарантованого ініціювання. Застосування трубчастих детонуючих хвилеводів замість ДШ полегшує завдання донного ініціювання заряду, проте варто порівняти можливості методів з точки зору узгодженості детонаційних процесів в окремих частинах розосередженого заряду, або в ділянках суцільного свердловинного заряду з урахуванням різниці під час застосування окремих ініціюючих імпульсів і відповідно властивої різним методам.

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

Використовуючи для кількісної оцінки імпульсу вибуху зарядів різних ВР у каскаді залежність 7.1 [193]:

$$I_{max} = n_ч \, 0{,}087 \, \rho_{вр} \, D^2 \, t, \qquad (7.1)$$

де $n_ч$ – кількість частин ВР по довжині заряду, $\rho_{вр}$ – щільність ВР, D – швидкість детонації, розраховано величину імпульсу і його тривалість для суцільних подовжених зарядів гранулотолу, грамоніту, амоніту № 6ЖВ та ігданіту, а також для комбінованих зарядів ВР. Довжина окремої ділянки заряду становила 1,3 м.

Розрахунки та експериментальні дослідження з визначенням радіусу воронки вибуху при каскадному ініціюванні дозволили встановити, що оптимальні поєднання ВР за силовими та часовими параметрами імпульсу представлені парами амоніт № 6жв + ігданіт, грамоніт + ігданіт та амоніт № 6жв + грамоніт. Максимум радіусу воронки вибуху досягається, якщо кількість пар становить n = 3.

Виключивши з розгляду небезпечний електричний метод ініціювання окремих частин колонки заряду, проаналізуємо можливості та доцільність використання ДШ та детонуючого хвилеводу. Сутність каскадного ініціювання полягає у досягненні певної послідовності зіткнення детонаційних хвиль у заряді та ударних хвиль у гірській породі. Якщо застосовується заряд, складений почергово ділянками високочутливих і низькочутливих ВР, застосування для їх ініціювання стандартного ДШ призводить до початкової детонації в парах потужних ВР від ДШ, а потім від них – до низькочутливих ВР, які не детонують від ДШ.

В цілому заряд підривається «каскадом», забезпечуючи зіткнення ударних хвиль у породі, посилення приблизно в 1,6 рази максимальних стискуючих напружень [194] та виникнення інтенсивних зсувних напружень. Якщо виходити з напряму і співвідношення швидкостей детонації ДШ і різних частин заряду ВР, місце зустрічі фронтів детонаційних хвиль має бути нижчим рівня середини проміжку зі слабкої ВР (рис. 7.6). Тут не береться до уваги наявність уздовж всього заряду слабшого сигналу, що генерується самим ДШ.

Оскільки процес ініціювання безпосередньо пов’язаний з впливом ДШ при більш потужній ВР, виходячи з геометричних побудов на рис. 7.6, при швидкостях детонації ДШ 8000 м/с і швидкості детонації низькочутливої ВР 2500 м/с, процес детонації останнього в нижній частині почнеться на (1,3 м : 8000 м/с) = 163 мкс пізніше порівняно з верхньою його частиною. За цей час фронт детонаційної хвилі від верхнього торця малочутливої ВР зі швидкістю детонації 2500 м/с поширюється по осі заряду (0,000163 с х 2500 м/с) = 0,41 м. Зустріч конічних фронтів ударних хвиль 1 і 2 відбудеться на відстані 0,86 м або

через 344 мкс після початку детонації. Водночас фронт ударної хвилі 1 в породному масиві на рівні верхнього торця ділянки малочутливої ВР віддаляється по нормалі від осі заряду на 2 м, а фронт ударної хвилі 2 – на відстань 1,05 м.

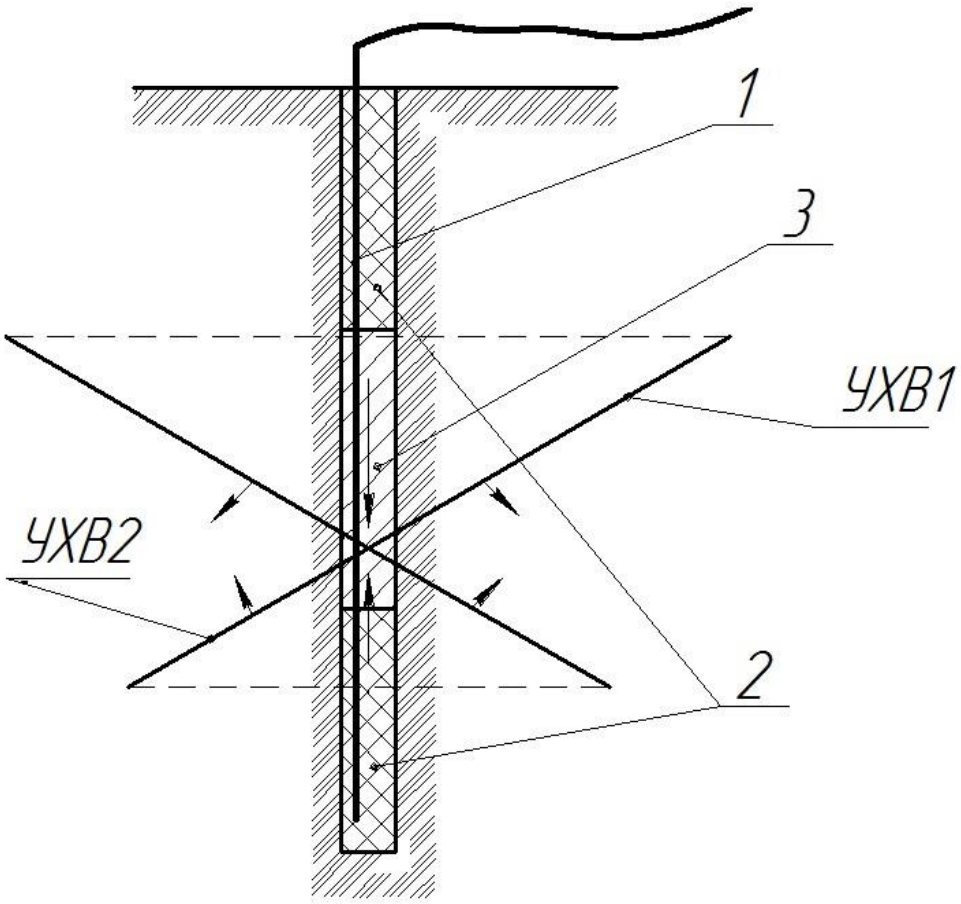


Рис. 7.6. Конструкція заряду та послідовність розвитку детонаційного процесу при каскадному ініціюванні детонуючим шнуром, де: 1 – ДШ; 2 – заряд потужної ВР; 3 – заряд малочутливої ВР; УХВ1, УХВ2 – зустрічні фронти ударних хвиль

Ці розрахунки дають уявлення про просторово-часові параметри детонаційного процесу при каскадному ініціювання, а саме, про те, що взаємодія каскаду зарядів у кожній парі відбувається на хвильовому рівні в межах мікросекундних інтервалів на відстані від осі заряду, що не перевищує половини відстані між зарядами. При одночасному вибуху ряду (групи) зарядів їх взаємний вплив зводиться до мінімуму, а отже, зменшується ймовірність акустичної

взаємодії ударних і детонаційних хвиль, здатної негативно впливати на розвиток процесу детонації в суміжних зарядах, призводячи до вигоряння і відмов.

Реалізація розглянутої схеми каскадного підривання із застосуванням зворотної схеми розвитку процесу, тобто донного ініціювання заряду вимагатиме використання ДШ зі зменшеною витратою ВР до бойовика, оскільки при нижньому розташуванні бойовика штатний ДШ неминуче створює умови для послідовного ініціювання, починаючи від верху заряду чутливих до ДШ частин каскаду. Потім, від нижнього бойовика вгору знадобиться прокладання відрізка штатного ДШ, здатного ініціювати відповідні ділянки заряду. Звичайно, така схема комутації ускладнить процес заряджання у зв'язку зі збільшеною витратою ДШ.

Варіант схеми із застосуванням інертних проміжків становить інтерес у плані простого скорочення витрати ВР на дроблення, а й у зв'язку зі зміною просторово-часового характеру розподілу хвильових фронтів. Якщо швидкість поширення акустичного сигналу по інертному матеріалу становить близько 400 м/с, місце зустрічі конічних фронтів УХВ 1 і УХВ 2 в межах інертного проміжку істотно не переміщається. Проте, в силу більш істотної різниці в швидкостях у межах інертного проміжку і в гірській породі кут зустрічі фронтів наближається до 0°, що супроводжується зростанням інтенсивності розтягуючих напружень.

Дослідницькі вибухи [192] показали, що оптимальна довжина інертних проміжків становить 1,0–1,2 м при загальній висоті колонки заряду 10,0 м, а оптимальна кількість інертних проміжків $n_{ip} = 2$. Промислові вибухи на кар'єрах показали, що за наявності в зарядах 1–3-х проміжків дроблення масиву помітно покращується – на 20 % зростає вихід дрібних фракцій та на 41 % знижується вихід негабариту. Однак складнощі з застосуванням зворотного ініціювання заряду в цьому способі зберігаються, особливо у зв'язку з ймовірністю відмов окремих частин заряду внаслідок переущільнення штатним ДШ.

Відповідно до цього варто розглянути можливості сучасного способу ініціювання із застосуванням засобів неелектричної системи типу «Нонель» [194]. Вирішальною перевагою детонуючого хвилеводу є відсутність бічного на

колонковий заряд або його елементи, складені з різних ВР. Однак водночас необхідно вирішити питання зростання витрати детонуючого хвилеводу, оскільки кожна пара в каскаді або кожна частина розосередженого інертними проміжками свердловинного заряду вимагатиме підведення окремого відрізка хвилеводу до бойовика для спричинення ініціюючого імпульсу заданої послідовності.

Сучасна вибухова техніка вирішує це питання застосуванням ковзаючих бойовиків – детонаторів [195], що дозволяють застосувати схему внутрішньосвердловинних уповільнень з введенням в систему «Нонель» низькоенергетичного детонуючого шнура, який передає ініціюючий імпульс до відгалуження трубчастого хвилеводу в капсуль-детонатор. Завдяки ускладненню схеми із застосуванням високошвидкісного ДШ часові параметри процесу передачі ініціюючого імпульсу скорочуються. Але водночас застосування мілісекундних уповільнень всередині свердловини виключає можливість взаємодії зарядів в акустичному режимі, створює передумови для їх взаємодії на рівні переміщень, породжуючи небезпеку взаємного механічного деформування суміжних зарядів із можливістю їх часткового переущільнення або вигоряння відповідно. Отже, якщо спиратися на принцип взаємодії елементів свердловинного заряду на хвильовому рівні, варто використовувати у бойовику капсулі-детонатори миттєвої дії.

При зворотному ініціюванні свердловинного заряду ініціюючий імпульс подається в донну частину заряду по детонуючому хвилеводу і далі вгору по заряду – із застосуванням комбінованого ініціатора зі штатного ДШ і необхідної кількості бойовиків. Для максимального наближення процесу ініціювання до режиму взаємодії високошвидкісних фронтів варто скорочувати довжину інертних проміжків до мінімуму, що становить згідно з експериментальними даними 0,2 м.

Практика короткосповільненого підривання систем суцільних свердловинних зарядів при масових вибухах передбачає переважно їх заряджання з розташуванням двох бойовиків у верхній та нижній частинах заряду. Якщо застосовувати бойовики із стандартною довжиною відрізків хвилеводу, тобто

виходити з рівності відрізків хвилеводу, що відводять початковий імпульс від магістралі до обох бойовиків, витрата ДХ при двоточковому ініціюванні подвоюється. Так, при глибині свердловини 14 м та довжині заряду 10 м довжина відрізка ДХ становитиме 16 м, а сумарна довжина ДХ – 32 м.

Якщо привести довжину верхнього хвилеводу у відповідність до глибини закладення верхнього бойовика, сумарна довжина ДХ скоротиться до 22 м (рис. 7.7, а). Однак водночас внаслідок суттєвої різниці у швидкостях детонації ДХ та ВР (відповідно 2000 і 4000 м/с) детонаційний фронт у заряді випередить прихід ініціюючого імпульсу хвилеводом до нижнього бойовика, тобто взаємодія детонаційних фронтів у заряді виключається. Проблема може бути вирішена з застосуванням передаючого пристрою – подвійного розгалужувача (рис. 7.7, б).

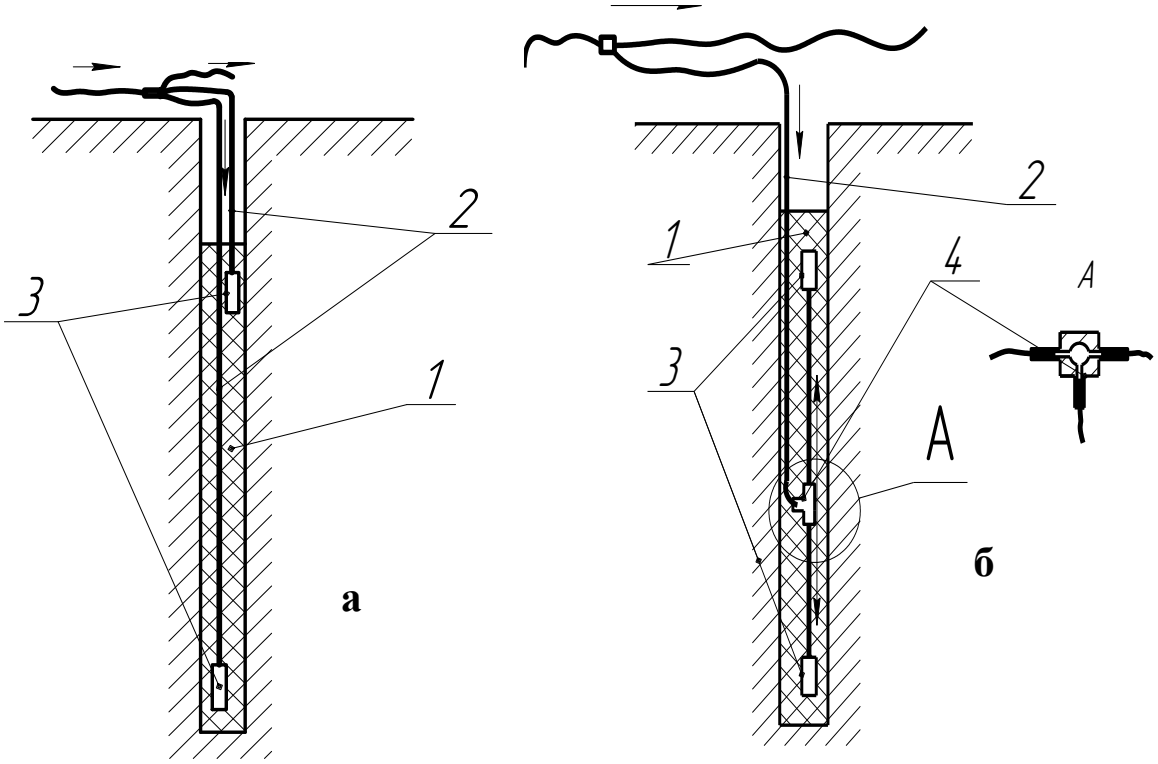


Рис. 7.7. Схеми ініціювання свердловинного заряду: а – окремими відрізками ДХ; б – через розгалужувач. 1 – заряд ВР; 2 – ДХ; 3 – проміжний детонатор (бойовик); 4 – розгалужувач

Місце розташування розгалужувача на хвилеводі спричинене лише призначеним місцем зустрічі фронтів хвиль детонації по висоті заряду та технічними прийомами його встановлення у комплексі з хвилеводом та бойовиками. Наприклад, якщо місце зустрічі ударних фронтів, що генеруються

окремими ділянками свердловинного заряду, передбачити на його середині, розгалужувач встановлюється на цьому рівні, водночас загальна витрата ДХ становитиме близько 20 м. Значення розгалужувача істотно зростає при каскадному ініціювання зарядів або їх розосередженні інертними проміжками.

Таким чином, вибір засобів масового ініціювання зарядів визначається низкою таких факторів, як конструкція зарядів, схеми їх розташування в системі, послідовність підривання, надійність спрацьовування схеми та зарядів у системі, необхідний ступінь руйнування масиву, виключення небажаних впливів на екологію, економічні показники.

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

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

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

Сенс використання НСІ при відкритих гірничих роботах пояснюється окремими графічними схемами. На рис. 7.8 та рис. 7.9 наведено приклади виконання схем короткоуповільненого підривання свердловинних зарядів на кар'єрах при діаметрі свердловин 200–250 мм. Цифрами біля свердловин на схемах позначений проєктний час уповільнення вибуху поверхневою мережею у мілісекундах [190].

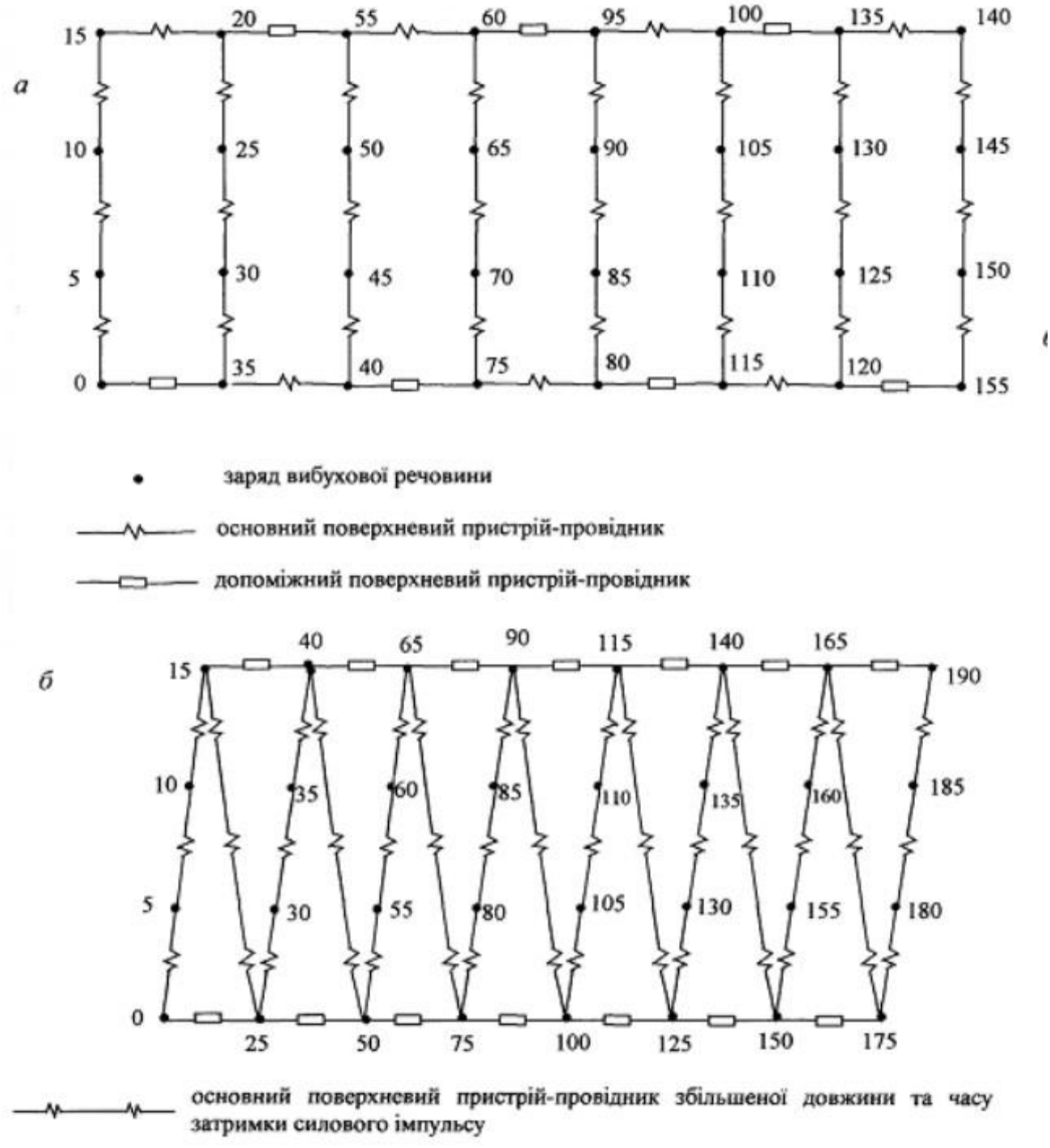


Рис. 7.8. Приклади виконання схем короткоуповільненого підривання свердловинних зарядів на кар'єрах

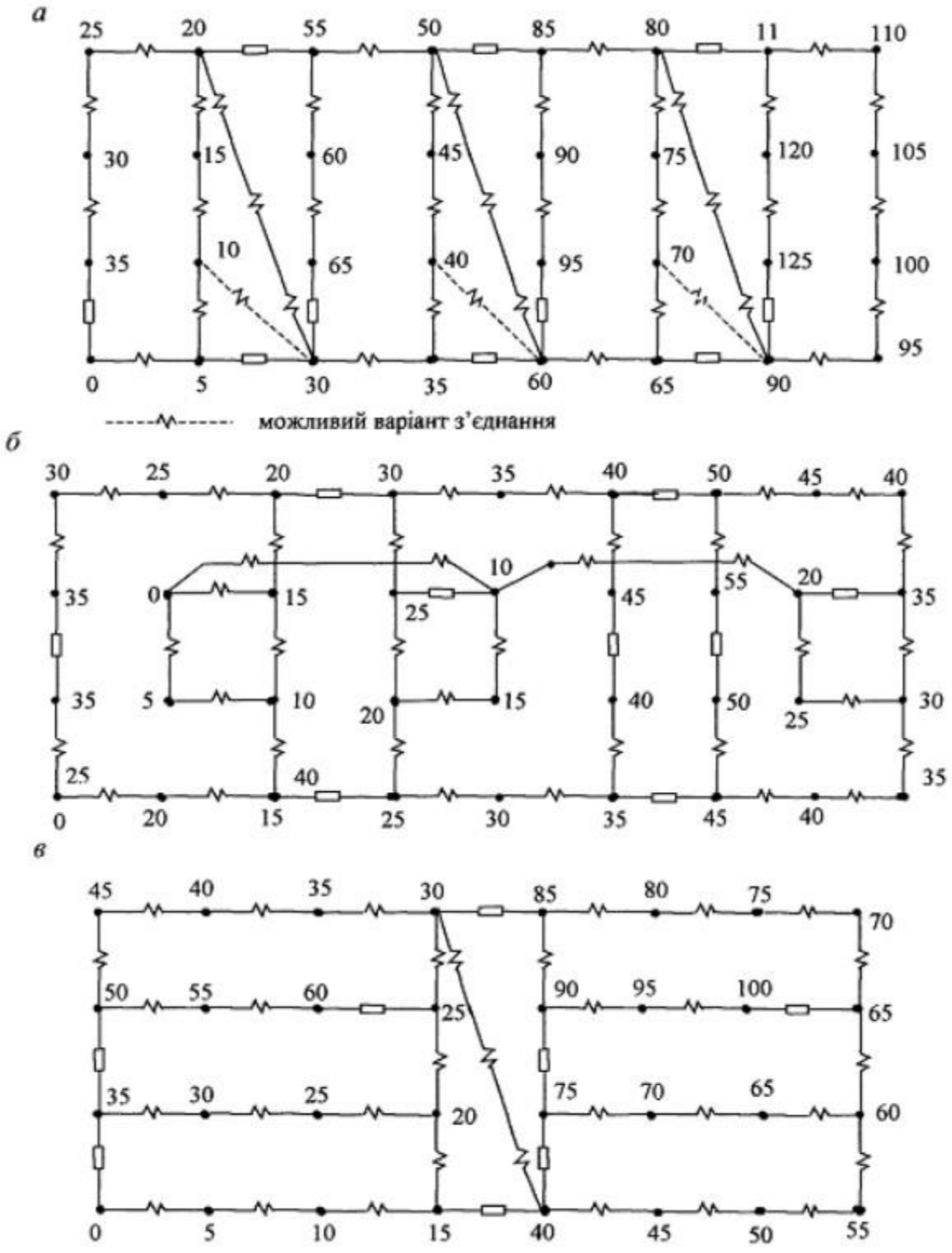
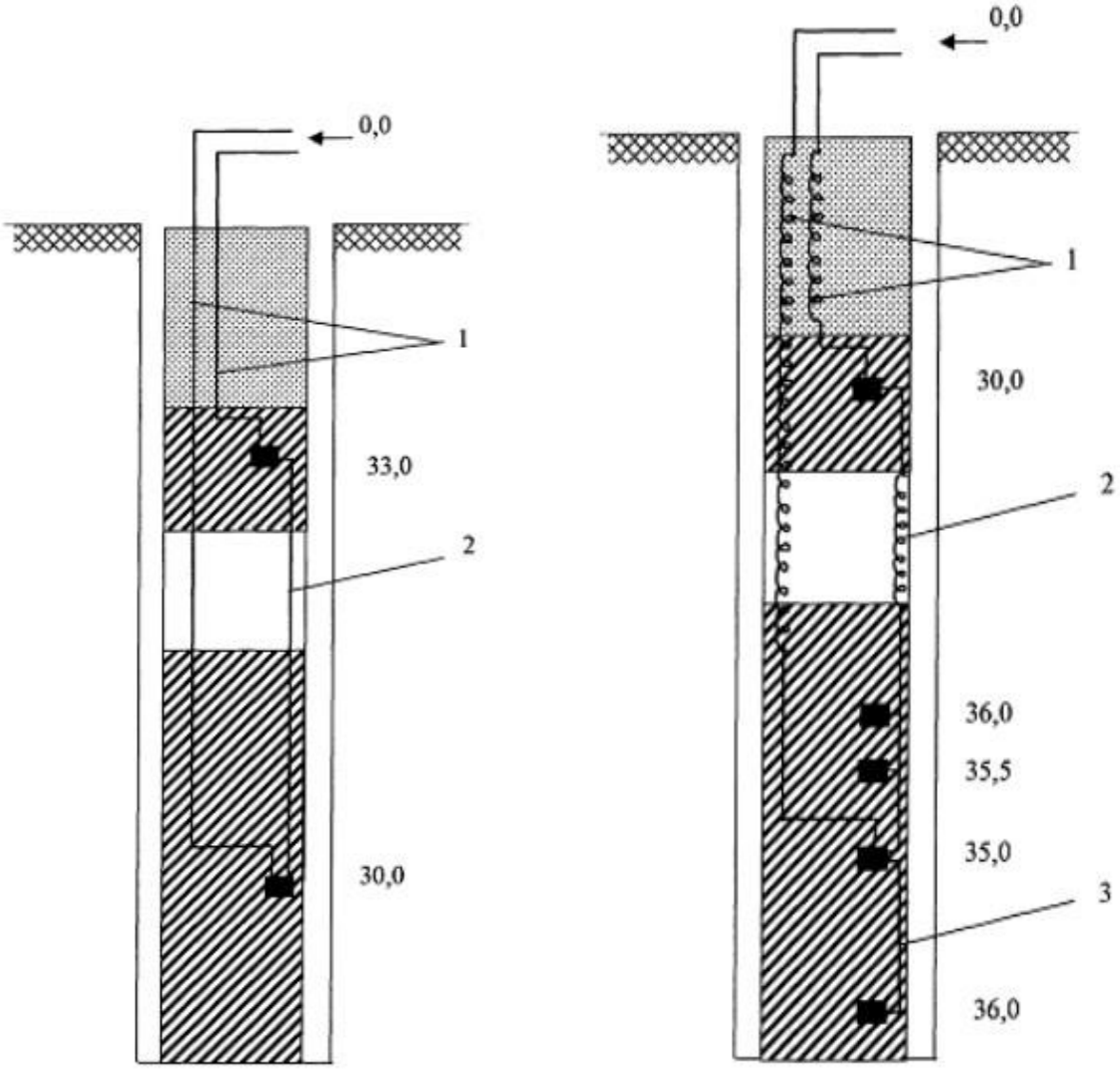


Рис. 7.9. Приклади виконання схем короткоуповільненого підривання свердловинних зарядів на кар'єрах

На рис. 7.10, *а* зображено схему свердловинного заряду вибухової речовини порівняно малої висоти (орієнтовно до 15 м) з повітряним проміжком. На рис. 7.10, *б* наведено те ж, але в глибокій свердловині (висота заряду орієнтовно

більше 15 м). Цифрами на рисунках позначено: 1 – основні свердловинні пристрої-провідники; 2 – внутрішньосвердловинні пристрої-провідники двоспрямованої дії; 3 – внутрішньосвердловинні пристрої-провідники односпрямованої дії; цифри праворуч означають час спрацьовування засобів ініціювання вибуху в заряді.



а *б*

Рис. 7.10. Схема свердловинних зарядів вибухової речовини

Кращим варіантом реалізації неелектричної системи ініціювання є варіант, у якому з’єднання між окремими устроями-провідниками здійснюється за допомогою вузлів. У цьому варіанті менша імовірність підбивки мережі уламками з’єднувачів, система ініціювання менше піддається впливу погодних умов, нижча

по вартості. Як резервні провідники може бути використаний детонуючий шнур із відповідними піротехнічними пристроями-уповільнювачами.

7.3 Спосіб виготовлення вибухового складу К-заряду на місці виконання вибухових робіт

Дослідження велися у напрямку створення вибухового складу з невибухових компонентів [222].

Розробка належить до галузі хімії та технології промислових вибухових речовин і може бути використана в гірничорудній промисловості для відбивання блочного каменю шляхом підривання.

Як прототипи було обрано відомі способи виготовлення вибухових сумішей в промислових умовах шляхом змішування двох або трьох невибухових компонентів, що в результаті забезпечує композиції вибухові характеристики. Наприклад при змішуванні аміачної селітри, яка не є вибуховим матеріалом, з дизельним паливом або мінеральними мастилами, які також не є вибуховими матеріалами, отримаємо вибуховий склад під відомою назвою «Ігданіт». Аміачну селітру використовують в народному господарстві як добрива, а дизельне паливо та мінеральні масла – як паливно-мастильні матеріали. Лише після їх змішування отримується вибуховий склад. Однак частіше «Ігданіт» виготовляють на спеціальних підприємствах і на місця проведення вибухових робіт направляють уже готову вибухову суміш. Перевезення вибухових складів транспортом створює небезпеку та потребує спеціальних засобів безпеки.

Також відомий спосіб виготовлення вибухового складу з невибухових матеріалів для відбивання блочного декоративного каменю шляхом змішування перхлорату калію з каталізаторами розкладу оксидів металів або азотнокислого барію, а в якості пального дизельного палива [223]. Складові матеріали (перхлорат калію з високоенергетичними підсилювачами і каталізаторами розкладу і дизельним паливом) змішують на підприємстві та споряджають в пластикові трубки, кінці яких герметично закривають корками. Такі трубчаті

заряди з вибуховою сумішшю перевозять на місця проведення вибухових робіт. Перевезення вибухових зарядів потребує спеціального транспорту, узгодження маршруту з органами сервісного центу МВС та охорони небезпечного вибухового вантажу. Звичайно заряди завозять у кількості, яка забезпечує довгострокове виконання вибухових робіт. А оскільки вибухові заряди необхідно зберігати, для цього треба мати складські приміщення, охороняються

Завданням розробки є приготування вибухового складу для відбивання блочного каменю за місцем проведення вибухових робіт.

Сутність розробки полягає в тому, що пропонується виготовляти вибуховий склад з невибухових компонентів безпосередньо на місцях проведення вибухових робіт, тобто на прикар'єрному пункті. Невибухові матеріали після змішування утворюють суміш з вибуховими характеристиками. Це дозволить виключити перевезення вибухових складів від підприємства-виробника спеціальним транспортом по території країни, що пов'язано з безпекою для населення та зменшити кількість охоронюваних складських приміщень.

Поставлене завдання вирішується тим, що на підприємстві виготовляють пластикові (поліетиленові) трубки, заповнюють їх підготовленим перхлоратом калію з каталізаторами розкладу та герметично закривають корками. Оскільки трубки споряджені невибуховим матеріалом, їх відправляють на кар'єри звичайним автомобільним або залізничним транспортом, де вони можуть зберігатися в звичайних матеріальних складах. Горючі компоненти (дизельне паливо, мінеральні олії) підприємства закуповують на місцевих заводах або АЗС. Виготовлення вибухових зарядів виконується на місцях проведення вибухових робіт шляхом заливання необхідної кількості горючого компоненту в пластикові трубки, заповнені ПХК. Для цього відкривають корки і заливають горючий компонент. Після цього трубчаті патрони готові до використання для відбивання блочного каменю.

З метою експериментальної перевірки способу були виготовлені поліетиленові трубки діаметром 20 мм і довжиною 400 мм. Також виготовлені поліетиленові корки-заглушки для герметизації трубок. ПХК сушили в термошафі

при температурі 70±5 °С до вмісту води не більше 0,2 %. Потім ПХК подрібнювали у кульовому млині та просіювали через сито з діаметром отворів 400 мкм. Оксид металу (в даному випадку оксид марганцю MnO_2), протирали через сито з діаметром отворів 100 мкм. Компоненти вибухового складу змішували в лабораторному змішувачі з зет-подібними лопатями. Спочатку завантажували перхлорат калію, потім додавали каталізатор – оксид марганцю і перемішували впродовж 10 хвилин. Приготовлену суміш засипали в поліетиленові трубки і закривали корками.

Підготовлені поліетиленові трубки з перхлоратом калію і каталізатором розкладання та окремо дизельне паливо в каністрі перевозили на дослідний майданчик для одержання вибухової суміші та визначення вибухових характеристик. Для змішування компонентів брали поліетиленовий циліндр з ПХК, ставили його вертикально і, відкривши з однієї сторони корок, заливали розрахункову кількість дизельного палива. В одному циліндрі міститься 120 грамів ПХК з каталізатором. Для отримання вибухової суміші ПХК:ДП в співвідношенні 88:12 необхідно додати 96 мл дизельного палива. Рівномірний розподіл дизельного палива в суміші спостерігається до його концентрації 14–15 %, при підвищенні концентрації відбувається стікання палива. Встановлено, що для повного просочення ПХК дизельним паливом у трубці діаметром 20 мм і висотою 400 мм суміш необхідно витримати до 50 хвилин. Спосіб виготовлення вибухової суміші на місцях проведення вибухових робіт не потребує витрат на допоміжне дороге обладнання: достатньо мати мірні ємності або циліндри.

Для перевірки якості змішування компонентів за даним способом, тобто якості виготовлення вибухової суміші, визначали швидкість детонації за методом Дотриша. Ініціювання вибухового заряду проводили з допомогою електродетонатора ЕД-8. Проведено три паралельні визначення. У всіх випадках вибуховий склад детонує надійно, швидкість детонації становила 1830 м/с. Це дозволило зробити висновок, що спосіб виготовлення зарядів за місцем виконання вибухових робіт придатний для практичного використання.

Автор брав участь у розробці українських К-труб, що споряджуються на місці виконання вибухових робіт. За результатами випробувань на Івано-франківських кар'єрах ТОВ «Буропідривник» отримано «Акт проведення контрольних випробувань низькошвидкісних зарядів місцевого виготовлення для відбивання блочного каменю», Додаток 19.

7.4 Специфічні масові рухи деформованого вибухом середовища в технологічних рішеннях

Технічний прогрес в гірництві, будівельній галузі, геоінженерії, при виконанні робіт спеціального призначення значною мірою базується на застосуванні енергії вибуху з метою відділення великих мас чи окремих блоків від масиву, руйнування гірських порід для подальшої переробки відбитої гірської маси, виконання масових земляних робіт в шляховому, меліоративному, гідротехнічному будівництві, ущільненні структурно нестійких ґрунтів для покращення їх несучої здатності в будівництві чи для надання їм підвищених протифільтраційних властивостей, для утворення в стисливих ґрунтах камуфлетних порожнин спеціального призначення тощо. Удосконалення перелічених вибухових технологій і розробка нових потребує адекватного прогнозування зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів і відповідного кінцевого результату деформування вибухом середовища з урахуванням низки специфічних явищ. Ці явища в більшому або меншому ступені (або повноцінно, або частково) притаманні розвитку механічного ефекту вибуху в будь-якому середовищі – скельному, ґрунтовому, водному, газовому та ін. Вони пов'язані не лише зі стадією зародження і зіткнення фронту потужної ударної хвилі з певною ділянкою середовища, а й з подальшим протяжним у часі періодом післядії, в якому більшу або меншу вагу відіграє квазістатична стадія розширення газових продуктів вибуху і подальші деформаційні явища. В розвитку цього процесу приорітет належить третій стадії, під час якої проявляються реологічні властивості середовища, На перший план виходять неоднозначні деформаційні перетворення в середовищі як його реакція на динамічне збурення.

По суті в середовищі, де діють інтенсивні силові поля з тенденцією швидкого їх затухання через дисипативні втрати, відбуваються різноспрямовані масові рухи. Очевидним результатом таких масових явищ може бути не лише пряме подрібнення скельного масиву, покращення носійної здатності ґрунтового масиву шляхом його ущільнення, формування в ньому порожнин різного технологічного призначення. Найбільш виразно особливості постадійного деформаційного перетворення середовища (післядія вибуху) відбувається в стисливому трикомпонентному середовищі – ґрунтовому масиві, як модель з найбільш виразною поведінкою на стадії післявибухової консолідації. Тому є сенс розглянути його реакцію на динамічне збурення, оскільки для інших середовищ ця стадія менш виразна.

Розглядаючи наявні надбання теоретичної та прикладної динаміки ґрунтів, можна вирізнити низку специфічних явищ, а також позначити певні «білі плями» в теорії та експериментальній динаміці. Теорія і експеримент взаємодіють не абсолютно паралельно, а найчастіше саме заповнюючи прогалини, що не піддаються вивченню обраним методом (теоретичним чи експериментальним).

Так, наприклад, неможливо в полігонних умовах вивчити явища, що відбуваються на контакті заряду ВР з ґрунтом. Поведінку ґрунтового масиву під дією хвилі напружень з інтенсивністю в десятки тисяч МРа можна передбачити, лише маючи дані про динамічну стисливість ґрунту, отримані на спеціальних (наприклад, рентгенівських) установках в лабораторних умовах. У такому випадку пріоритет належить теоретичним побудовам. Однак при таких побудовах варто мати уявлення щодо деформаційних процесів у ближній зоні. В цих умовах потрібен і польовий експеримент, який доводить, наскільки складною є перебіг і кінцевий результат розподілу деформацій в ґрунтовому масиві.

Порівняння картини перерозподілу і взаємного переміщення компонентів деформованого ґрунту, отриманої в полігонних умовах, з результатами теоретичних пошуків свідчить про те, що теорія в стані найбільш детально описати навантажувальну ділянку діаграми стиснення, навіть до надвисоких тисків, притаманних ближній зоні дії вибуху. Щодо розвантажувальної частини

діаграми, де вступають в силу реологічні явища, їх теоретичне описання надзвичайно складне.

Звідси видно обмежену можливість теоретичного передбачення залишкових механічних явищ, що спостерігаються в ґрунті після закінчення деформаційного процесу. Наприклад, у найбільш наближених до практики теоретичних роботах наводяться розрахунки параметрів вибухової порожнини. Однак ці параметри відбивають теоретично стан процесу лише до досягнення максимуму радіуса порожнини і не дають усталеного уявлення про подальші масові переміщення в часі та просторі в межах зони залишкових деформацій.

Дослідження розвитку деформаційного процесу в часі [202, 204, 205] при експериментах у лесовому ґрунті дозволили встановити реальний вид переміщення шарів ґрунту і стінок газової порожнини під час вибуху. Доказом слугує аналіз отриманих експериментально епюр хвиль напружень і деформацій у вологому лесі [208] в умовах камуфлетного вибуху плоского заряду масою 0,3 кг/м^2 (рис. 7.11, 7.12). Одночасно в дослідженому масиві розміщувалися на відстані від 20 до 80 см п’єзометричні датчики напружень і механічні датчики переміщень. Оброблена інформація від кожного датчика у вигляді епюр розвитку напружень і деформацій в часі наведена на рис. 7.8 та 7.9.

На кривих ε(t) (залежності 1, 2 рис. 7.12) виразно помітне тяжіння середовища до пульсаційних рухів в часовому діапазоні 20 (графік 1) – 60 мс (графік 2), тоді як силове поле або вже датчиком не фіксується (залежність 1 на рис. 7.11), або знаходиться в стадії затухання (залежність 2 на рис. 7.11).

Подібні вимірювання, виконані на відстанях від площини заряду 10, 20, 30, 40, 60, 80 см, дозволили перейти до координат σ(R) і ε(R) для різних моментів часу. Вибірково деякі характерні залежності ε(R), зафіксовані на 10-й, 20-й, 40-й і 50-й мс наведено на рис. 7.13.

Отримані залежності демонструють, як однозначний процес розширення деформаційного поля з відстанню від заряду вже на 40-й мілісекунді різко поділяється на 2 зони підвищеної щільності – від 0 до 10 см і від 25 до 80 см.

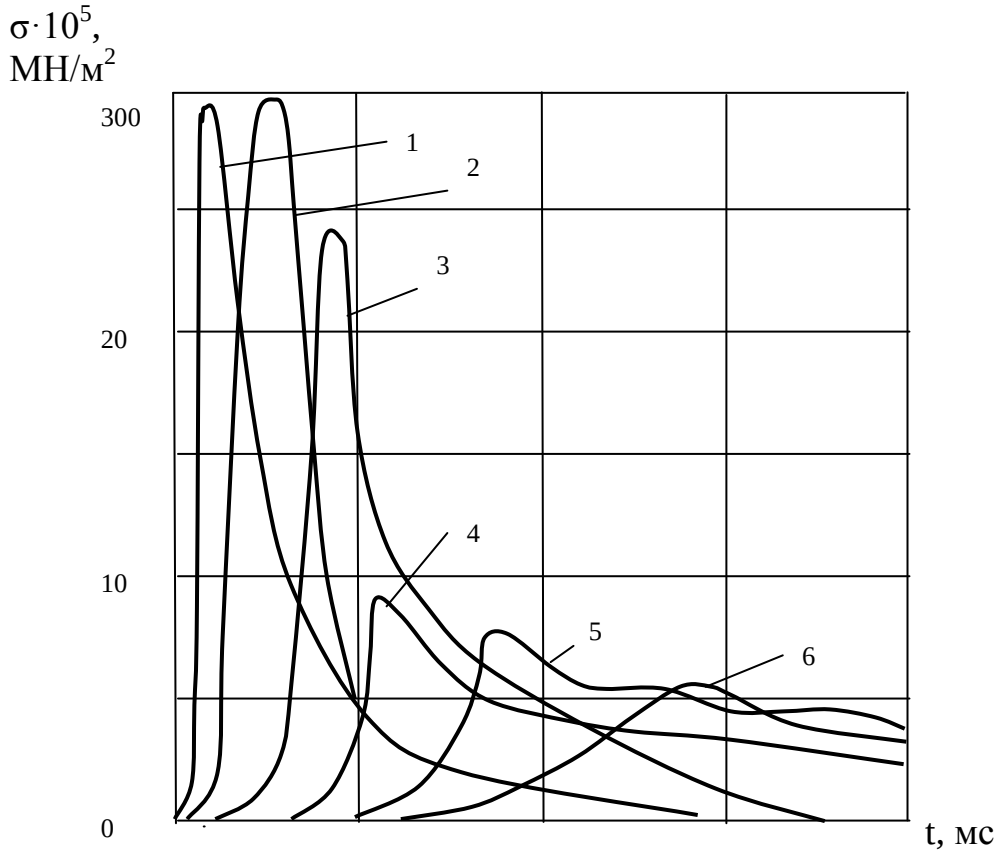


Рис. 7.11. Розвиток напружень в часі на відстані, см: 1–10, 2–20, 3–30, 4–40, 5–60, 6–80 [208]

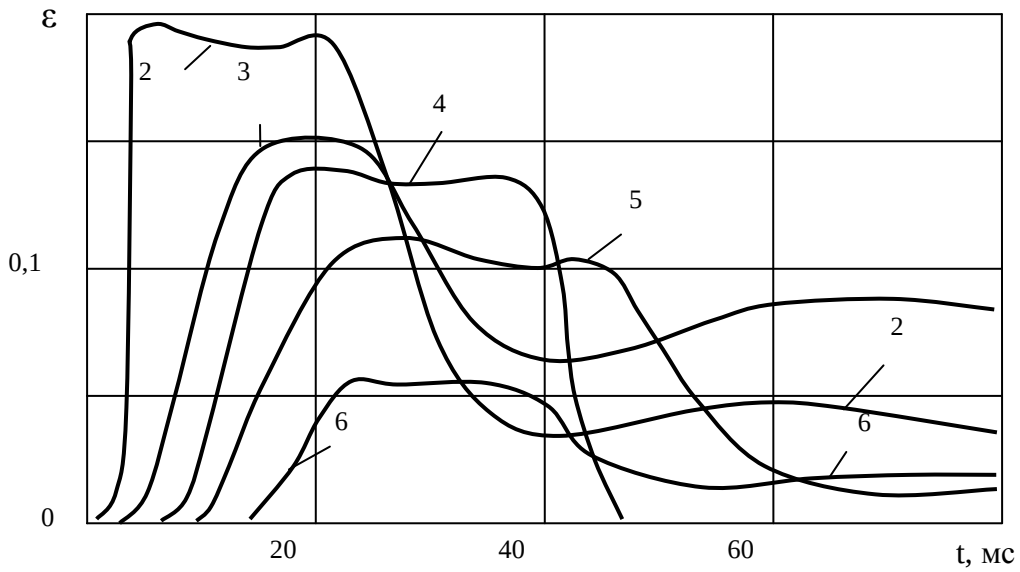


Рис. 7.12. Епюри хвиль деформації на відстанях, см: 2–20, 3–30, 4–40, 5–60, 6–80 [205, 213]

Ці зони розвиваються незалежно: перша – під дією потужної хвилі напружень і наступного схлопування газової порожнини, друга – під дією помірної хвилі напружень і наступного процесу структурної консолідації.

Протягом певного часу в масиві після проходження фронту хвилі напружень відбувається подальше поширення деформаційних процесів за участі реологічних явищ у віддалених від заряду шарах масиву. Одночасно максимально ущільнена область, прилегла до газової порожнини, зміщується в бік джерела вибуху внаслідок падіння тиску і температури в газовій порожнині (рис. 7.13). Така послідовність формування поля деформацій в режимі камуфлетного вибуху в ґрунтовому масиві певною мірою відповідає відомому пульсаційному механізму затухання газового пухиря в процесі підводного вибуху.

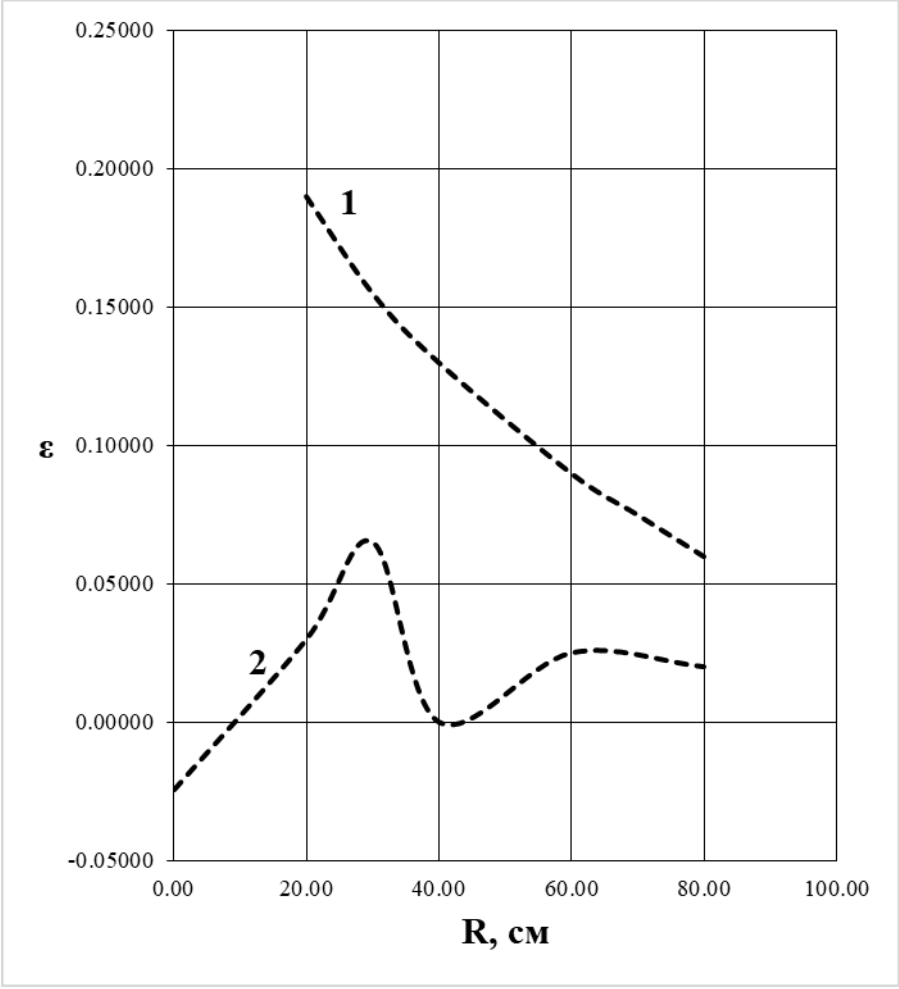


Рис. 7.13. Закономірності розподілу максимальних (1) і залишкових (2) деформацій ґрунту в зоні дії вибуху

Як і в деформованому вибухом стисливому ґрунті, в скельному середовищі після концентричного радіального розходження вибухової хвилі напружень з утворенням системи радіальних тріщин до її дії приєднується процес розширення розжарених продуктів вибуху (ПВ). У ході розширення газової порожнини і проникнення ПВ в радіальні тріщини різко знижується їх температура і спадає тиск, тобто наступає стадія розвантаження. Піддана інтенсивному стисненню частина масиву, прилегла до газової порожнини, розвантажується в зону пониженого тиску, тобто в напрямку порожнини. Створюються умови для формування відривних тангенціальних тріщин під дією радіальних розтягуючих напружень, додаткової дезінтеграції масиву з його обрушенням у вибухову порожнину.

Подібне пульсаційне явище відбувається і в структурно нестійких ґрунтах типу лесів. Припускаємо, що за аналогією зі скельними породами відбувається формування систем тангенціальних тріщин або зон пониженої щільності, зображених на графіках ε(R) (рис. 7.12, 7.13).

Таким чином, у віддалених шарах коливальні процеси відбуваються незалежно від пульсаційного розвитку порожнини. Порівнюючи часові інтервали розвитку силового і деформаційного поля, бачимо, що вже в межах 20 мілісекунд відбувається основний процес формування поля напружень і далі спостерігаються лише деформаційні процеси, пов’язані з консолідацією масиву. Звичайно, такі явища варто досліджувати не в лабораторних умовах. Лише дослідження поведінки газового пухиря при великомасштабних вибухах у морській воді дали можливість кількісно і якісно дослідити процес його трикратного циклу «розширення – схлопування» в процесі спливання, поступового охолодження вибухових газів і трикратного зменшення діаметра газової порожнини під дією інерційних сил.

На відміну від води трикомпонентна ґрунтова структура завдяки явищу зчеплення між мінеральними частками, покритими водними плівками, в процесі стиснення набуває під час початкового етапу навантаження додаткової міцності, яка стримує ґрунтову структуру від періодичного схлопування вибухової

порожнини. Як видно з рис. 7.14, радіальні коливання стінок вибухової порожнини зі зменшенням її діаметра відбуваються в ґрунті у дещо зміненому вигляді – після розширення діаметр порожнини ступінчасто двічі зменшується. Такий ступінчастий характер розвитку порожнини менш виразно повторює триразове затухаюче коливання газового пухиря при вибуху у воді, однак замість коливального процесу розширення – стиснення порожнини відбувається ступінчасте спадання її розміру, тобто фактично цей механізм можна вважати квазі-коливальним рухом у часі розвантаження масиву.

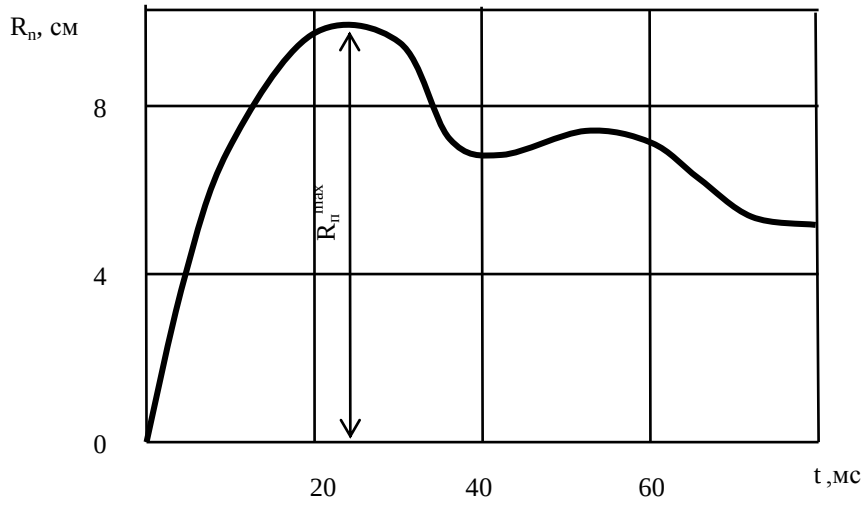


Рис. 7.14. Динаміка розвитку газової порожнини в ґрунті [213, 216]

Отже, природа коливального процесу розвитку газової порожнини, утвореної вибухом, не змінюється залежно від властивостей деформованого середовища. Лише характер розвитку деформованої зони після досягнення максимального напруження у вибуховій хвилі в більшому або меншому ступені повторює механізм коливальних рухів газового пухиря від вибуху в ідеальному середовищі – воді. І в ґрунті, і в скельній породі спостерігається зворотний рух прилеглого до газової порожнини масиву. Внаслідок цього першого розвантаження скельна порода, зруйнована системою радіальних і тангенціальних тріщин, обрушується у вибухову порожнину, на чому пульсаційний процес переривається.

В зв’язному ґрунті після максимального розширення газової порожнини і різкого падіння температури і тиску в ПД у часі розвантаження відбувається відділення максимально ущільненого шару ґрунту від масиву і його рух в напрямку порожнини. Під час цього руху ПД стискуються до стану, коли вони стають здатними повторно виконувати роботу, що виражається в зупинці на певний час зворотного руху стінок порожнини до її центру. Однак в подальшому у процесі цієї зупинки продовжує спадати температура і тиск газів у порожнині, що зумовлює подальше переміщення стінок газової порожнини до другої, кінцевої їх зупинки. Прилегла до порожнини частина ущільненої зони утримується від обрушення в порожнину завдяки новоствореній структурі ґрунту в цій зоні внаслідок зрослих сил зчеплення.

Поведінка деформованої зони після вибухового ущільнення ґрунту з слабкими структурними зв’язками типу піску або сухого лесу більш близька до такої в скельній породі, оскільки ґрунт в прилеглій до газової порожнини області, відділеній від основного масиву, практично втрачає слабкі структурні зв’язки під дією динамічного навантаження. Після падіння тиску ПД деформований масив схильний до обрушення з заповненням порожнини. Аналогічна картина розвитку деформаційного процесу притаманна обводненим ґрунтам, в яких динаміка розвитку деформаційних процесів відбувається практично в режимі трикратної пульсації у воді.

Враховуючи важливість пульсаційного механізму розвитку деформаційних процесів в технологіях, що становлять основи прикладної геодинаміки, варто приділити увагу можливостям керування цим специфічним явищем. Можливі два підходи до вирішення цього завдання через:

– оптимізацію параметрів динамічного режиму вибухового навантаження шляхом добору ВР промислового заряду з відповідними детонаційними параметрами зарядів у сторону їх зниження порівняно з традиційно застосовуваними. Відомо, що для підсилення фугасної (метальної) дії промислового заряду необхідно подовжити дію початкового імпульсу з пониженням його амплітуди. У такому випадку пульсаційні ефекти поширяться на

більш віддалені ділянки деформованого масиву, одночасно зменшуючи втрати корисної копалини через переподрібнення в прилеглих до заряду шарах масиву.

– втручання в процеси розвитку зони залишкових деформацій на стадії підготовки деформованого масиву шляхом його відповідної попередньої обробки.

Пульсаційні рухи ділянок ґрунтового масиву в межах деформованої вибухом області мають утилітарне значення. Вони можуть бути або основою геотехнології, або елементом її удосконалення. Наприклад, спосіб спорудження водоізолюючого екрану в ґрунтовому масиві з нестійкими структурними зв'язками полягає в утворенні вертикальної щілини і заповненні її водонепроникним матеріалом на основі глинистого розчину [208]. Вибуховий варіант оперативного виконання технології полягає в підриванні ряду свердловинних зарядів, розташованих у свердловинах з інтервалом, розрахованим на утворення суцільної вертикальної щілини. Верхні частини зарядів знаходяться під шаром розчину заповнювача, розташованим у поверхневій траншеї. Сутність технології полягає в конкуренції двох процесів під час формування вибухової порожнини – схлопування порожнини в процесі пульсацій них масових рухів і опускання в порожнину розчину заповнювача.

Під час розширення вибухових газів їх тиск протягом певного часу утримує схильні до обвалення стінки порожнини на рівні максимальної деформації, що підтверджується наявністю горизонтального «плато» на кожній залежності $\varepsilon(t)$ після стрибка ε до максимуму. Це означає, що в даному досліді кожен послідовний елемент середовища утримується фактично протягом 20 мілісекунд на максимумі деформації. Наступний етап – це падіння тиску в порожнині, початок розвантаження середовища, включення в цей процес реологічних явищ, тобто послідовної консолідації стиснених елементів середовища, що призводять до зворотних масових рухів у деформованій зоні і як результат – до зворотного руху ущільненого масиву, прилеглого до газової порожнини, тобто її стінок.

Експериментально показано [204, 206], що інерційні явища в прилеглому до газової порожнини шарі утримують його від зворотного руху протягом 20 мс, тоді як максимум хвилі напружень існував лише до 3-ї мілісекунди. В експериментах

доведено, що за цей час водостійкий розчин з верхньої ємності (траншеї) під дією різкого падіння тиску ПД у процесі складних пульсаційних явищ заповнює порожнину на розрахункову глибину. Отже, можна зробити висновок, що в порожнині поряд з радіальним пульсаційним деформуванням прилеглого до заряду ґрунтового масиву над верхнім торцем газової вниз по осі порожнини крім гравітаційної сили діє вертикальна пульсаційна складова. Ці дві вертикальні складові випереджають за часом рухи від горизонтальних пульсацій, оскільки реакція розчину заповнювача за часом випереджає горизонтальну реакцію трикомпонентного ґрунтового середовища, обтяженого присутністю сил зв'язності, які певний час утримують його від зворотного руху (схлопування).

У літературі відомі приклади промислового застосування іншого варіанту цієї технології [208, 217]. Це вибухова обробка ґрунтового масиву з метою його ущільнення, яка супроводжується пульсаційними явищами, що в певних ґрунтових умовах призводять до утворення областей розущільнення. Якщо в ґрунті вибухом створюється відповідна геотехнічна споруда типу «стіна в ґрунті» тривалої дії, подібні відривні явища (розущільнення масиву) особливо шкідливі в першій від заряду зоні розриву суцільності. Вони сприяють схлопуванню системи газових порожнин у процесі формування траншеї і, спушуючи масив, ослаблюють його, створюючи нові фільтраційні канали. Щоб запобігти цьому явищу, потрібно в технології передбачити попереднє насичення масиву кольматуючим розчином через систему паралельних свердловин, пройдених у прогнозованій області розущільнення. Під час вибуху розчин, заповнюючи утворену очікувану зону розущільнення, змішується з нестійкою структурою ґрунту і покращує в цілому міцнісні характеристики масиву [207–209].

Відомі способи підвищення ефективності вибухових робіт у скельних породах значною мірою ґрунтуються на прийомах управління розподілом енергії вибуху в початковий період, тобто з моменту хімічного розкладання заряду ВР до моменту передачі енергії масиву гірської породи. Управління детонаційним процесом у подовженому заряді досягається за рахунок конструктивних рішень, до яких насамперед зараховують діаметр заряду, принцип його розосередження,

параметри перебуру та набійки, параметри та місце розташування проміжного ініціатора тощо. В останні роки особлива увага приділяється впливу спеціальних елементів конструкції заряду на ефективність вибухового руйнування. До таких елементів варто зарахувати коригувальні донні вставки, осьові кумулятивні вставки, створення складної системи проміжних детонаторів, зміна форми вибою свердловини тощо [210–211].

Отже, специфіка розвитку механічного ефекту вибуху, пов’язана з впливом геометрії та розмірів свердловинного заряду. Торцеві ділянки вертикального заряду свердловин відіграють важливу роль у формуванні силового і деформаційного поля при масовому вибуху. Обидва кінці заряду кінцевих розмірів визначають механічний ефект вибуху переважно в осьовому напрямку – нижній в області перебурення, верхній – в області набійки. Відомо, що у торцях циліндричного заряду обмеженої довжини порушується осесиметричний характер розвитку поля. Безпосередньо на рівні торця заряду поле набуває форми, близької до півсфери [212].

Таким чином, послідовність і геометрія розвитку силового поля від вибуху подовженого заряду обмеженої довжини суттєво залежить від його конструктивних особливостей, від умов ініціювання, а в гірському масиві визначається особливостями розвитку динамічних явищ в межах його кінцевих ділянок. В умовах відкритої розробки родовищ різні ділянки вертикального свердловинного заряду на уступі працюють у принципово нерівних умовах. Нижня ділянка заряду знаходиться в максимально затисненому стані в непорушеному попередніми вибухами породному масиві. Вона одночасно відповідає за якість подрібнення масиву підвищеної природної міцності в режимі камуфлету та має запобігати утворенню так званих «порогів». Конструктивно ці два завдання вирішуються застосуванням перебуру, тобто збільшенням маси заряду шляхом його заглиблення нижче проєктованого рівня підошви уступу. У такий спосіб питома витрата ВР збільшується без зміни діаметра заряду.

Верхня кінцева ділянка заряду відділена від поверхні уступу набійкою і призначена для якісного руйнування породного шару, пошкодженого попереднім

масовим вибухом на верхньому уступі. До цього завдання додається вимога обережного підривання верхнього шару в режимі ослабленого викидання з метою запобігти надмірному розкиданню окремих породних кусків. Найменш обтяжена умовами середня ланка заряду – їй належить забезпечити лише отримання бажаного гранулометричного складу руйнованого об'єму порід.

Оскільки крайові ділянки свердловинного заряду знаходяться в нерівних геологічних і гірничотехнічних умовах і, крім основного їх завдання нижня та верхня торцеві ділянки виконують різні додаткові функції та мають різне призначення, підхід до розгляду механізму просторового формування механічного ефекту вибуху подовженого заряду має відрізнятися. Це завдання виконується в кілька послідовних стадій, з яких основною є стадія детонації заряду.

Протягом перших мілісекунд після ініціювання керування крайовими ефектами вибуху можливе шляхом конструктивних рішень, і в першу чергу – за рахунок вибору місця ініціювання. Сучасні системи ініціювання типу «Нонель» дозволяють застосовувати нижнє ініціювання свердловинного заряду. Детонуючий хвилевід не впливає на стан свердловинного заряду і забезпечує раціональний розвиток процесу від підошви уступу до набійки, яка замикає продукти вибуху.

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

Торцеві ділянки вертикального заряду свердловин відіграють важливу роль у формуванні силового і деформаційного поля при масовому вибуху. Обидва кінці заряду кінцевих розмірів визначають механічний ефект вибуху переважно в осьовому напрямку – нижній в області перебурення, верхній – в області набійки. Відомо, що у торцях циліндричного заряду обмеженої довжини порушується осесиметричний характер розвитку поля. Безпосередньо на рівні торця заряду поле набуває форми, близької до півсфери [154].

Теоретично доведено [154], що параметри на фронті хвилі в осьовому напрямку (тобто вздовж свердловинного заряду) після виходу за межі торця заряду стають на 35...40 % меншими порівняно з радіальним напрямком. Отже, чим коротший подовжений заряд (при постійному діаметрі), тим більше втрачається енергії вибуху через зміну симетрії поля з циліндричної на сферичну.

Розглядаючи подібні крайові ефекти в дії свердловинного або шпурового заряду обмеженої довжини, варто враховувати відмінність та особливості прояву та розвитку цих ефектів по довжині колонки заряду. Нижній торець свердловинного заряду відчуває найбільший опір скельного масиву руйнуванню і потребує особливої уваги в дослідженнях. Верхня торцева частина знаходиться у більш сприятливих умовах – у шарі масиву, що лежить на рівні набійки, який частково ослаблений попереднім масовим вибухом при розробці верхнього уступу. Верхня торцева частина свердловинного заряду повинна забезпечувати необхідний ступінь руйнування масиву на рівні набійки вибухом. Водночас заряд працює в режимі слабкого розпушування або посиленого камуфлету за показником дії вибуху в межах n = 0,3...0,7.

Виконано такий розрахунок для випадку, коли джерелом хвилі є лінійний заряд ВР у ґрунтовому масиві. З цією метою використовуємо експериментальні залежності переміщень максимумів напружень у циліндричній та сферичній хвилях від часу [213].

За схемою розрахунку, на відстані S (рис.7.15) від лівого торця заряду в певний момент t знаходиться центр напівсферичного фронту хвилі, проти якого розташовується переміщувана межа переходу циліндричної поверхні в сферичну. На рис. 7.12 зображено такий контур переходу, для заряду радіусом r = 1 см та довжиною l = 1,6 м.

Зазначимо, що при менших значеннях довжини заряду l будуть зберігатися ті ж залежності, що і на рис. 7.15, однак без середньої частини, оскільки величина S, яка дорівнює різниці відстаней, пройдених циліндричною та сферичною поверхнями максимумів напруги, не залежить явно від l. У разі застосування

теорії подібності область циліндричної поверхні максимуму хвилі напружень обмежена поверхнями, рівняння 7.2 яких записується як:

$$R = \left[\psi\left(1 - e^{\theta\frac{q}{r}}\right) + \omega q\right] r, \qquad (7.2)$$

де R – відстань від осі циліндричного заряду, Ψ,θ,ω – константи: Ψ = 43,1; θ = 0,047; ω = 2,04 м$^{-1}$.

З цієї залежності та умови l = 2q визначаємо мінімальний радіус єдиної сферичної хвилі, за формулою 7.3:

$$R_M = \left[\Psi\left(1 - e^{-\theta\frac{l}{2r}}\right) + \frac{\omega l}{2}\right] r, \qquad (7.3)$$

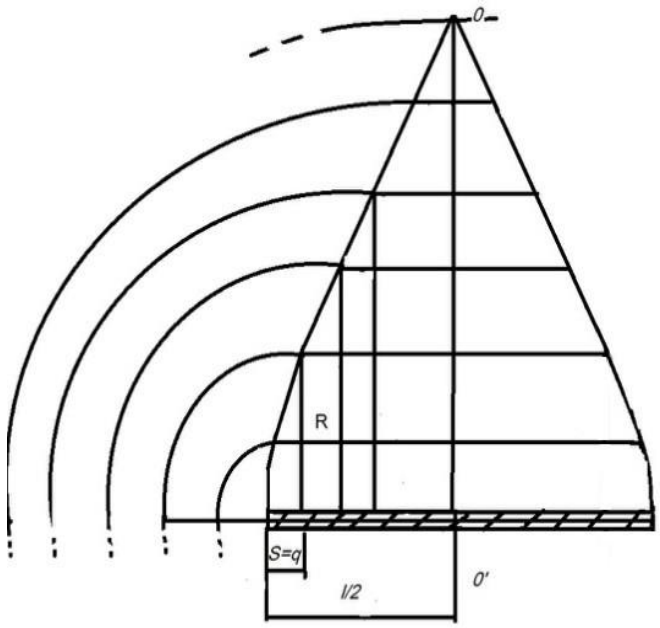


Рис. 7.15. Схема до пояснення крайового ефекту вибуху подовженого зряду обмеженої довжини

Розглянутий конкретний приклад розрахунку при $l_З$ = 1,6 м і $r_З$ = 1см дає значення радіусу R_{MAX}, у якому циліндрична частина фронту хвилі зникає і повністю перетворюється на сферичну (чи близьку до неї), що дорівнює 2,04 м, тобто приблизно 1,5 довжини заряду.

Проведені обчислення виходять із умови переходу циліндричного фронту ВН у сферичний, що певною мірою ідеалізує процес. Насправді цей перехід (якщо останній існує в ідеальному вигляді) повинен здійснюватися, по-перше, через

проміжну зону, і, по-друге, не одночасно по всій ділянці впливу вибуху. Ці міркування підтверджуються даними безпосередніх експериментів за записами хвилі напружень (ХВН) під час вибуху циліндричного заряду масою 1 кг/м і довжиною 1,5 м. Тензодатчики в експериментах встановлювалися вздовж паралельної заряду лінії, яка стоїть від осі заряду на 0,62 м навпроти:

- його центру (епюра 1);
- на 0,25 м перед торцем заряду (епюра 2);
- на рівні торця заряду (епюра 3);
- за межами торця заряду (епюра 4).

Відповідні епюри радіального напруження в координатах $\sigma_x(t)$ на фіксованих відстанях R у вибуховій хвилі для датчиків 1...4 наведено на рис. 7.16.

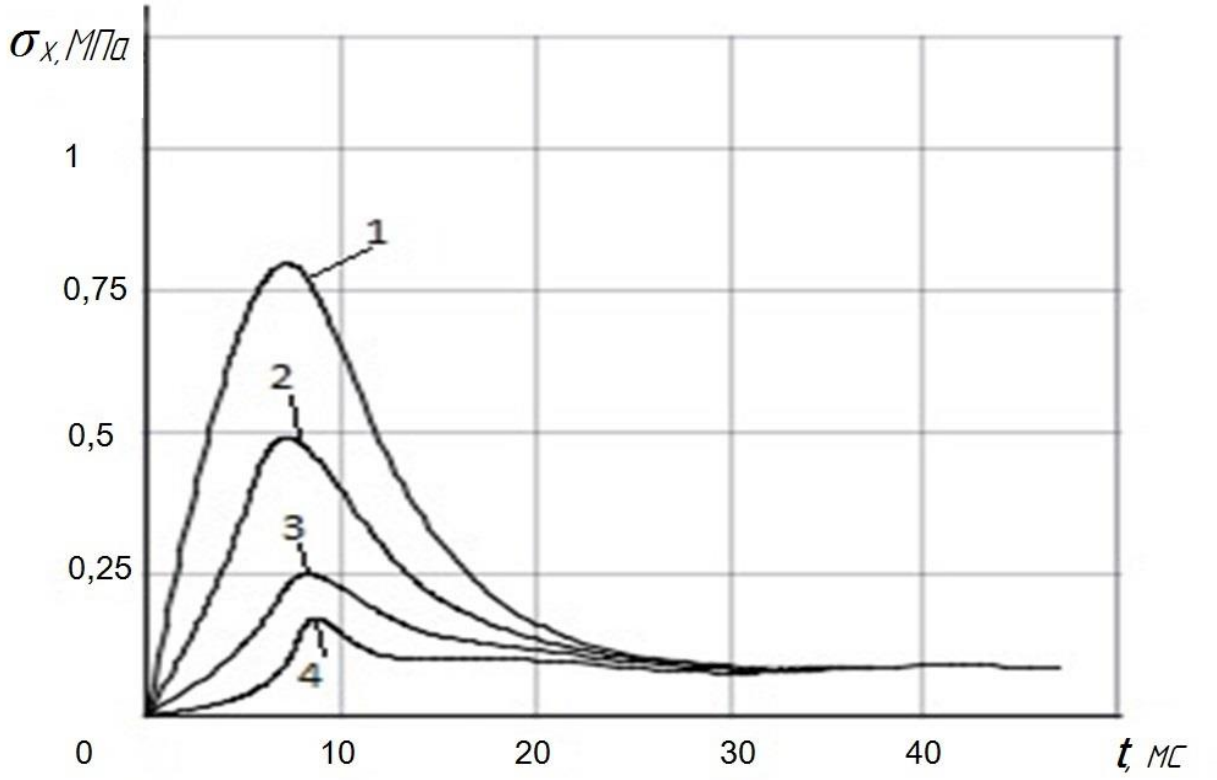


Рис. 7.16. Епюри хвилі напружень на відстані 0,62 м: 1 – на рівні середини заряду; 2 – 0,25 м перед торцем заряду; 3 – на рівні торця; 4 – 0,25 м за торцем циліндричного заряду

Подальша обробка експериментальних результатів полягала у переведенні даних вимірів у систему координат «напруження – довжина заряду» у фіксовані

моменти часу t. Така обробка дозволяє отримати у прив'язці до простору та часу послідовність розвитку деформаційного процесу (на відстані від заряду 0,62 м)

На рис. 7.17 наведено сімейство залежностей, отриманих у результаті обробки цих епюр в координатах $\sigma_x(t, l)$.

Користуючись цими даними, в координатах $\sigma_x \rightarrow l$, побудовано ізолінії напружень для фіксованих моментів часу після вибуху. З аналізу цих даних з рис. 7.14 видно:

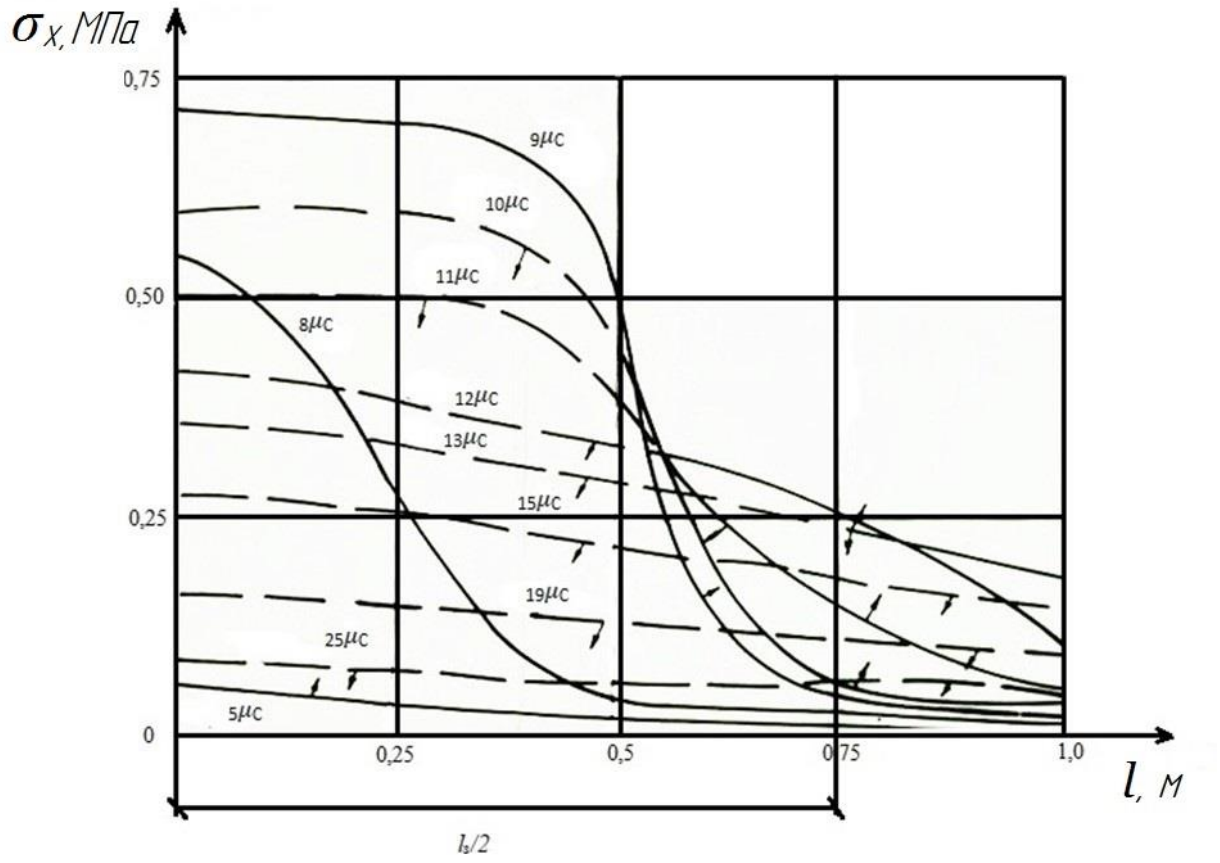


Рис. 7.17. Динаміка розвитку поля напружень під час вибуху циліндричного заряду у фіксовані моменти часу (мс)

- послідовність впливу ХВН на масив визначається напрямом детонації заряду та положенням датчиків щодо заряду;

- максимальне напруження досягається в момент часу 9 мс в центральній частині заряду в межах області, обмеженої циліндричною ділянкою фронту ВН, що тягнеться від середини заряду до позначки близько 0,3 м по довжині (у бік торця);

- умовна циліндричність поля напружень з відривом 0,62 м від осі заряду властива лише центральній половині заряду. На жаль, відсутність вимірювань на рівні першої половини заряду не дозволяє встановити вплив місця ініціювання на розвиток геометрії поля напружень, яка, імовірно, не буде симетричною щодо середини довжини заряду;

- з наближенням до торцевої частини подовженого заряду напруження різко знижуються, водночас їх наростання та спад у часі відбуваються набагато повільніше порівняно з центральною частиною поля напружень;

- точка перелому ізолінії максимального напруження зміщується в часі щодо торця заряду в області, обмеженій зарядом, проте в області 0,2...0,25 м перед торцем заряду (на відносному віддаленні від торця $R_0 = 44r_3$) розташована найбільш характерна область, де максимальні напруження з наближенням до торця заряду починають різко знижуватися (в 2 рази порівняно з максимумом);

- на відрізку 0–0,5 м від середини заряду область циліндричності в момент 10 мс переходить у стадію розвантаження, тоді як за межами 0,5 м в ділянці впливу торця заряду напруження продовжують наростати. Ця зміна вектора переміщення поля зберігається до 12...13 мс, коли все поле напружень переходить в стадію розвантаження.

Для встановлення ряду характерних закономірностей розвитку поля напружень у масиві для випадку заряду кінцевих розмірів складено відповідну програму [213] . Вона заснована на припущенні, що процес розглядається у віддалених шарах, де рівень максимальних напружень допускає вирішення завдання в пружній постановці з використанням принципу суперпозиції. Алгоритм розв’язання задачі будується на припущенні, що в масиві діє система N циліндричних зарядів довжиною L, погонною масою C_n з відстанню між зарядами α. Визначається напружений стан у зоні впливу вибуху системи елементарних зарядів (рис. 7.18).

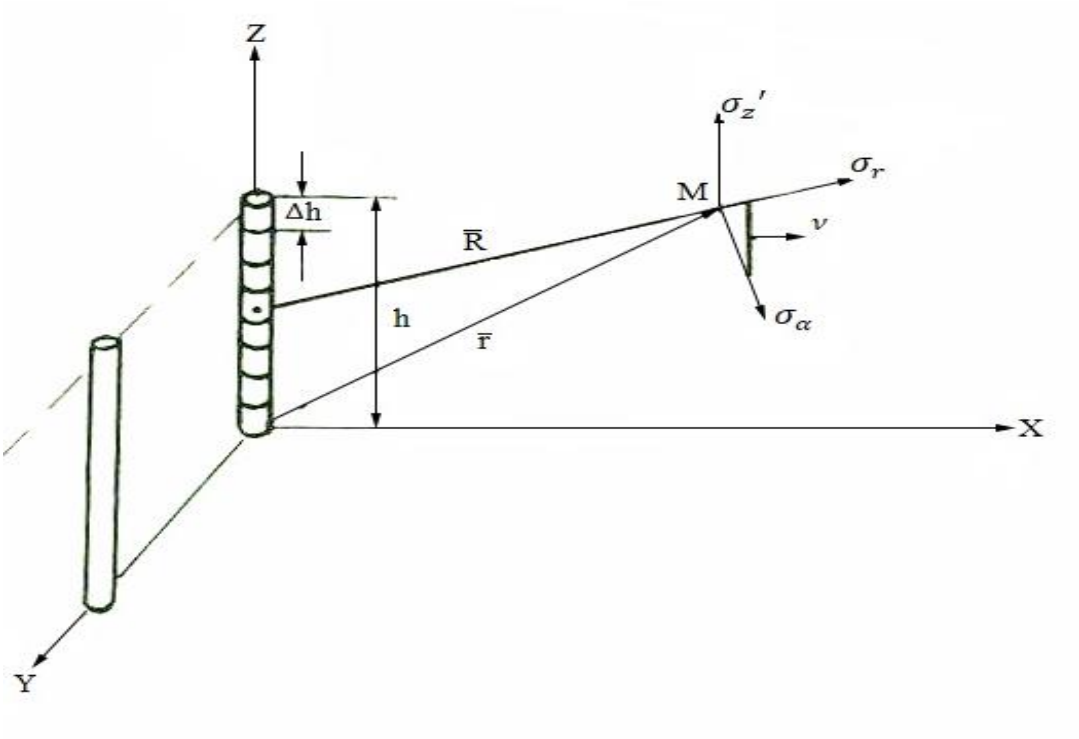


Рис. 7.18. Схема для розрахунку поля напружень

Положення кожної точки масиву визначимо її радіусом-вектором r з компонентами $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$ в деякій системі координат (рис. 7.18). Заряди розташуємо так, щоб їхня вісь співпадала з напрямком осі z.

Для визначення напруженого стану в точці середовища достатньо знайти шість компонентів напружень, які діють на майданчиках, перпендикулярних до координатних осей (x, y, z) і проходять через цю точку. Це три нормальні $\sigma_{xx},\sigma_{yy},\sigma_{zz}$ і три дотичні напруження $\tau_{xy},\tau_{xz},\tau_{yz}$; перший індекс співпадає з напрямком нормалі до розглянутої площі, другий – вісь, якою діє компонента напружень.

Ці величини становлять тензор напружень у точці, відповідно матриці 7.4.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \qquad (7.4)$$

При визначенні напружень вважаємо, що діє принцип суперпозиції, рівності 7.5:

$$\sigma_{xy}=\sigma_{yx},\ \sigma_{xz}=\sigma_{zx},\ \sigma_{yz}=\sigma_{zy} \qquad (7.5)$$

Визначимо у точці масиву напружений стан, що створюється одиничним циліндричним зарядом. Уявімо його для цього у вигляді ряду n елементарних зосереджених зарядів (n = h/Δh), які діють як сферичні.

Розглянуто результат дії одного елементарного заряду в точці М (рис. 7.18). Скористаємося тим, що в кожній точці середовища існують такі три взаємно-перпендикулярні майданчики, на яких дотичні напруження дорівнюють нулю, і напружений стан у точці повністю характеризується так званими головними напруженнями, які діють по нормалі до цих майданчиків.

Залежність 7.6 максимальних значень напружень від відстані для зосередженого заряду приймемо з експериментальних даних:

$$\sigma_{max} = K(\sqrt[3]{Q}(R)^{\mu} = B(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R})^{P} \qquad (7.6)$$

Q – маса заряду ВР, кг., R – відстань, м, $K = 4{,}5 * 10^5, \mu = 3{,}3$

Результати розрахунків наведено на рис. 7.19. Розглянуто схему ініціювання системи зосереджених зарядів, що імітують циліндричний заряд довжиною *l*з = 3,5 м.

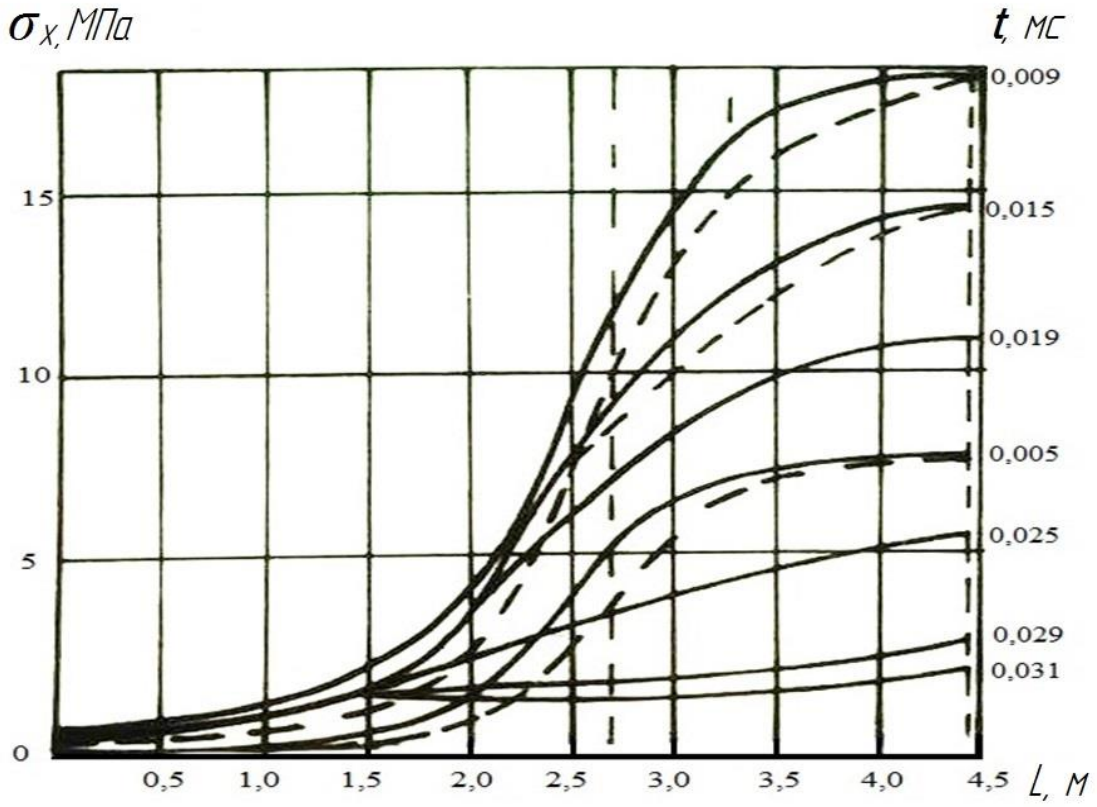


Рис. 7.19. Розвиток поля напружень при миттєвому вибуху системи з 8 (1) та 16 (2) зосереджених зарядів [213]

Ліва половина подовженого заряду на рис. 7.19 відділена двома вертикальними штриховими лініями (проти значення 2,3 м, або $L_З = 0$, і проти значення 4,5 м, або L). Маса кожного зосередженого заряду розраховувалася таким чином, щоб система цих зарядів імітувала подовжений заряд лінійною масою 2,0 кг/м. На графіках наведено розрахункові дані про поле напружень σx на відстані 1,08 м від імітованого циліндричного заряду (або системи зосереджених), яка у відносних одиницях відповідає $54r_З$.

За основною робочою схемою при збереженні лінійної маси кількість зарядів N = 8; для порівняння розраховано варіант N = 16, тобто ступінь розосередження зарядів збільшена ($C_З$ = 0,5 кг, d = 0,25 м) (довжина імітованого циліндричного заряду lз = 3,5 м).

Результати розрахунку за другим варіантом наведено на рис. 7.19 штриховими лініями. З порівняння ізоліній 1 і 2 видно, що збільшення числа зарядів у системі з одночасним зменшенням відстані між ними на віддаленні від осі системи R_o = 54 (коефіцієнти розосередження відповідно рівні K_p = 0,14 та 0,07), у результаті суперпозиції хвиль призводить до часткове ослаблення ефекту вибуху в торцевій області заряду. За рівнем напружень у центральній частині заряду варіанти 1 і 2 ідентичні.

Порівнюючи експериментальні дані на рис. 7.14 з теоретично отриманими на рис. 7.19 (наведено в координатах L по довжині заряду в метрах і час t в мілісекундах), зауважимо, що за тенденцією розподіл напружень в просторі й часі у вибуховій хвилі подібний. Основною рисою просторово-часового формування силового поля є його різке затухання при наближенні хвилі до торцевої ділянки заряду. Як видно з цих даних і схеми на рис. 7.12, певна торцева частина циліндричного заряду в межах області незворотних деформацій з віддаленням від заряду поступово втрачає частину енергії через перехід симетрії силового поля з осьової (розходження силового поля пропорційне $1/r^2$) до центральної (розходження пропорційне $1/r^3$). Згідно з теорією [154] на межі торця заряду з середовищем ці геометричні втрати досягають 35…40 % від питомої механічної

енергії заряду. Відповідно зменшується відстань, на яку поширюється руйнівна сила вибуху в осьовому напрямку.

Традиційні методики розрахунку параметрів свердловинних зарядів та їх систем в проєкті масового вибуху на кар'єрі орієнтуються переважно на умови роботи середньої ланки заряду, яка обслуговує основний масив висаджуваного породного блоку. Якщо оцінити перспективу отримання якісного подрібнення висаджуваного масиву, саме нижня і середня ланки свердловинного заряду мають забезпечити регульований, тобто плановий вихід негабаритної фракції. Щодо області масиву над верхньою торцевою ділянкою заряду, обмеженою вільною поверхнею, механічний ефект вибуху можна пов'язати з такими чинниками:

- поширенням в осьовому напрямку в бік денної поверхні хвилі напружень, генерованої верхньою частиною свердловинного заряду;

- роботою відбитої від вільної поверхні хвилі розвантаження;

- утворенням помірної воронки викидання переважно під дією розширюваних продуктів детонації.

Математичне моделювання наслідків розвитку хвилі напруження, породженою торцевою частиною свердловинного заряду [212], свідчить про те, що лише в 0,625 м товщини надторцевого шару, прилеглого до торця заряду, порода подрібнюється під дією інтенсивного силового поля. І лише близько половини (3,4 м з 6 м) надторцевого шару породного масиву руйнується системою радіальних тріщин під дією тангенціальних (розтягуючих) напружень. Отже, більш віддалені шари (за межами 3,4 м) піддаються руйнуванню в процесі масових рухів під час формування воронки спушення внаслідок розширення продуктів вибуху, тобто в часі квазістатичної фази розвитку деформаційного поля. Таким чином, за умови миттєвого ініціювання заряду одночасно по обох його торцях заряду відбувається виродження осьової симетрії силового поля на певній торцевій його ділянці. Фактично саме величина цієї ділянки виродження береться до уваги при виборі глибини перебуру в нижній частині свердловинного заряду, яка компенсує втрати енергії в торці через це виродження силового поля.

Довжина нижнього торця свердловинного заряду експериментально визначається із співвідношення 7.7 для величини перебуру :

$$l_{пер} = 10...15\ d_{зар}, \qquad (7.7)$$

де $d_{зар}$ – діаметр заряду.

Це означає, що при діаметрі заряду 250 мм величина перебуру може становити до 3,0 м. Можливо, що при довжині колонки свердловинного заряду $L_{зар}$ = 12 м майже його половина генерує зону виродження осьової симетрії силового і відповідно деформаційного поля в умовно сферичну. Таким чином, загальний механічний ефект від вибуху циліндричного заряду значною мірою формується ослабленими кінцевими (торцевими) ділянками.

Для компенсації енергетичних втрат на початковій стадії розвитку силового поля запобіжником виродження фронту хвилі напружень можливе збільшення торцевої частини свердловинного заряду в 1,5…1,7 рази [213]. В якості раціонального способу керування енергетичним потоком в нижньому торці заряду запропоновано підсилення енергетики вибуху через застосування спеціального проміжного ініціатора, розташованого в донній частині свердловини. Такий бойовик здатний поряд із спричиненням у заряді детонації створити умови для зародження і розвитку радіальної тріщини в площині підошви уступу з метою відмови від перебуру. Запропоновано заміну циліндричної форми бойовика на конічну, розраховану на концентрацію енергетичного потоку по нормалі до похилої бічної поверхні конуса в кутову зону дна свердловини.

Аналіз результатів комп’ютерного моделювання вибуху заряду в формі усіченого конуса [214, 215] показав, що вибух конічного бойовика генерує складне силове поле, здатне провокувати розвиток радіально-кільцевої відкольної тріщини на рівні підошви уступу, що дозволяє відмовитися від перебуру. Виконані модельні експерименти свідчать про можливість отримання зародку радіального деформаційного процесу вибухом такого донного бойовика.

Підсилення заряду на рівні верхнього його торця обмежене через небезпеку посиленого розкидання окремих кусків, тому керування крайовим ефектом на рівні набійки можливе лише на основі взаємодії зарядів у групі. Аналізом

літературних даних та власними інженерними розрахунками в межах популярних параметрів БВР встановлено, що деформація верхнього шару породи на рівні набійки відбувається послідовно протягом 4-х фаз: хвильової, камуфлетної, воронкоутворення та масових переміщень. Хвильова фаза практично охоплює весь обсяг верхнього породного шару. Однак через значні торцеві та дисипативні втрати енергії верхня половина цього шару піддається лише мікродеформаційним змінам, які створюють передруйнівний стан у породі. Камуфлетна фаза, що реалізується на контакті з торцем, позначена потужними пластичними руйнуваннями, але лише на контакті торця заряду з масивом породи. Фаза воронкоутворення охоплює лише частини масиву навколо набійки. Окремі воронки спушення над суміжними торцями повністю не перетинаються, залишаючи в проміжку між собою не зачеплену воронкоутворенням область (рис. 7.20).

Аналіз розрахункових даних свідчить, що обсяг неруйнованої області масиву на рівні набійки між воронками спушення при вибуху двох суміжних свердловинних зарядів практично не залежить від висоти уступу, але максимально скорочується в абсолютному вимірі при зменшенні діаметра заряду до 10 мм при мережі зарядів 3х3 м та використанні низькошвидкісної промислової ВР типу ANFO [216].

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

швидкостей фронт силового поля або його вектор руху буде формуватися під кутом 45º до горизонту (рис. 7.20, позиції фронтів 1, 1’).

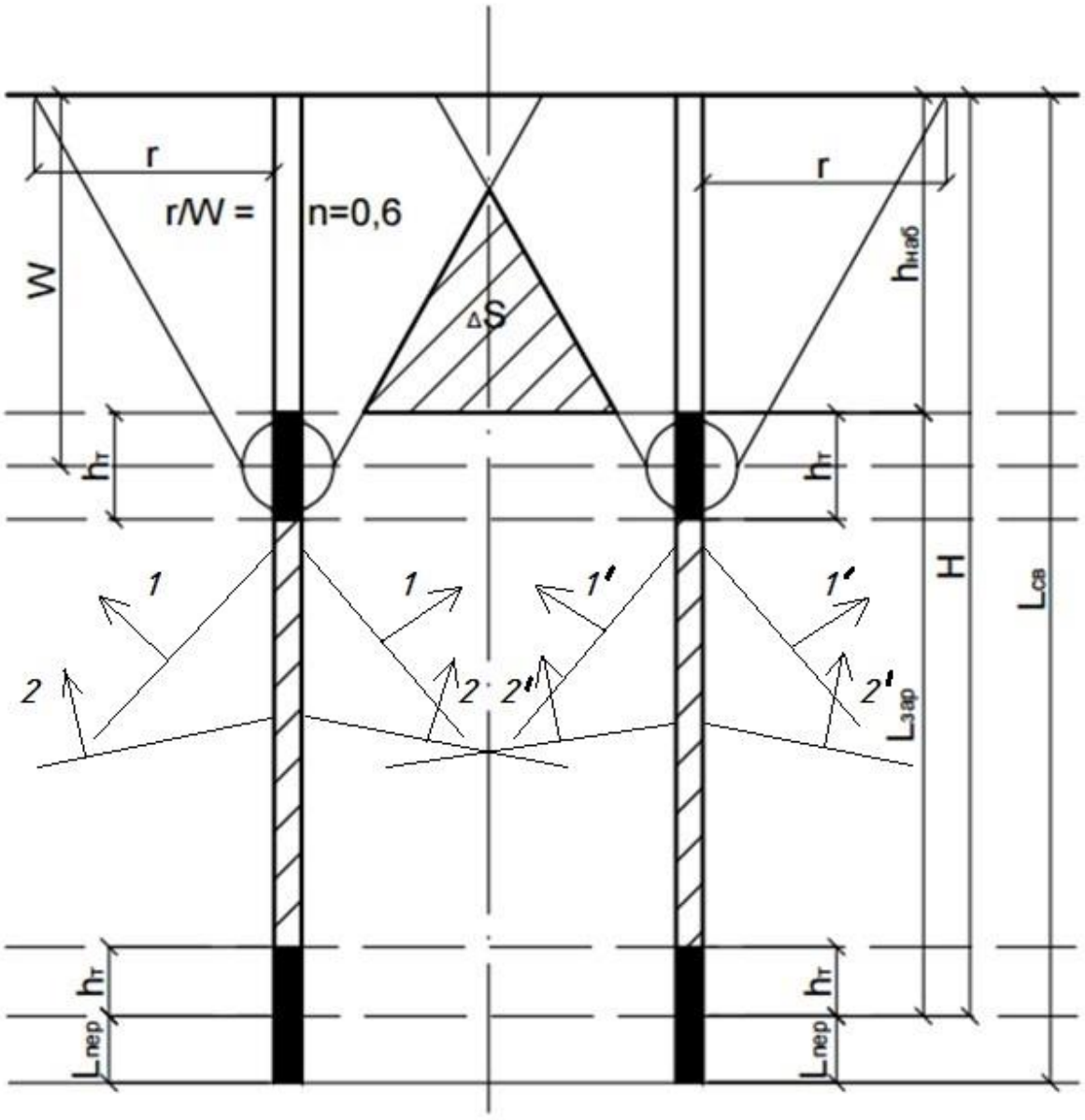


Рис. 7.20. Схема формування і взаємодії силових фронтів у торцевих частинах суміжних свердловинних зарядів при одночасному нижньому ініціюванні

Відповідно в цьому ж напрямку слідом за силовим фронтом розвивається деформаційний фронт. Отже, змінюючи згадане співвідношення, можна змінювати напрямок масового руху в деформованому середовищі. Оскільки йдеться про підсилення механічного ефекту у надторцевій верхній частині руйнованого масиву, раціонально розвернути фронт силового поля від нижнього торця у бік поверхневого шару. Цьому сприяє нижнє ініціювання, яке стало

можливим завдяки впровадженню у вибухову практику неелектричних ініціюючих систем.

Зрозуміло, що швидкість переміщення в масиві фронту хвилі напружень є сталою акустичною характеристикою даного масиву. Це означає, що змінити співвідношення між швидкостями фронтів детонаційної і звукової хвиль можливо лише шляхом зменшення швидкості детонаційної хвилі. Якщо швидкість фронту хвилі напружень становитиме 5000 м/с, а швидкість фронту детонаційної хвилі буде становити 2500 м/с, за одну мілісекунду детонаційний процес поширюється в заряді від місця ініціювання на 2,5 м (катет, протилеглий до шуканого кута між фронтом хвилі напружень і горизонтом), а силовий імпульс в радіальному напрямку досягне 5м (катет, прилеглий до шуканого кута і паралельний горизонту). Відповідно тангенс кута становитиме 0,4, що відповідає значенню кута 22°. Отже, напрямок вектора фронту хвилі напружень, а з ним і масовий рух середовища практично суттєво розвернеться в бік покрівлі руйнованого блоку (рис. 7.20, позиції силового поля 2,2’). Це повинно сприяти більш інтенсивному руйнуванню масиву в надторцевому шарі породного масиву в області ΔS між суміжними зарядами (рис. 7.20), не охопленій взаємодіючими воронками посиленого спушення.

Таким чином, за умови нижнього ініціювання свердловинного заряду і застосування низькошвидкісної ВР під час руху детонаційної хвилі в заряді у масив від підошви уступу випромінюється ударна хвиля, фронт якої розвертається в напрямку поверхневого шару на рівні набійки. Однак цього ефекту від переорієнтації силового поля можна досягти лише шляхом одночасного нижнього ініціювання суміжних свердловинних зарядів. Тоді два суміжних фронти полів напружень мають зустрітися в міжзарядному просторі в об’ємі, позначеному на рис 7.17 як ΔS, а сумарний вектор силового поля спрямовується по нормалі до вільної поверхні блоку. Фактично в цьому випадку пропонується схема вертикального клинового врубу, генерованого похилими зустрічними фронтами 2,2’, генерованими вибухом пари суміжних рядів свердловинних зарядів та переорієнтованими замість вільної бічної поверхні

уступу в напрямку його покрівлі. Саме через зниження енергетики свердловинного заряду в його верхній торцевій частині внаслідок втрати торцем заряду осьової симетрії породний шар на рівні набійки є одним з суттєвих джерел виходу негабаритної фракції. Завдяки розвороту вектора суміжних фронтів в бік верхнього породного шару досягається підсилення деформаційних явищ в області, позначеній як ΔS на рис. 7.20.

Пропозиції щодо підсилення енергетики масового вибуху в цій області можуть бути реалізовані в пропонованій схемі комутації вибухової мережі (рис. 7.21) шляхом формування спільного силового фронту одночасним нижнім ініціюванням двох суміжних рядів свердловинних зарядів низькошвидкісних ПВР (типу ANFO).

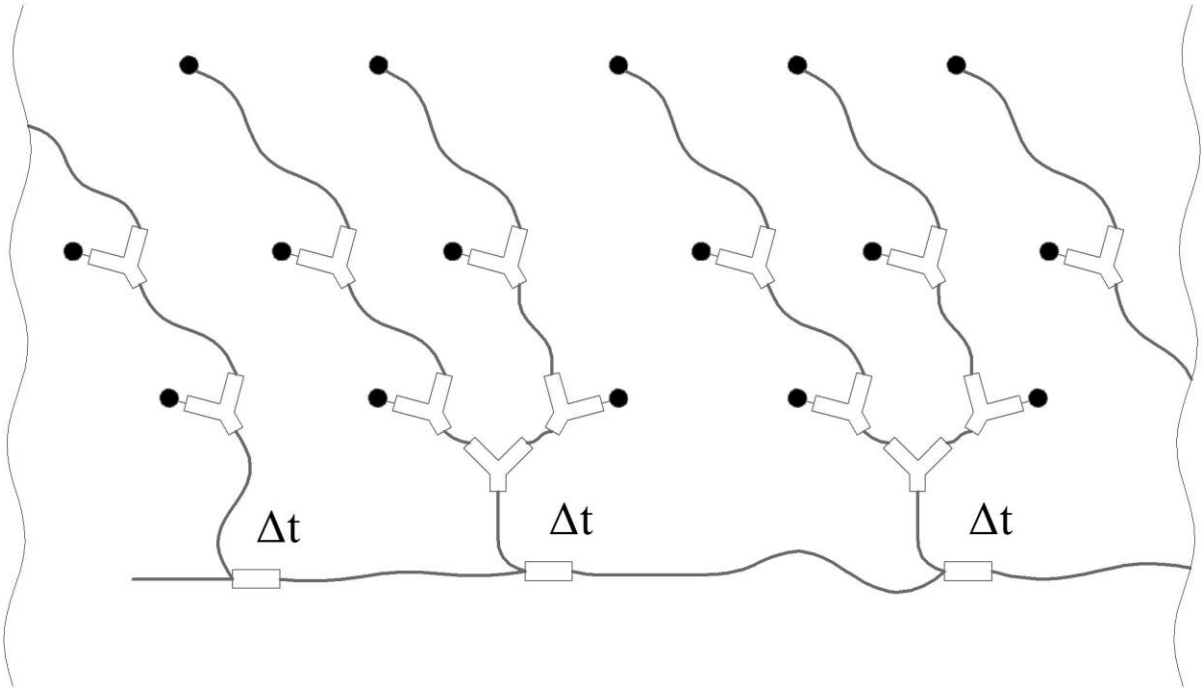


Рис. 7.21. Фрагмент діагонально-пучкової схеми «вертикальний клин»: точки – свердловини; трійники – безкапсульні розгалужувачі; Δt – час уповільнення для подвійних рядів свердловинних зарядів

В наведеній схемі комутації вибухової мережі типу «вертикальний клин» одночасно використовуються декілька дисертаційних розробок, пов’язаних з застосуванням вітчизняної низькошвидкісної ініціюючої системи «Хвиля», комплекту безкапсульних розгалужувачів ініціюючого імпульсу та способу

переорієнтації спільного силового фронту в бік поверхневого шару висаджуваного блоку на рівні набійки шляхом використання в промислових свердловинних зарядах низькошвидкісних вибухових речовин.

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

При застосуванні попарного одночасного підривання суміжних рядів свердловинних зарядів можливе небажане зростання сейсмічного ефекту масового вибуху, однак дослідження свідчать, що це зростання повністю компенсується застосуванням мереж комутації на основі НСІ.

7.5 Управління сейсмічним ефектом масових вибухів із використанням низькошвидкісних засобів ініціювання

В останні роки в Україні під час виконання вибухових робіт широко використовуються неелектричні системи ініціювання зарядів вибухової речовини (ВР) типу «Нонель» [196–199]. Останні завдяки широким технічним можливостям та безпеці повною мірою дозволяють реалізувати ефект взаємодії зарядів ВР, і, отже, значно покращити якість подрібнення гірської маси та обробки підошви уступу. Однак існуючі в Єдиних правилах безпеки норми розрахунку сейсмобезпечних відстаней (окремо вибуховими вважаються групи, розділені інтервалами уповільнення не менше 20 мс) обмежують застосування інтервалів уповільнення в 17 мс, які є ефективними з позицій дроблення та безпеки підбою свердловин на блоках із застосуванням свердловин діаметром 200 мм [200]. До того ж, під час застосування неелектричних систем ініціювання зарядів вибухової речовини час розвитку всього вибуху залежить не лише від інтервалів уповільнення пристроїв різних систем неелектричного ініціювання зарядів, а й від фактичних додаткових інтервалів уповільнень за рахунок поверхневих мереж (хвилеводів), що в існуючих сейсмічних оцінках не враховується.

У даний час перед підривниками поставлено завдання – досягти якісного подрібнення гірської маси і опрацювання підошви уступу при допустимому сейсмічному ефекті, що з укрупненням масштабів масового вибуху і наближенням робіт до охоронюваних об’єктів набуває все більшого значення для забезпечення як сейсмостійкості будівель, так і нормального психологічного стану населення.

При промислових масових вибухах з обмеженою масою заряду на кар’єрах України з використанням НСІ виявлено, що сейсмічний вплив їх нижчий, ніж при масових вибухах, виконаних за тими ж схемами та наведеною масою ВР, але з використанням магістральних ДШ та сповільнювачів КСДШ. Водночас, з одного боку, з’являється можливість збільшення масштабів масового вибуху, з іншого боку – можливість вдосконалення методики сейсмічної оцінки при виробництві вибухових робіт із застосуванням неелектричних систем ініціювання зарядів ВР [201, 202].

Розрахуємо час розповсюдження всього явища масового вибуху. Уповільнення між окремими групами зарядів, що підриваються, становлять послідовність чисел, оскільки відстань між бойовими свердловинами залишається незмінною. Відповідно до визначення числової послідовності кожному натуральному числу n поставлено у відповідність деяке дійсне число a_n. Тоді сукупність a_n = f (n), n = 1,2, ...називається числовою послідовністю (або просто послідовністю). Тут a_n – елемент (або член послідовності); f(n) – закон відповідності; n – номер елемента. Послідовність чисел a_1, a_1+d,a_1+2d,…....,$a_1+d(n-1)$, кожне з яких дорівнює попередньому плюс деяке постійне число d, є арифметичною прогресією, де a_1 – перший член прогресії, d – різниця арифметичної прогресії. Тоді відповідно формулі 7.8 n-й член арифметичної прогресії дорівнює:

$$a_n = a_1 + d(n-1), \qquad (7.8)$$

де n – число членів прогресії.

Оскільки відстані між свердловинами рівні (вони залежать від схеми ініціювання, де заряди з'єднуються по діагоналі або іншим способом), то величина уповільнення L/D між суміжними свердловинами залишається також однаковою для всіх груп, де L – довжина хвилеводу, який з'єднує дві суміжні бойові свердловини, D = 2000-2100 м/с – швидкість детонаційної хвилі у хвилеводі. У цьому випадку послідовність уповільнень відповідає властивостям:

- будь-який член послідовності, починаючи з другого, дорівнює середньому арифметичному його сусідніх членів, тобто за формулою 7.9:

$$a_к = \frac{a_{к-1} + a_{к+1}}{2} (к \geq 2) \qquad (7.9)$$

- суми членів послідовності, рівновіддалених від її кінців, рівні між собою.

Враховуючи наведене вище, можна визначити послідовність уповільнення як арифметичну прогресію 7.10, для якої величина n-го уповільнення дорівнюватиме:

$$t_n = t_1+(\Delta t + L/D\cdot 1000)\cdot(n-1), \qquad (7.10)$$

де n – кількість ступенів уповільнення, Δt – уповільнення між останньою парою суміжних свердловин.

Формула 7.10 дійсна для схем з однаковим ступенем уповільнення на всьому блоці. Якщо ступені уповільнення відрізняються, формули набудуть вигляду 7.11:

$$t_n = t_1+(\Delta t + L/D\cdot 1000)\cdot(n-1)+\delta, \qquad (7.11)$$

де δ – сума уповільнень до визначуваного елемента, на величину яких відрізняються ступені уповільнення у схемі.

Наведемо приклад розрахунку, що ґрунтується на схемі ініціювання, застосованої на Кубачівському кар'єрі вапняків філії «Кам'янець-Подільського ДЕД».

Для комбінованої схеми з капсулями уповільнювачами ЕДСД та свердловинами, що ініціюються ДШ загальна довжина сполучного ініціюючого ДШ становить 105 м, ініціюються однакові відрізки ДШ по 8 м, тому варто враховувати лише загальне уповільнення, яке створює ДШ. Оскільки швидкість

детонації ДШ D = 6000 м/с, то t = L/D = 105/6000 = 17,5 мс. Відстань між свердловинами Li = 3м, час уповільнення між свердловинами, за рахунок ДШ:

$t_i = L_i/D = 3/6000 = 0{,}5$ мс.

Час дії вибуху становить:

$T = 7 \cdot 15 + t = 105 + 17{,}5 = 122{,}5$ мс,

де 7 – кількість груп уповільнення, використаних під час масового вибуху потужністю 2100 кг ВР на західному борту Кубачівського кар'єру з часом уповільнення 15 мс. Показник сейсмічності вибуху, який визначається масою заряду ВР, що припадає на 1мс уповільнення:

$K_{сейсм} = Q / T = 2100/122{,}5 = 17{,}14$ кг/мс,

Розрахуємо показник сейсмічності вибуху за такої ж схеми комутації, але з використанням ДШ у всіх ланцюгах, з використанням наведеної вище методики розрахунку. Довжина всього сполучного ініціюючого ДШ становить 132 м. Застосуємо стандартне уповільнення між групами 20 мс.

$t_n = t_1 + (\Delta t + L/D) \cdot (n-1) = 20 + (20 + 132/6000)(7-1) = 272$ мс,

Сейсмічна дія вибуху:

$K_{сейсм} = Q / T = 2100/272 = 7{,}72$ кг/мс

Далі у схемі використаємо систему ініціювання типу «Нонель». Виконаєм аналогічні розрахунки за ступенем уповільнення відповідно до виробничого асортименту в 17 мс. Довжина хвилеводу також становитиме 132 м.

$t_n = t_1 + (\Delta t + L/D) \cdot (n-1) = 17 + (17 + 132/2000) \cdot (7 - 1) = 515$ мс,

Показник сейсмічності вибуху:

$K_{сейсм} = Q / T = 2100/515 = 4{,}077$ кг / мс.

Таким чином, показник сейсмічності вибуху із застосуванням детонуючого хвилеводу знижується в 1,9 рази порівняно з традиційними засобами короткосповільненого підривання.

Як показали розрахунки, неелектрична система ініціювання типу «Нонель» є найбезпечнішою для ініціювання свердловинних зарядів масового вибуху, навіть крім інших її переваг, зокрема й такого технологічно важливого, як використання можливостей нижнього ініціювання свердловинного заряду.

Насправді використання комбінованої схеми з електричними засобами уповільнення між групами зарядів в 15 мс при ініціюванні ДШ є порушенням вимог ЄПБ. Окремими групами вважаються уповільнення, що становлять мінімум 20 мс. Це призводить до зростання небезпеки сейсмічної дії масового вибуху, на що вказували наведені вище розрахунки, а також сейсмограма, що свідчить про відсутність розділення сейсмічних хвиль між окремими групами зарядів.

Розрахунки також показали, що схема ініціювання типу «Нонель», з уповільненням в 17 мс не поступається за параметрами сейсмобезпеки схемі ініціювання із застосуванням КЗДШ з уповільненням в 20 мс через повільніше проходження ударної хвилі хвилеводом.

За формулою М.А. Садовського безпечний радіус для 3-х розглянутих вище схем набуде вигляду 7.12:

$$R_c = k_r \times k_c \times a \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{N^{\frac{1}{4}}} \qquad (7.12)$$

де: k_r – коефіцієнт, що залежить від властивостей ґрунту в основі захищеної споруди;

k_c – коефіцієнт, що залежить від стану захищеної споруди;

a – коефіцієнт, що залежить від показника дії вибуху;

N – кількість груп зарядів, шт.;

Q – загальна маса зарядів, кг;

Приймемо $k_r = 12$, $k_c = 2$, $a = 1$.

Для комбінованої схеми (уповільнення – ЕДСД, свердловини ініціюються ДШ) кількість груп у розрахунках становитиме 4 замість 7, оскільки згідно з ЄПБ розділеними є групи, між якими уповільнення становлять 20 мс. Тому за групу беремо заряди з уповільненням 30 мс (дві групи по 15 мс). Водночас безпечний радіус становитиме:

$$R_c = 2 \cdot 12 \cdot 1 \cdot \sqrt[3]{Q} \,/\, \sqrt[4]{N} = 217{,}3 \text{ м.}$$

Відповідно до Єдиних Правил безпеки під час проведення вибухових робіт отриману відстань необхідно збільшити вдвічі, тоді.

$R_c = 217,3 \cdot 2 = 434,6$ м.

Для схеми ініціювання типу «Нонель» із уповільненням у 17 мс радіус безпеки за параметрами сейсміки:

$R_c = 188,9484 \cdot 2 = 377,9$ м.

Таким чином, за даними розрахунків, безпечнішою схемою ініціювання є система типу «Нонель».

Отже, сейсмічний ефект вибуху визначається за наступною методикою розрахунку сейсмічно безпечних параметрів промислових вибухів, або показника сейсмічності:

1. Максимальна маса заряду ВР у групі, що припадає на одне уповільнення, за умови поділу всіх груп (більше 20 с):

$Q_{мак} = \Sigma Q_{св}$, кг.

2. Максимальна маса заряду ВР, що підривається за 1 мілісекунду:

$К_С = Q/T$, кг/мс,

де Q – загальна маса підірваної ВР, Т – час дії всього вибуху, мс.

Допустимий показник сейсмічності:

$К_{доп} = Q_{мак} / T_{гр}$, кг / мс,

де $Q_{мак}$ – допустима маса ВР у максимальній групі, $T_{гр}$ – час одного сповільнення у максимальній групі.

Умови сейсмобезпеки вибуху:

$К_С \leq К_{доп}$

Дану методику та результати аналізу взято в основу розробки алгоритму.

7.6 Порівняльна оцінка витрат на застосовуваня низькошвидкісної системи висадження

Витрати на видобуток корисних копалин вносять велику частку у вартість продукції, що виготовляється з них. Тому зниження витрат на видобуток корисних копалин є одним із основних завдань, вирішення якої робить продукцію найбільш конкурентоспроможною на світовому ринку товарів.

Зменшити витрати можна різними шляхами і, зокрема, шляхом ефективнішого використання енергії вибуху при вибуховому відбиванні гірської породи. Цього можна досягти, застосовуючи в якості засобу відбивання розосереджені заряди. Така конструкція зарядів при підриванні гірської породи збільшує вихід дрібних фракцій приблизно на 20 %, а також зменшує вихід негабариту на 41 % [107, 108], що зменшує витрату вибухових матеріалів на дроблення негабариту, а також зменшує витрату електроенергії, що витрачається на вторинне подрібнення гірської породи з використанням електродетонаторів. Здійснити ініціювання зарядів розосередженої конструкції, використовуючи сучасні системи ініціювання типу «Хвиля» чи ДШ у вигляді, у якому вони існують, повною мірою неможливо. Для вдосконалення способу ініціювання розосереджених зарядів варто застосувати в системі типу «Хвиля» розроблені інертні розгалужувачі.

Щоб більш точно оцінити у цьому випадку зменшення витрат, необхідно розглянути одну з популярних схем підривання з використанням цих систем [103]. З цією метою розглянемо діагональну схему підривання з такими параметрами:

Висота уступу ($H_{уст}$) – 12 м.

Глибина перебуру ($L_{пер}$) – 12 $d_{зар}$.

Діаметр заряду ($d_{зар}$) – 214 мм.

Питома витрата ВР при використанні ДШ (q) – 0,7 кг/м^3 гірської породи.

Вибухова речовина – грамоніт 79/21.

Кут нахилу берми – 80°.

Щільність заряджання (Δ) – 1000 кг/м^3 зарядної порожнини.

Порода, що руйнується – граніт.

Вихід негабариту – 3 %.

Вихід дрібної фракції (до 140 мм) – 25 %.

На початку визначимо глибину свердловини:

$$L_{св} = H_{уст} + L_{пер} = 12 + 12 \cdot 0{,}214 = 14{,}5 м$$

Маса одного метра заряду залежить насамперед від діаметра свердловини:

$$p_{дш} = \frac{\pi \cdot d_{зар}^2}{4} \cdot \Delta = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}214^2}{4} \cdot 1000 = 35{,}9 кг$$

Прийнявши коефіцієнт зближення зарядів m рівним 1, визначимо лінію опору по підошві:

$$W_{дш} = \frac{\sqrt{0{,}56 \cdot p^2 + 4 \cdot q_{дш} \cdot m \cdot p \cdot H_{уст} \cdot L_{скв}} - 0{,}75 \cdot p}{2 \cdot q_{дш} \cdot m \cdot H_{уст}};$$

$$W_{дш} = \frac{\sqrt{0{,}56 \cdot 35{,}9^2 + 4 \cdot 0{,}7 \cdot 35{,}9 \cdot 12 \cdot 14{,}5} - 0{,}75 \cdot 35{,}9}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 12} = 6{,}4 м.$$

Далі визначимо мінімальну лінію опору по підошві:

$$W_{дш} = 3 + H_{уст} \cdot ctg(\alpha) = 3 + 12 \cdot ctg(80) = 5{,}11 м$$

Мінімальна лінія опору по підошві менша за розрахункову, отже, немає необхідності змінювати діаметр свердловини і можна прийняти мережу свердловин 6,4×6,4 м.

Далі визначимо масу заряду в одній свердловині

$$Q_{зар} = H_{уст} \cdot W_{дш}^2 \cdot q_{дш} = 12 \cdot 6{,}4^2 \cdot 0{,}7 = 344 кг$$

Довжина заряду становитиме:

$$L_{зар} = \frac{Q_{зар}}{p_{зар}} = \frac{344}{35{,}9} = 9{,}6 м$$

Розглянемо руйнований масив, що складається з 40 свердловин, пробурених у чотири ряди по квадратній мережі зарядів, і розрахуємо витрати на вибухові матеріали – проміжні детонатори, ДШ, ВР та піротехнічні реле.

У цьому разі довжина внутрішньосвердловинних відрізків ДШ становитиме 14·40 = 560 м; по діагоналях на поверхні масиву детонуючого шнура необхідно 9·3·10 = 270 м.

Кількість ДШ для з'єднання з РП дорівнює 6,4·9 = 57,6 м.

Загальна витрата ДШ, враховуючи стартовий 100-метровий відрізок, становить:

560 +270 +57,6 +100 = 987 м.

Також для підривання однієї свердловини потрібно дві шашки Т-400Г, тобто на 40 свердловин потрібно 80 шт.

Для створення уповільнення між діагональними рядами свердловин необхідно 9 РП.

За вартості одного метра ДШ – 7 грн, вартості РП – 42 грн та вартості шашки Т-400Г – 110 грн витрати на вартість засобів ініціювання становитиме:

987×7+110×80+42×9 = 16 087 грн.

За вартістю 1 кг грамоніту 79/21, що дорівнює 33 грн, загальна вартість вибухових матеріалів становитиме:

16087 +33 344 40 = 470167 грн.

Витрата ВМ на відбивання 1 $м^3$ гірської породи становитиме:

470167/(6,42×12×40) = 23,914 грн.

Далі розглянемо схему підривання масиву із застосуванням системи «Хвиля.»

Практично доведено, що під час підривання системою «Хвиля» витрати ВР можна знизити на 10 %. Отже, можна збільшити об'єм породи, що руйнується однією свердловиною, на 10 % шляхом збільшення розмірів сітки свердловин, яка становитиме в даному випадку 6,7·6,7 м.

На 40 свердловин витрата поверхневих блоків становитиме 20 штук з 10-метровими відрізками хвилеводу та один стартовий поверхневий блок зі 100-метровим відрізком хвилеводу. Також необхідно використовувати 40 свердловинних капсулів-детонаторів із 18-метровими відрізками. Кількість шашок Т-400Г та маса ВР залишаються такими ж, як і у разі використання ДШ.

За вартості одного метра хвилеводу 4,8 грн, поверхневих з'єднувальних блоків – 30грн. та свердловинних детонаторів – 26 грн., витрати на ВМ становитимуть: (20×10+40×18+100)×4,8+40×26+21×30+40×80+33×40×344 = 463 846 грн.

Витрати ВМ на відбивання одного кубічного метра породи становитимуть:

463846/(6,7×6,7×12×40) = 21,527 грн.

Вихід негабариту при використанні ДШ і при використанні систем типу «Хвиля» залишається практично одним і тим же і з 1000000 м^3 при тривідсотковому виході негабариту становитиме 30000 м^3.

Витрата ВР на дроблення 1 м^3 негабариту становить 0,4 кг, кількість шпурів, необхідних на дроблення 1 м^3, дорівнює 1,05 штук, на кожен шпур необхідно витратити 2 м ДШ. Таким чином, витрата ВМ на дроблення 30000 м^3 негабариту становитиме:

30000×0,4×33+30000×1,05×2×1 = 459 000 грн.

Отже, загальні витрати ВМ на відбивання 1 м3 гірської породи, включаючи витрати на дроблення негабариту, становитимуть:

23,914+459000/1000000 = 24,373 грн при використанні ДШ;

21,527+459000/1000000 = 21,986 грн за використання систем типу «Хвиля».

Розглянемо таку ж схему підривання з використанням пасивних розгалужувачів для створення можливості застосування розосереджених зарядів.

Найбільша ефективність вибухового відбивання гірської породи досягається при використанні розосередженого заряду з двома інертними проміжками в 1 метр кожен. Водночас маса заряду скорочується як мінімум на 8 %, а мережа свердловин залишається такою ж, як у разі застосування систем типу «Хвиля».

Заряд у свердловині матиме масу 344×0,92 = 316,48 кг.

За такої конструкції зарядів кількість хвилеводу на кожну свердловину збільшується на 10 м, а також збільшується витрата свердловинних детонаторів у 3 рази і в стільки ж разів збільшується витрата шашок типу Т-400Г. З іншого боку, із застосуванням розгалужувачів у комутаційній мережі зменшується кількість з'єднувальних блоків у два рази, витрата хвилеводу на комутацію поверхневої

мережі становитиме, враховуючи100-метровий відрізок хвилеводу від стартового з'єднувального блоку:

9×3×10+10×9+100 = 370 м-коду.

Загальна довжина хвилеводу становитиме:

370 +28 40 = 1490 м.

Кількість розгалужувачів для комутації всієї схеми становить 100 штук на 40 свердловин, вартість яких не перевищуватиме 3 грн за штуку.

Таким чином, всі витрати на ВМ становитимуть:

40×3+1490×4,8+120×26+30×10+40×240+316,48×40×3,3 = 438 046 грн.

Витрати ВМ на відбивання 1 м^3 гірської породи становитимуть:

438046/(6,7×6,7×12×40) = 20,33 грн.

З урахуванням витрат ВМ на дроблення негабариту витрати становитимуть 20,33+30000×0,59×(0,4×33+1,05×2×1)/1000000 = 20,60 грн.

Таким чином, витрати ВМ на відбивання 1 м^3 гірської породи із застосуванням розосереджених зарядів скоротяться на 1,386 грн порівняно з методом підривання суцільних зарядів із застосуванням для ініціювання стандартних систем типу «Хвиля», та на 3,773 грн порівняно з методом суцільних зарядів, ініційованих ДШ.

Наведені розрахунки доводять, що застосування української НСІ «Хвиля» та пасивних розгалужувачів в системах НСІ дозволяє здійснювати ініціювання розосереджених зарядів, забезпечуючи очікуваний економічний ефект на масовий вибух 40 свердловин у розмірі 32131 грн. За річної продуктивності в 1,0 млн м^3 видобутої гірської маси економічний ефект від впровадження пропонованих розробок становитиме понад 3770000 грн.

Висновки до розділу 7

Завершальний розділ дисертаційної роботи описує перспективи і можливості впровадження в гірничу практику результатів виконаних досліджень, спрямованих на подальше вдосконалення сучасних способів і засобів ведення

вибухових робіт через розробку і впровадження ефективних детонаційних систем на основі низькошвидкісних детонаційних процесів в системах, які за можливості, застосовують невибухові матеріали, що стають вибуховими лише шляхом змішування компонентів на місці виконання вибухових робіт.

Серед засобів, пов'язаних з поширенням детонаційного процесу від первинного джерела до промислового заряду, особливої уваги науковців і практиків заслуговує засіб трансляції детонаційного сигналу вздовж складної вибухової мережі, на який покладено відповідальність за підтримку стабільності, заданого режиму розведення сигналу в системі зарядів, максимально можливої безпеки у використанні під час зарядних робіт для персоналу і для оточуючого середовища. Цим умовам відповідає пропонована розробка – неелектрична система ініціювання «Хвиля», яка є вдосконаленням вітчизняної НСІ «Імпульс» в трьох модифікаціях, призначених для використання в поверхневих мережах, в свердловинах, в шахтних умовах, тунелях, а також у будівництві. За основними технічними характеристиками НСІ забезпечує трансляцію детонаційного процесу вибуховою мережею зі швидкістю 2000±200 м/с з уповільненнями в діапазоні часу від 0 до 9000 м. За результатами досліджень підготовано проєкт Технічних умов «Система ініціювання неелектрична Хвиля» та Директивний технологічний процес ДТП 24020192.06300.00005 виробництва з використанням системи ініціювання неелектричної «Хвиля» на дільниці ПрАТ «Інтервибухпром» для ПрАТ «Підприємство з іноземними інвестиціями "Інтервибухпром"» з введенням у 2024 році.

У практиці підривання розосередженого свердловинного заряду з інертними проміжками між його частинами або при застосуванні техніки каскадного ініціювання подовженого заряду, складеного з ВР різної потужності та чутливості, створюються умови для інтенсивних взаємних впливів частин масиву як на акустичному етапі розвитку силових полів у часі підривання суміжних частин колонки заряду, так і на рівні взаємних переміщень зрушених ділянок масиву, прилеглого до свердловини. В цих умовах виникає потреба забезпечити одночасно подачу детонаційного імпульсу в різні частини заряду або в його

розосереджені ділянки. Традиційно при використанні детонуючого шнура в якості транслятора його витрата зростає пропорційно ступеню розосередження заряду. Одночасно підсилюються негативні явища, пов'язані з впливом ДШ на стан свердловинного заряду (переущільнення, формування суцільної газової порожнини вздовж транслятора). Запобігти цим явищам сприяє використання техніки ініціювання на основі НСІ. Але з метою скорочення витрат детонуючого хвилеводу в дисертації запропоновано застосування інертних трубчастих розгалужувачів, робота яких заснована на здатності розгалужувача до передачі стабільної детонаційного імпульсу через короткий повітряний проміжок між відрізками хвилеводів. Водночас встановлено, що збільшення кількості відгалужень лише незначно зменшує відстань передачі імпульсу в межах корпуса пристрою. Цей пристрій суттєво підвищує ефективність і економічність методу.

Базуючись на прийнятій в дисертації концепції, заснованій на доборі доступних і безпечних вихідних матеріалів з їх змішуванням і перетворенням у вибухову речовину на спеціально споруджених пунктах, максимально наближених до споживача – гірничого підприємства, або безпосередньо на місці виконання вибухових робіт, можливо суттєво покращити економіку вибухового методу ощадливого відділення монолітів декоративного каменю від масиву на основі технології підривання К-зарядів. Для реалізації методу в заводських умовах виготовляються лише оболонки зарядів – пластикові К-труби, які заповнюються вибуховою сумішшю на місці виконання робіт. Спосіб виготовлення вибухової суміші на місцях проведення вибухових робіт не потребує витрат на допоміжне дороге обладнання: достатньо мати мірні ємності або циліндри. Промислові випробування технології на Івано-Франківському кар'єрі ТОВ «Буропідривник» показали, що спосіб виготовлення зарядів за місцем виконання вибухових робіт повністю придатний для практичного використання.

Як свідчать розрахунки, прогресивна неелектрична система типу «Нонель» є найбільш безпечною для ініціювання свердловинних зарядів масового вибуху в сенсі сейсмічної дії. Прийнята для розрахунку діагональна схема комутації вибухової мережі засобами ініціювання системи типу «Нонель» з уповільненням у

17 мс не поступається за параметрами сейсмобезпеки схемі ініціювання із застосуванням високошвидкісного детонуючого шнура в комплекті з сповільнювачами типу КЗДШ з періодом уповільнення 20 мс, припустимим Правилами, через повільніше проходження ударної хвилі хвилеводом.

У розрахунках застосовано методику визначення коефіцієнта сейсмічності масового вибуху як співвідношення між максимальною масою в одночасно вибухаючій групі зарядів і часом одного сповільнення в цій групі в кг/мс.

Вибіркові розрахунки щодо економічної ефективності запропонованих у роботі напрямків вдосконалення вибухових систем показали, що при впровадженні низькошвидкісної детонаційної системи НСІ з інертними розгалужувачами в умовах масового вибуху 40 свердловинних розосереджених зарядів, з'єднаних за діагональною схемою, забезпечується економічний ефект у розмірі 32131 грн, або 1,386 грн на 1 $м^3$ висадженої гірської маси, та 3,773 грн на 1 $м^3$ порівняно з методом суцільних зарядів, ініційованих із застосуванням детонуючого шнура.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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

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

2. За відсутності в професійній літературі теоретичних обґрунтувань механізму поширення детонаційного процесу в детонуючому хвилеводі низькошвидкісної системи ініціювання типу «Нонель», в роботі, вперше досліджено динаміку циліндричної оболонки для визначення параметрів хвиль деформацій і встановлені закономірності детонаційного процесу на основі струшування дрібнокристалічної ініціюючої ВР, її розпилення в каналі хвилеводу з подальшою детонацією в низькошвидкісному режимі. Хвильові й детонаційні

параметри в циліндричному хвилеводі, характер динаміки рухливого навантаження в його тілі сприяють механічному струшуванню напиленої на її внутрішню поверхню дрібнокристалічної ініціюючої ВР і створенню умов для стабільного переміщення в пилоповітряній суміші детонаційної хвилі каналом трубки зі швидкістю в межах 1000...2000 м/с при стрибку тиску на фронті до 25 МПа,

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

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

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

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

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

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

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

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

11. Конструкція і вибуховий склад проміжних детонаторів (бойовиків) на основі місцевих невибухових компонентів (аміачної селітри, пероксиду водню, гліцерину) виключає використання вартісних і небезпечних у виробництві та використанні заводських тротилових і тротил-гексогенових бойовиків, сприяючи їх формуванню на місці виконання висаджувальних робіт, а надання бойовикам конічної конфігурації принципово змінює умови формування ініціюючого імпульсу, орієнтуючи його в потрібному напрямку.

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

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

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

15. На основі оцінки рівня сейсмічної небезпеки масового вибуху системи свердловинних зарядів за показником сейсмічності вибуху здійснено порівняння варіанта комутації вибухової діагональної мережі з використанням традиційного детонуючого шнура з варіантом комутації за допомогою системи НСІ «Хвиля», з якого видно, що завдяки застосуванню низькошвидкісної системи ініціювання

показник сейсмічності порівняно з традиційними засобами короткоуповільненого підривання знижується в 1,9 рази.

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

16. Вибіркові розрахунки економічної ефективності впровадження вітчизняної низькошвидкісної детонаційної системи ініціювання НСІ в комплексі з проміжними ініціаторами та інертними розгалужувачами, які сприяють застосуванню техніки розосередження свердловинних зарядів та їх зворотного ініціювання з донної частини свердловини, в умовах масових вибухів свердловинних зарядів за річної продуктивності підприємства в 1,0 млн $м^3$ видобутої гірської маси, економічний ефект від впровадження пропонованих розробок становитиме понад 3770000 грн. для всіх умов гірничого виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравець В. Г., Воробйов В. Д., Кузьменко А. О. Підривні роботи на кар'єрах : Навч. посіб. Київ : ІДСО, 1997. 376 с.

2. Гайко Г., Білецький В. Гірництво в історії цивілізації. Київ : Вид. дім «Києво-Могил. акад.», 2016. 488 с.

3. Білецький В. С., Гайко І. Г. Хронологія гірництва в країнах світу. Донецьк : Дон. від-ня НТШ, "Ред. гірн. енциклопедії",, 2006. 220 с.

4. "Blasting" . Vol. 4 (11th ed.) Encyclopædia Britannica. 1911. pp. 44–48.

5. Tang H., Li H., Jiang P., Wang X., Li J. Experimental study on effect of topography on propagation of blasting waves. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2007. Vol. 9, no. 26. P. 1817–1823.

6. Efremov E., Niikiforova V., Kratkovsky I., Ishchenko K., Nikolenko E. Blasted breaking of hard mediums under differend gradient loading by elongated charges of variable diameter. *Розробка родовищ корисних копалин: Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. С. 52–59.

7. Кравець В.Г., Вовк О.О., Котенко В.В., Терентьєв О.М. Прикладна геодинаміка вибуху в гірництві та геотехнічному будівництві. Житомир: ЖДТУ, 2012. 156 с.

8. Tan L., Zhou Z., Cai X., Y. Rui Analysis of mechanical behaviour and fracture interaction of multi-hole rock mass with DIC measurement. *Measurement*. 2022. Vol. 191. P. 110794. URL: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110794

9. Бизов В. Ф., Дриженко А. Ю. Відкриті гірничі роботи. Т. 13. Кривий Ріг: Мінерал, 2004. 341 с.

10. Borkowski M., Swetlik M. Bezpieczeństwo górniczych švodków stvzatowych wolek metany i pylu węglowego. *Materialy wybuchowe i technika stvzelnicza*. 1993. P. 263–270.

11. Blasters Handbook issued by Du Pont et Nemours, Wilington. Delaware. – 1978.

12. Miśkiewicz K., Wojaczek A. Ryzyko niezamierzonego odpalenia zapalników elektrycznych przez urządzenia radiokomunikacyjne. *Przegląd Górniczy*. 2020. Vol. 4, no. 76. P. 22–27.

13. General Recommendations by the National Board of Occupational Safety and Health on the Implementation of the Provisos Blasting Work. AFS. - 1986: 14.

14. Gustaffson R. Swedish Blasting Technique. Nova Boktryckevi, AB 1973. – Gotenburg.

15. Gehm K., Bittner G., Wotschke R. Undewollte Auslősung von elektrischen Zűndern durch Hochfrequeuz – energie. PTB – Mitt. 2/68 I Nobel Hefte 35. – 1969.

16. Dworok R. Bezpieczeństwo zapalników elektrycznych wobec nadajników fal elektromagnetycznych wysokiej częstotliwosci. *Materialy wybuchowe i technika strzelnicza*. 1996. P. 281–293.

17. Zhong D., He L., Cao P., Zhang K. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting. *Baozha Yu Chongji/Explosion and Shock Waves*. 2016. Vol. 5, no. 36. P. 703–709.

18. Спосіб виконання буро-вибухових робіт : пат. 103516 С2 Україна : МКИ F42D 3/04. Заявл. 30.08.2011 ; опубл. 25.10.2013, Бюл.№ 20. 6 с.

19. Wowk A., Krawiec W., Rogoznikova W. Wojewodka A. Sterowanie parametrami impulsu wybuchowego. *Materialy wybuchowe i technika stzzelnicza*. 1993. No. 1. P. 11–24.

20. Gu, Yi-cheng. Discussion on seismic formula concerning multistage millisecond explosion. (2005) Railway Engineering, (Z1), pp. 73-75.

21. Вовк О. О., Король Ю. А., Воеводка А. Оптимізація параметрів вибухового імпульсу під час руйнування гірських порід. *Промислові вибухові речовини та засоби їх ініціювання* : Матер. 1-ої Укр. конференції, м. Шостка, 1995. С. 49–55.

22. Бизов В. Ф., Федоренко П. Й. Вибухові роботи. Т. 10. Кривий Ріг: Мінерал, 2001. 230 с.

23. Кравець В., Закусило Р., Шукуров А., Закусило Д.. Особливості моделювання силового поля вибуху системи суміжних зарядів. Збірник наукових

праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»,, м. Шостка, 27–29 лист. 2024 р. Суми, 2024. С. 43–48.

24. Крисін Р. С., Домнічев В. Н. Сучасні вибухові речовини для місцевого приготування. Дніпропетровськ : Наука та освіта, 1998. 140 с.

25. Hogeboom, Charles L. "Blasting" . The American Cyclopædia, 1897.

26. Єфремов Е. І., Петренко В. Д., Джос В. Ф. Досвід та перспективи застосування найпростіших безтротилових ВР зі стабільними фізичними та детонаційними властивостями та ВР на основі конверсії. *Промислові вибухові речовини та засоби їх ініціювання* : Матер. 1-ої Укр. конференції, м. Шостка. 1995. С. 8–13.

27. Вовк О. О., Кравець В. Г., Демещук Л. І. Деякі проблеми детонації сумішевих ВР. *Промислові вибухові речовини та засоби їх ініціювання* : Матер. 1-ої Укр. конференції, м. Шостка. 1995. С. 69–76.

28. Воєводка А. Вплив типів пального та ініціатора на безпеку і стабільність вибухового перетворення салетролу. *Вісник НТУУ "КПГ. Серія "Гірництво"*. 2002. № 6. С. 75–80.

29. Casertano D., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Cellini V., Bruno R. Drill and Blast in Gypsum Quarries: Optimization of Technical, Economic, and Safety Aspects in “Monte Tondo” Mid-mountain Case Study. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/s42461-024-01133-9

30. В. Г. Кравец, А. Воеводка, Б. Ч. Хаджиева, А. А. Фролов, Разработка методов инициирования смесевых взрывчатых веществ. *Промислові вибухові речовини та засоби їх ініціювання.* Матер. 1-ой Украинской научн, конф, г. Шостка. 1995. С. 27–31.

31. Cook M.A. , Mayfield E. M. Partridg. Reaction Rates of Ammonium Nitrate in Detonation. Y. Phys. Chem., 1955, 59. 8.

32. Wu H., Gong M. Calculation and application of hole by hole blasting vibration superposition based on measured delay times of detonators. *Baozha Yu Chongji/Explosion and Shock Waves*. 2019. Vol. 2, no. 39. P. 025202.

33. Спосіб формування свердловинного заряду вибуховими речовинами Патент на корисну модель № 6518, Україна, 2005, МВК7 F 42D 3/04, E 21C 37/00, замовл. 16.09.2004; надрук. 16.05.2015. Бюл. № 5.

34. Бизов В. Ф., Лапшин О. Є. Охорона праці в гірництві. Т. 7. Кривий Ріг: Мінерал, 2001. 251 с.

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

36. Система ініціювання неелектрична комбінована безкапсульна : пат. 102531 Україна : МПК(2015.01) C06C 7/00 F42D 3/00. Опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21. 4 с.

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

38. Кравець В. Г., Демещук В. Л. Вплив геометричних та енергетичних параметрів ініціатора на механізм розвитку детонації у подовженому заряді. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво"*. 2002. № 7. С. 64–71.

39. Cudrilo S., Maranda A., Trzcinski W. O szacowaniu parametrow fal ude rzenio wych genero wanych w osrodku inercyjnym cisnieniem produktow detonacji. *Materialy wybuchowe i technika strzelnicza* : Postępowanie międzynarodowe konferencje. Gliwice, 1993. P. 46–59.

40. S. Cudzilo, A. Maranda, R. Nowaczewskij, W. Trzcinski. Badanie wplywu charakterystyk detonatora na parametry fal uderzeniowych w osrodku inercyjnym. *Materialy wybuchowe i technika strzelnicza*. Gliwice, 1993. P. 60–69.

41. Agrawal H., Mishra A. Modified scaled distance regression analysis approach for prediction of blast-induced ground vibration in multi-hole blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 202–207.

42. Cudziło S., Maranda A. Badanie parametrów procesu inicjacji i propagacji detonacji w zawiesinowym materialie wybuchowym uczulanym trotylem.. Materiały wybuchowe i technika strzelnicza. Politechnika Ślaska, Ustroń, 1996. P. 63-70.

43. Швець О. О., Фтемов Ю. О., Колос Р. Л. Вибухова справа. Основи ведення підривних робіт: Навчальний посібник. Львів : Національна академія сухопутних військ, 2016. 352 с.

44. SME Mining Enginering Handbook, Third Edition. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. 1984 p.

45. Cybulski W. Badania bezpieczeństwa MW wolec metanu i pylu węglowego b węglu, piaskowcu oraz w możdrierzach strzalowych. *Archiwum Gównitwa. Zesz*. 1963. Vol. VIII, no. 4.

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

47. Nonel system description. Nitro Nobel AB, Gytorp, Nora, 1998. 32 p.

48. NONEL LP 1.1B. Nonelectric Long Period Delay Detonator. Dyno Nobel Inc. 2795 East Cottonwood Parkway, Suite 500, Salt Lake City, Utah 84121 USA.

49. Nitro Nobel, Sweden. Non-electric detonators of the Nonell system: Catalogue/Nitro Nobel, 2000. 16 p.

50. Non-Electric Delay Detonators. *Australien Mining*. 1983. Vol. 75, no. 9. P. 17–20.

51. Chironis N. P. Search for Better Blasting. *Coal Age*. 1982. Vol. 87, no. 7. P. 60–69.

52. Initiation-System. *Mining International*. 1982. Vol. 299, no. 7680. P. 308.

53. Morry W. Magnadet electric initiation system. *CIM Bulletin*. 1982. No. 11. P. 61–66.

54. Закусило Р. В., Лукашов В. К., Закусило Д. Р., Маргарян А. З., Слесарева О. В. Дослідження технології виробництва піротехнічного складу у формі

тонколистового виробу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* 2021. Т. 127, № 2. С. 106–111.

55. Non-electric blast initiation. How to select the right system : Engng Min JV193, N5, May 1992, P16D–16E.

56. Vinith Kumar P.V., Raina A.K., Balamadeswaran P., Sambasivam V.S., Saravanan K., Chandar Karra Ram. Evaluating Blast Fragmentation: A Comparative Study of Electronic and Shock-Tube Initiation Systems in a Limestone Mine. *Disaster Advances*. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 153–162.

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

58. Мала гірнича енциклопедія. т. II. (за редакцією В. С. Білецького). Донецьк: Донбас, 2007. 652 с.

59. He L., Yang R., Zhong D., Xie L., Zhang K., Yang L. Calculation of modified charge amount per delay in non-electric initiation network and its application in onsite PPV prediction. *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*. 2022. Vol. 41, no. 15. P. 54–62.

60. Лучко А. І. Розробка рівнянь стану газоподібних продуктів вибуху еталонних і нових промислових сумішевих вибухових речовин. *Вісник ЖДТУ (Технічні науки)*. 2008. Т. 46, № 3. С. 156–161.

61. Лучко І. А., Ремез Н.С, Лучко А.І. Математичне моделювання дії вибуху в ґрунтах і гірських породах. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 264 с.

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

63. Динаміка формування свердловинних зарядів вибухових речовин у полімерних оболонках. *Вісник НТУУ „КПІ". Серія „Гірництво"*. 2016. Т. 2. С. 41–49.

64. Wu M.-b. The vibration effect of micro timelag in soil and rock. *Soil Engineering and Foundation*. 2005. Vol. 6. P. 75–76.

65. Бойко, В. В., Желтоножко, А. А., Кравець, В. Г., Пилипишин, П. Б., Демещук, В. Л. Технологічні напрямки та екологічні аспекти утилізації боєприпасів в умовах гірничих підприємств України. *Геоінженерія*. 2020. № 4. С. 44–52.

66. Прокопенко В. С. Підвищення безпеки та ефективності лінійного ініціювання зарядів найпростіших вибухових речовин в оболонках. *Проблеми охорони праці в Україні*. 1999. № 2. С. 103–108.

67. Cudzilo S., Maranda A., Trzcincki W. O wykorystanij testu cylidrycznego do wyznaczania energetycznych charakterystyk nieidealnych materialow wybuchowych. *Materialy wybuchowe i technika strzelnicza*. 1996. P. 17–23.

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

69. Virdhar H. L., Arora A. Ignition of Composite solid propellants by the Hot plat Technique. *Combustion and Flame*. Vol. 31, no. 3. P. 245–250.

70. Gimenez P., Lecume S., Groux I. A study of explosive compositions containing ammonium perchlorate. *Prop. Expl. Pyrotechn.* 1994. no. 19. P. 9–14.

71. Yue Z., Wang X., Zhou X., Wang H., Xu S., Ren M., Peng L. Study on the dynamic fracture law of layered materials under the explosive load of slotted charge. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025. Vol. 138. P. 104932.

72. Energetyczna effektyvnosc wvbuchu wvdluzonvch Ladunkow Materialow wybucbowych z kierowaniem Frontem fali detonacyjnej / A. A. Wowk et al. *Miedzynarodowa Konferencia II Szkola Geomechaniki*, Gliwice. 1995. P. 395–406.

73. Lafrance K. Application of large diameter boreholes in underground mines. *CIM Bulletin*. 1984. Vol. 77, no. 861. P. 45–51.

74. Union Explosives Rio Tinto. Testing. Explosives and blasting agents: Catalogue / Union Explosives Rio Tinto. Madrid, 1985. 38 p.

75. Курінний, В.П. Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом. – Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2009. 158 с.

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

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

78 Кравець В. Г., Коробійчук В. В., Зубченко О. А. Руйнування гірських порід вибухом [навч. посібник]. Житомир : ЖДТУ, 2012. 328 с.

79. Бизов В. Ф. Основи технології гірничого виробництва (виробничі процеси). Т. 4. Кривий Ріг: Мінерал, 2000. 247 с.

80. Blair D. Non-linear superposition models of blast vibration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2008. Vol. 45, no. 2. P. 235–247. doi: 10.1016/j.ijrmms.2007.05.002

81. Yari M., Monjezi M., Bagherpour R. Selecting the most suitable blasting pattern using AHP-TOPSIS method: Sungun copper mine. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49, no. 6. P. 967–975.

82. Singh P., Sirveiya A., Babu K., Roy M., Singh C. Evolution of effective charge weight per delay for prediction of ground vibrations generated from blasting in a limestone mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2006. Vol. 20, no. 1. P. 4–19. doi: 10.1080/13895260500286050

83. Вплив конструктивних та міцнісних факторів на рух циліндричної оболонки заряду вибухової речовини / В. Г. Кравець та ін. *ВІСНИК Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2002. № 7. С. 13–16.

84. Henning J., Mitri H. Numerical modeling of ore dilution in blasthole stoping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007. No. 5. P. 692–703.

85. Лучко І. А. Фізичне моделювання дії вибуху на викид горизонтальних циліндричних зарядів скінченних розмірів у шаруватих ґрунтах. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво"*. 2005. № 12. С. 3–7.

86. He Li, Yang Renshu, Zhong Dong-wang, Li Peng , Wu Chunping, Chen Jiangwei. Calculation of equivalent charge weight per delay and vibration velocity prediction for millisecond delay blasting. *Explosion and Shock Waves*. 2021. Vol. 41, no. 9. P. 095201. URL: https://doi.org/10.11883/bzycj-2020-0363.

87. Кравець В. Г., Луговий П. З., Марграян А. З. Динаміка поліетиленової трубки під дією рухомого ударного завантаження. *ВІСНИК Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2004. № 10. С. 38–42.

88. Луговий П. З., Фролов О. О. Дослідження впливу детонації циліндричного заряду вибухової речовини на оболонку. *ВІСНИК Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2003. № 8. С. 8–15.

89. Agrawal H., Mishra A. K. Evaluation of initiating system by measurement of seismic energy dissipation in surface blasting. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11, no. 13. URL: https://doi.org/10.1007/s12517-018-3683-3

90. Кравець В. Г., Зуєвська Н. В. Проектування вибухових робіт: навч. Посібник : Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 217 с.

91. Биков Д. Г., Фролов О. О. Перспективи використання неелектричної системи ініціювання “Нонель - Юнідет” в умовах ВАТ “Полтавський ГЗК”. *ВІСНИК Національного технічного університету України «КПІ». Серія ”Гірництво”*. 2000. № 3. С. 69–71.

92. Кравець В., Сагало Б., Шукюров А. Просторово-часові параметри фронту силового поля в системі видовжених зарядів. *Геоінженерія*. 2022. № 7. С. 30–37.

93. Кравець В., Шукюров А., Ган А., Бовкунович А. Розвиток силового поля в системі суміжних свердловинних зарядів. *Геоінженерія*. 2020. № 2. С. 7–15.

94. Кравець В. Г., Фролов О. О., Маргарян А. З. Експериментальні дослідження експлуатаційних характеристик хвилеводу системи ініціювання типу «Нонель». *ВІСНИК Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2003. № 9. С. 59–66.

95. Создание неэлектрической системы инициирования в Украине / Б. И. Шаров та ін. *Сборник научных трудов национальной горной академии Украины*. 2001. Т. 3, № 11. С. 108–113.

96. Шаров Б. І., Банишевський В. В., Чернов Е. Д., Закусило Р. В. Создание детонирующего волновода к неэлектрической системе инициирования (Проблемы и решения). *Артиллерийское и стрелковое вооружение (специальный выпуск)*. 2003. С. 36–37.

97. Закусило Р. В., Желтоножко А. А. Состояние разработки безопасной неэлектрической системы инициирования. Исследования по разработке рецептуры полимерной трубки волновода. *Сборник научных трудов национальной горной академии Украины*. 2003. № 18. С. 42–50.

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

99. Мельник Л.І. Хімія і фізика полімерів: Навч. посібник. Київ : НТУУ ”КПІ” 2016. 161 с.

100. Особенности и преимущества шнекового микродозирования штатных взрывчатых веществ / Р. В. Закусило та ін. *ВІСНИК Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2008. № 16. С. 80–83.

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

102. Sikora R. Przetwórstwo tworzyw welkocząsteczkowych. Warszawa, 1993. 528 p.

103. Koszkul J. Materiały Polimerowe. Częstochowa, 1999. 174 p.

104. Спорягін Е. О., Варлан К. Є. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів: навч. посіб. Дніпро : Вид-во ДНУ, 2012. – 188 с.

105. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія. Київ : ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2009. 265 с

106. Воєводка А., Демещук В. Л. Забезпечення оптимального режиму детонації свердловинних зарядів шляхом застосування подовжених ініціаторів. *Пробл. Охорони праці в Україні: Зб.наук. праць.* 2002. № 5. С. 41–48.

107. Спосіб формування свердловинного заряду кумулятивної дії для вибухового руйнування гірських порід. Пат. на винахід 86138 Україна. Заявл. 24.07. 2007; опубл. 25.03. 2009. Бюл. № 6.

108. Єлагін Г.І., Шкарабура М.Г., Кришталь М.А., Тищенко О.М. Основи теорії розвитку і припинення горіння. Черкаси: ЧІПБ, 2001. – 448 с.

109. С.О. Ємельяненко, О.І. Лавренюк, Б.М. Михалічко Теорія горіння та вибуху. Пожежі та їх ліквідація [Текст] : навчальний посібник. Львів : ЛДУ БЖД, 2019. 158 с.

110. Шиман Л.М. Безпека процесів виробництва та використання на гірничих підприємствах емульсійних вибухових речовин марки "ЕРА". Автореферат дисертації : Дніпропетровськ, 2010. 40 с.

111. ДСТУ 7116:2009 «Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмічної стійкості будинків і споруд». Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 6 с.

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

113. Кравець В. Г., Воробйов В. Д., Кузьменко А. О. Підривні роботи на кар’єрах: [навч. посібн.]. Київ : ІСДО, 1994. 376 с.

114. Кравець В. Г., Коробійчук В. В., Бойко В. В. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія. Житомир : ЖДТУ, 2015. 408 с.

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

116. L. N. Shiman, E. B. Ustimenko, V. I. Golinko, V. V. Sobolev, Safety of processes for the production and use of emulsion explosives with components of utilized weapons. Monograph. Dnipropetrovsk: Lira, 2013.

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

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

119. Kim K.-J., Kim H.-S., Sim J.-S. Solubilities of Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine in γ-Butyrolactone + Water, Dimethylsulfoxide + Water, and N-Methyl pyrrolidone + Water. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2013. Vol. 58, no. 9. P. 2410–2413. URL: https://doi.org/10.1021/je400199m

120. Svensson L., Nyqvist J.-O., Westling L. Crystallization of HMX from γ-butyrolactone. *Journal of Hazardous Materials*. 1986. Vol. 13, no 1. P. 103–108. URL: https://doi.org/10.1016/0304-3894(86)80011-5

121. Meulenbrugge J., Van der Steen A., Van der Heijden A. E. Crystallization of Energetic Materials, the Effect on Stability, Sensitivity and Processing Properties. *Energetic Materials Technology* : Proc. Of Symposium (international), Phoenix. Phoenix, 1995.

122. Kröber H., Teipel U. Crystallization of Insensitive HMX. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2008. Vol. 33, no. 1. P. 33–36. URL: https://doi.org/10.1002/prep.200800205

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

124. Process for spheroidization of RDX crystals : patent US 4065529A United States. Published on 1997.

125. Lasota J., Chyłek Z., Trzciński W. A. Methods for Preparing Spheroidal Particles of 3-Nitro-1,2,4-triazol-5-one(NTO). *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015. Vol. 4, no. 12. P. 769–783.

126. Leng Z., Fan Y., Gao Q., Hu Y. Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 30, no. 3. P. 373–380. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.010

127. Вибухова речовина : пат. 68559 Україна : C06B 31/28. Опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6.

128. Hogstedt C., Davidsson B. Nitroglycol and nitroglycerine exposure in a dynamite industry 1958–1978. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1980. Vol. 41, no. 5. P. 373–375. URL: https://doi.org/10.1080/15298668091424906

129. Gori T., Parker J. D. Nitrate-Induced Toxicity and Preconditioning. *Journal of the American College of Cardiology*. 2008. Vol. 52, no. 4. P. 251–254. URL: https://doi.org/10.1016/j.jacc.2008.04.019

130. Zawadzka-Małota I. Testing of mining explosives with regard to the content of carbon oxides and nitrogen oxides in their detonation products. *Journal of Sustainable Mining*. 2015. Vol. 14, no. 4. P. 173–178. URL: https://doi.org/10.1016/j.jsm.2015.12.003

131. Liu, L.; Yan, L.; Dong, B.; Liu, W.; Yi, W.; Zhao, K. Detection and Recognition Method of Misfire for Chamber (Deep-Hole) Blasting Based on RFID. IEEE Access 2019, 7, 170144–170156.

132. Budakoğlu E. Seismological investigations of fireworks factory explosions in Hendek-Sakarya (Turkey). *Journal of Seismology*. 2022. Vol. 26, no. 2. P. 283–299. URL: https://doi.org/10.1007/s10950-022-10082-z

133. Lograd o L.P.L., Silva M.N., Laboissiere J.C.A., Braga J.W.B. Profile of explosives's use in ATMs /cash safes robberies in Brazil. *Journal of Forensic Sciences*. 2022. URL: https://doi.org/10.1111/1556-4029.15056

134. Kramarczyk B., Suda K., Kowalik P., Swiatek K., Jaszcz K., Jarosz T. Emulsion Explosives: A Tutorial Review and Highlight of Recent Progress. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 14. P. 4952. URL: https://doi.org/10.3390/ma15144952

135. Hydrogen Peroxide Handbook. Technical Report, Rocketdyne Chemical and Material Sciences Department, July 1967.

136. Shanley E. S., Greenspan F. P. Highly Concentrated Hydrogen Peroxide. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1947. Vol. 39, no. 12. P. 1536–1543. URL: https://doi.org/10.1021/ie50456a010

137. Peroxide-glycerol explosive : patent US 2452074 A United States. Published on 1948.

138. Nikolczuk K., Maranda A., Mertuszka P., Fuławka K., Wilk Z., Koślik P. Measurements of the VOD of Selected Mining Explosives and Novel "Green Explosives" Using the Continuous Method. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2019. Vol. 16, no. 3. P. 468–481. URL: https://doi.org/10.22211/cejem/112481

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

140. The Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids. F. P. Bowden and A. D. Yoffe. Cambridge University Press. 1952. 104 pp. Illustrated. *The Journal of the Royal Aeronautical Society*. 1952. Vol. 56, no. 502. P. 807–808. URL: https://doi.org/10.1017/s0368393100125064

141. Dow Chemical Co High pressure explosive compositions and method using hollow glass spheres : patent US3456589A United States. Applied on 20.03.1967 ; published on 22.07.1969.

142. Thickened nitromethane explosive containing encapsulated sensitizer : patent US 3713915A United States. Published on 30.01.1973.

143. Eckels R Reversible sensitization of liquid explosives : patent US3797392DA United States. Published on 19.03.1974.

144. Mertuszka P., Kramarczyk B. Study of the Influence of Sensitizer Content on the Density of a Bulk Emulsion Explosive Used in Underground Operations. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2021. Vol. 18, no. 4. P. 429–447. URL: https://doi.org/10.22211/cejem/144498

145. Improved explosive composition comprising hydrogen peroxide and a sensitizer : patent CA2842822C Canada. Published on 21.05.2019

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

147 Калякін С. О., Прокопенко В. С. Про лінійне ініціювання зарядів вибухових речовин. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2013. Т. 11, № 1. С. 41–46.

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

149. ДСТУ 7117:2009 «Вибухи промислові. Методи визначення тиску на фронті ударної повітряної хвилі та границі безпечної зони». Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 9 с.

150. Бойко В.В., Ган А.Л., Ган О.В. Спеціальні вибухові технології в геоінженерії : Монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 316 с.

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

152. Oran E. S., Williams F. A. The physics, chemistry and dynamics of explosions. . *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. Vol. 370, no. 1960. P. 534–543.

153. ДСТУ 4704-2008 «Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки». Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 11 с.

154. Gołabek, B.; Kasperski, J. The Influence of the Composition and Structure of Emulsion Explosives on Their Detonation Parameters. Ph.D. Thesis, Central Institute of Mining, Katowice, Poland, 2006.

155. Zhang K., Zhao H. Historical Perspective. Perspectives in the Stability of Emulsion Explosives. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2022. No. 307. P. 1027.

156. Benson D. J., Stainier L. An Eulerian shell formulation for fluid–structure interaction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000. Vol. 187, no. 3-4. P. 571–590. URL: https://doi.org/10.1016/s0045-7825(99)00340-0

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

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

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

160. Соболєв, В.В., Терензук, Р.М., Григор’єв, О.Є. Технологія та безпека виконання підривних робіт». Дніпро : НГУ, 2017. 314 с.

161. Maranda A., Markowska D., Kukfisz B., Jakubczak W. Comprehensive Review of the Influence of Sensitizers on the Detonation Properties of Emulsion Explosives. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025. Vol. 15, no. 5. P. 2417. URL: https://doi.org/10.3390/app15052417.

162. Yang M., Ma H., Shen Z. Effects of RDX Powders on Detonation Characteristics of Emulsion Explosives. *J. Energetic Mater*. 2019. No. 37. P. 459–474.

163. Закусило Р. В. Основи побудови вибухонебезпечних технологічних процесів виробництва вибухових матеріалів і засобів їх ініціювання. *Тези доповідей І Міжнародної науково-технічної конференції «Хімічна технологія та виробництво»* : Зб. тез. Суми, 2012. С. 32.

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

165. ТУ 24.6-14015318-097-2001. Вибухові речовини промислові. Емульхім-ШМ. Чинний від 2007-07-27. Вид. офіц. Рубіжне, 2007.

166. ТУ У 29.5-23647075-009:2006. Машини змішувально-зарядні серії «Україніт-5». Вид. офіц., 2006.

167. Соболєв В.В., Чернай А.В., Чебенко В.М., Скобенко О.В. Способи ініціювання зарядів вибухових речовин: Навчальний посібник. Дніпро : ТОВ «ЛізуновПресс», 2013. 88 с.

168. Буллер М. Ф., Роботько В. А. Технології виробництва вибухових речовин. Суми : Сумський державний університет, 2022. 211 с.

169. Буллер, М.Ф. Промислові вибухові речовини. Суми: Сумський державний університет, 2009. 226 с.

170. Правила устройства підприємств…

171. НПАОП 0.00-1.29-97. Правила захисту від статичної електрики. Чинний від 1997-04-22. Вид. офіц. Киев, 1999.

172. Закусило Р. В. Закономерности влияния состава и способа получения взрывчатой композиции и полимерного носителя на свойства детонирующего волновода : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Шостка, 2010.

173. Закусило В. Р., Романченко А. М., Закусило Р. В. Гетерогенные взрывчатые составы пиротехнического типа. *Вісник Національного техн. університету «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*. 2015.

№ 27. С. 60–66.

174. Сколоздра О. Є. Кристалографія, кристалохімія та мінералогія. Луцьк : Вид. центр ЛНТУ, 2010. 240 с.

175. Підгорний А.В., Назарова Т.М. Хімічна термодинаміка. К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 81 с.

176. A discontinuous crystallization unit for the production of ball-shaped crystals : patent 15/127,721 United States : B01D 9/00. Published on 11.05.2017.

177. Тарельник В. Б., Коноплянченко Є. В., Зубко В. М. Галузеве машинобудування : підручник. Київ : Олді+, 2023. 468 с.

178. Product catalogue/ Nitro Nobel, Gyttorp, S-713 82 Nora, Sweden. 64 с.

179. Фатєєв В.М., Таборов Л.І., Ємець О.Ю., Піротехніка. Нормативні акти України щодо діяльності в сфері піротехнічних виробів. Довідник. Київ, Аграр Медіа Груп, 2012. 210 с.

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

181. ГОСТ 16337-77. Поліетилен високого тиску. Технічні умови. Міждержавний стандарт.

182. ГОСТ 16338-85. Поліетилен низького тиску. Технічні умови. Міждержавний стандарт.

183. Пахаренко В. А., Яковлєва Р. А., Пахаренко А. В. Переробка полімерних композиційних матеріалів. Київ : Воля, 2006. 552 с.

184. Суберляк О. В., Баштанник П. І. Технологія виробництва виробів з пластмас і композитів (Частина 1): Навчальний посібник. Київ: ІСДО, 1995. — 164 с.

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

186. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості). Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с.

187. Суберляк О. В., Баштанник П. І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. Львів : Растр-7, 2007. 375 с.

188. Воєводка А., Демещук В. Л. Забезпечення оптимального режиму детонації свердловинних зарядів шляхом застосування подовжених ініціаторів. *Проблеми охорони праці в Україні: Зб.наук. праць*. 2002. № 5. С. 41–48.

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

190. Спосіб уповільненого підривання зарядів вибухової речовини, система ініціювання зарядів вибухової речовини та пристрій–провідник силового ініціювального імпульсу (варіанти) : пат. 82683 С2 Україна : МПК F42D 1/02. Заявл. 02.01.2007 ; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 5. 10 с.

191. Детонуючий хвилевід : пат. 56067 А Україна : МКИ Н01Р3/00. Заявл. 27.09.2002 ; опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4. 2 с.

192. Зуєвська Н.В., Іщенко К.С., Іщенко О.К., Коробійчук В.В. Геомеханіка вибухового руйнування масиву міцних гірських порід під час будівництва підземних споруд : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 392 с.

193. Лавренюк О.І., Баланюк В.М., Михалічко Б.М. Теорія горіння та вибуху: навчальний посібник. Львів: ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2014р. – 130 с.

194. Вибуховий пристрій для відбійки блоків декоративного каменю : пат. 106545 Україна : МПК С06В 29. Опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с.

195. Спосіб виготовлення вибухового складу на місцях проведення вибухових робіт : пат. 105003 Україна : МПК С06В 29/00 С10L 1/00. Опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4. 4 с.

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

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

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

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

200. Єдині правила безпеки під час вибухових робіт. Київ : Норматив, 1992. 74 с.

201. Zakusylo, R., Romanchenko, A. Kravets, V., Topical issues of re-source–saving tech-nologies in mineral mining and pro-cessing. Multi-authored monograph. - Petroşani, Romania : Universitas Publishing, 2018. - 270 p.

202. Спосіб зниження сейсмічної дії при підриванні зарядів. Патент на корисну модель №114370. Заявл. 10.03.2017; опубл. 10.03.2017. Бюл. № 5. 3 с.

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

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

205. Кравець В., Вапнічна В., Соколовська А. Закономірності формування вертикальної порожнини в стисливому ґрунті вибухом. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія „гірничо-геологічна"*. 2004. № 72. С. 83–88.

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

207. Кравець В. Г., Вапнічна В. В. Технологічні параметри вибухового обвалення ґрунту при створенні вибухом споруд типу «стіна в ґрунті». *Вісник НТУУ „КПІ". Серія „Гірництво"*. 2002. № 7. С. 95–98.

208. Кравець В. Г., Шайдецька Л. В. Підвищення енергоефективності процесу формування камуфлетної порожнини вибухом в свердловині в присутності тампонажного матеріалу. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 4. С. 17–22.

209. Шайдецька Л. В., Ремез Н. С., Дем'янчук А. І. Формування вибухової порожнини в двошаровому середовищі. *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво* : Матеріали II міжнар. науково-практ. конф., м. Шостка. Суми, 2014. С. 129–131.

210. Моделювання динамічного руйнування донної частини свердловини з урахуванням концентратора напруги. В. В. Воробйов та ін. *«Східно-Європейський журнал передових технологій»*. 2017. Т. 3/1, № 87. С. 53–62.

211. Воробйова Л. Д. Дослідження впливу кумулятивного ефекту на тиск у повітряному проміжку під час вибуху розосередженого заряду. *НТУУ "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво". Збірник наукових праць*. 2005. № 12. С. 53–58.

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

213. Edge effects of limited length downhole charge explosion / V. Kravets et al. *Blasting Techniques* : Conf.Proc.31th Intern.Conf. 2019. P. 205–215.

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

215 Шукуров А. М., Кравець В. Г., Закусило Р. В. Теоретичні дослідження силового поля при вибуху нециліндричних зарядів. *Матеріали IV Міжнародної*

науково–практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка. Суми, 2018. С. 15–17.

216. Шукюров А. М., Кравець В. Г. Крайові ефекти масових вибухів на кар'єра : Монографія. Київ : Інтерсервіс, 2022. 138 с.

217. Використання пульсаційних рухів вибухової порожнини для спорудження протифільтраційної завіси / В. Кравець та ін. *Вісник НТУУ „КПІ". Серія „Гірництво"*. 2008. № 17. С. 85–91

218. Купрін В. П. Розробка і впровадження емульсійних вибухових речовин на кар'єрах України. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2012. 243 с.

219. Вибухова речовина : патент № 1819254 СРСР. С06В31/28. Заявлено 04.02.1991.

220. Вибухова речовина : пат. 29971 А Україна : СО6В 31/28. Опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6.

221. Виробництво округлих кристалів перхлорату амонію : Patent US 3498759A.

222. Романченко А. М. Обґрунтування фізико-хімічних і детонаційних параметрів низькоенергетичних зарядів кар'єрного виготовлення : дис. канд. техн. наук : 05.15.03. Київ, 2019. 175 с.

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

224. Емульсійна вибухова речовина : пат. 144696 Україна : МПК С06В 31/28. Опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20. 5 с.

225. Челтонов М. М. Одержання амоній і калій перхлоратів та октогену переробкою енергоконденсованих систем із закінченим терміном зберігання : дис. канд. техн. наук : 161. Дніпро, 2021. 158 с.

226. Закусило В. Р., Романченко А. М., Закусило Р. В. Влияние катализаторов на термическое разложение перхлората калия и взрывчатые

характеристики составов на его основе. *Вісник Кременчуцького національного університету*. 2013. Т. 82, № 5. С. 103–107.

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

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

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

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

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

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

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

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

235. Fabin M., Skóra P., Polis M., Zakusylo R., Stolarczyk A., Jarosz T. Towards “green” ANFO: Study of perchlorates and inorganic peroxides as potential additives. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 15. P. 5636. URL: https://doi.org/10.3390/molecules28155636.

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

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

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

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

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

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

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

243. Войтенко Ю. І., Закусило Р. В. Про енергетичні матеріали для збільшення потужності зарядів вибухових речовин. *Збірник наукових праць VIII*

Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»,, м. Шостка, 27–29 лист. 2024 р. Суми, 2024. С. 58–61.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

253. Perchlorates and inorganic peroxides as green additives for ANFO / M. Fabin et al. *Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-практичної*

конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», Шостка, 22–24 October 2023. Суми, 2023. P. 42–45.

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

255. Zakusylo D., Sereda V., Zakusylo R. Analysis Of The Prospects For The Application Of Green Pyrotchnics. Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2023. P. 7.

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

257. Zakusylo R. Study of intermediate detonators with a truncated conical shape/ Badanie detonatorów pośrednich o ściętym stożkowym kształcie. *15th International Conference IPOEX 2018 EXPLOSIVES: Research – Application – Safety – Materiały*, Ustroń Zawodzie. Ustroń Zawodzie, 2018. P. 8–9.

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

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

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

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

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

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

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

265. Закусило Д. Р., Закусило Р. В. Ризики логістики емульсійних вибухових речовин в Україні та ЄС. *II international sci-en.-tech conference «problems of geoengineering and underground urbanistic»*, м. Київ, 16–17 трав. 2019 р. Київ, 2019.

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

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

268. Закусило Р. В. Логистические и правовые аспекты перехода Украины к стандартам Европейского Союза по перевозке опасных грузов. *Матеріали II*

Міжнародної науково–технічної інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі», м. Кривий Ріг. Кривий Ріг, 2017. С. 199.

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

270. Комаров В. В., Закусило Р. В., Проценко О. М. Модифікація кристалів при ізогідричній кристалізації. *Матеріали IV науково – технічної конференції «проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки».*, м. Київ. Київ, 2013. С. 150–151.

271. Романченко А. М., Закусило Р. В. Використання конверсійних ВР в якості сенсибілізатора піротехнічних складів. *Збірник матеріалів Міжнародної міждисциплінарної наукової конференції «Science and Scientists»*, м. Дніпропетровськ. Дніпропетровськ, 2015. С. 275–278.

272. Романченко А. М., Закусило Р. В. Вплив дисперсності ПХК на вибухові характеристики піротехнічного складу. *Матеріали VII Міжнародної науково–технічної конференції «Хімія і сучасні технології»*, м. Дніпропетровськ. Дніпропетровськ, 2015. С. 80.

Додаток 1

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі октогену.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
$C_4H_8N_8O_8$	1	187.9	18.4	250	0.105	-0.00008
O_2	2	0				
Речовини у правій частині рівняння	**Кількість молів**	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	4	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	4	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
N_2	4	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-2353.5	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-2043.44	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				0.04656	-2.604E-08	-0.0248

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-2353.5	-13.87488	0.00115623	-8.32E-05	-2367.3738

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298 ln298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-2043.44	2367.373807	79.0464885	-0.001156	-4.161E-05	402.9790976
						$\Sigma/298$
Константа I						1.352278851

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-2367.373807	-0.04656	1.302E-08	0.0124	1.3522789

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-2367.374	-49.338	0.001	0.000	270.456	-2146.255
500	-2367.374	-144.676	0.003	0.000	676.139	-1835.907
800	-2367.374	-248.988	0.008	0.000	1081.823	-1534.531
1100	-2367.374	-358.669	0.016	0.000	1487.507	-1238.520
1400	-2367.374	-472.208	0.026	0.000	1893.190	-946.366
1700	-2367.374	-588.763	0.038	0.000	2298.874	-657.225
2000	-2367.374	-707.796	0.052	0.000	2704.558	-370.560
2300	-2367.374	-828.932	0.069	0.000	3110.241	-85.996
2600	-2367.374	-951.896	0.088	0.000	3515.925	196.744
2900	-2367.374	-1076.474	0.109	0.000	3921.609	477.870
3200	-2367.374	-1202.500	0.133	0.000	4327.292	757.551

Теплоємності

Температура, К	C4H8N8O8	O2	CO2	H2O	N2
200	250.021	0.000	44.142	30.002	0.000
500	250.052	0.000	44.144	30.005	0.000
800	250.084	0.000	44.147	30.009	0.000
1100	250.115	0.000	44.150	30.012	0.000
1400	250.147	0.000	44.153	30.015	0.000
1700	250.178	0.000	44.155	30.018	0.000
2000	250.210	0.000	44.158	30.021	0.000
2300	250.241	0.000	44.161	30.025	0.000
2600	250.273	0.000	44.164	30.028	0.000
2900	250.304	0.000	44.166	30.031	0.000
3200	250.336	0.000	44.169	30.034	0.000

Додаток 2

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі октогену та алюмінієвої пудри ПАП-2.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
$C_4H_8N_8O_8$	1	187.9	18.4	250	0.105	-0.00008
O_2	5	0				
Al	2	0				
Речовини у правій частині рівняння	**Кількість молів**	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	4	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	4	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
Al_2O_3	2	1675	1660	114.56	0.013	-0.000034
N_2	4	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-5703.5	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-5363.44	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				0.27568	-4E-11	-0.0316

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-5703.5	-82.15264	1.7761E-06	-0.000106	-5785.6527

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298\ln298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-5363.44	5785.652744	468.03127	-1.78E-06	-5.302E-05	890.2439597
						$\Sigma/298$
Константа I						2.987395838

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-5785.652744	-0.27568	2E-11	0.0158	2.9873958

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
100	-5785.653	-126.955	0.000	0.000	298.740	-5613.868
3000	-5785.653	-6621.586	0.000	0.000	8962.188	-3445.051
6000	-5785.653	-14389.693	0.001	0.000	17924.375	-2250.970
6000	-5785.653	-14389.693	0.001	0.000	17924.375	-2250.970
8000	-5785.653	-19820.723	0.001	0.000	23899.167	-1707.208
10000	-5785.653	-25391.066	0.002	0.000	29873.958	-1302.759
12000	-5785.653	-31072.428	0.003	0.000	35848.750	-1009.328
14000	-5785.653	-36846.114	0.004	0.000	41823.542	-808.221
16000	-5785.653	-42698.836	0.005	0.000	47798.333	-686.150
18000	-5785.653	-48620.658	0.006	0.000	53773.125	-633.179
20000	-5785.653	-54603.869	0.008	0.000	59747.917	-641.597

Теплоємності

Температура, К	C4H8N8O8	O2	CO2	H2O	Al2O3
100	250.010	0.000	44.140	30.001	114.561
3000	250.315	0.000	44.167	30.032	114.599
6000	250.630	0.000	44.194	30.064	114.638
6000	250.630	0.000	44.194	30.064	114.638
8000	250.840	0.000	44.212	30.086	114.664
10000	251.050	0.000	44.230	30.107	114.690
12000	251.260	0.000	44.248	30.128	114.716
14000	251.470	0.000	44.267	30.150	114.742
16000	251.680	0.000	44.285	30.171	114.768
18000	251.890	0.000	44.303	30.193	114.794
20000	252.100	0.000	44.321	30.214	114.820

Додаток 3

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі перекису водню та гліцерину.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
H_2O_2	7	187.8	120.4	89.33	0.033	-0.00002
$C_3H_8O_3$	1	669.6	608.1	218.9	0.201	-0.00025
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	3	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	11	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-1856.57	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-1580.28	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				-0.38179	-2.872E-07	0.01704

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-1856.57	113.77342	0.01275137	5.718E-05	-1742.7838

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298ln298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-1580.28	1742.783771	-648.17781	-0.012751	2.859E-05	-485.6867613
						$\Sigma/298$
Константа I						-1.629821347

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-1742.783771	0.38179	1.4359E-07	-0.00852	-1.6298213

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-1742.784	404.569	0.006	0.000	-325.964	-1664.173
400	-1742.784	914.992	0.023	0.000	-651.929	-1479.697
600	-1742.784	1465.370	0.052	0.000	-977.893	-1255.255
800	-1742.784	2041.694	0.092	0.000	-1303.857	-1004.855
1000	-1742.784	2637.312	0.144	0.000	-1629.821	-735.150
1200	-1742.784	3248.305	0.207	0.000	-1955.786	-450.058
1400	-1742.784	3872.083	0.281	0.000	-2281.750	-152.169
1600	-1742.784	4506.807	0.368	0.000	-2607.714	156.677
1800	-1742.784	5151.101	0.465	0.000	-2933.678	475.104
2000	-1742.784	5803.897	0.574	0.000	-3259.643	802.045
2200	-1742.784	6464.341	0.695	0.000	-3585.607	1136.646

Теплоємності

Температура, К	H2O2	C3H8O3	CO2	H2O	0
200	89.337	218.940	44.142	30.002	0.000
400	89.343	218.980	44.144	30.004	0.000
600	89.350	219.021	44.145	30.006	0.000
800	89.356	219.061	44.147	30.009	0.000
1000	89.363	219.101	44.149	30.011	0.000
1200	89.370	219.141	44.151	30.013	0.000
1400	89.376	219.181	44.153	30.015	0.000
1600	89.383	219.222	44.154	30.017	0.000
1800	89.389	219.262	44.156	30.019	0.000
2000	89.396	219.302	44.158	30.021	0.000
2200	89.403	219.342	44.160	30.024	0.000

Додаток 4

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі перекису водню, гліцерину та нітрату натрію.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
H_2O_2	2	187.8	120.4	89.33	0.033	-0.00002
$C_3H_8O_3$	1	669.6	608.1	218.9	0.201	-0.00025
$NaNO_3$	2	466.5	431.8	25.69	0.22594	
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	3	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	6	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
Na_2O	1	430.6	409.4	65.69	0.02259	
N_2	1	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-1083.97	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-800.08	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				-0.07083	-6.05E-07	0.00539

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-1083.97	21.10734	0.02686188	1.809E-05	-1062.8358

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298 ln298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-800.08	1062.83578	-120.250489	-0.026862	9.044E-06	142.478438
						$\Sigma/298$
Константа I						0.478115564

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-1062.83578	0.07083	3.0249E-07	-0.002695	0.4781156

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-1062.836	75.056	0.012	0.000	95.623	-892.145
300	-1062.836	121.200	0.027	0.000	143.435	-798.174
400	-1062.836	169.750	0.048	0.000	191.246	-701.791
500	-1062.836	220.090	0.076	0.000	239.058	-603.612
600	-1062.836	271.857	0.109	0.000	286.869	-504.001
700	-1062.836	324.809	0.148	0.000	334.681	-403.198
800	-1062.836	378.777	0.194	0.000	382.492	-301.373
900	-1062.836	433.632	0.245	0.000	430.304	-198.655
1000	-1062.836	489.276	0.302	0.000	478.116	-95.141
1100	-1062.836	545.630	0.366	0.000	525.927	9.087
1200	-1062.836	602.628	0.436	0.000	573.739	113.967

Теплоємності

Температура, К	H2O2	C3H8O3	CO2	H2O	Na2O
200	89.337	218.940	44.142	30.002	65.695
300	89.340	218.960	44.143	30.003	65.697
400	89.343	218.980	44.144	30.004	65.699
500	89.346	219.000	44.144	30.005	65.701
600	89.350	219.021	44.145	30.006	65.704
700	89.353	219.041	44.146	30.007	65.706
800	89.356	219.061	44.147	30.009	65.708
900	89.360	219.081	44.148	30.010	65.710
1000	89.363	219.101	44.149	30.011	65.713
1100	89.366	219.121	44.150	30.012	65.715
1200	89.370	219.141	44.151	30.013	65.717

Додаток 5

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі перекису водню, гліцерину та нітрату калію.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
H_2O_2	2	187.8	120.4	89.33	0.033	-0.00002
$C_3H_8O_3$	1	669.6	608.1	218.9	0.201	-0.00025
KNO_3	2	494.5	493.2	60.88	0.11883	
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	3	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	6	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
K_2O	1	363.2	322.1	83.7		
N_2	1	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-960.57	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-589.98	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				-0.1232	-4.133E-07	0.00539

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-960.57	36.7136	0.01835312	1.809E-05	-923.83803

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298 \ln 298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-589.98	923.8380288	-209.160811	-0.018353	9.044E-06	124.6788733
						$\Sigma/298$
Константа I						0.418385481

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-923.8380288	0.1232	2.0667E-07	-0.002695	0.4183855

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-923.838	130.551	0.008	0.000	83.677	-709.602
300	-923.838	210.812	0.019	0.000	125.516	-587.492
400	-923.838	295.259	0.033	0.000	167.354	-461.191
500	-923.838	382.820	0.052	0.000	209.193	-331.774
600	-923.838	472.861	0.074	0.000	251.031	-199.871
700	-923.838	564.965	0.101	0.000	292.870	-65.902
800	-923.838	658.835	0.132	0.000	334.708	69.838
900	-923.838	754.250	0.167	0.000	376.547	207.126
1000	-923.838	851.035	0.207	0.000	418.385	345.790
1100	-923.838	949.055	0.250	0.000	460.224	485.691

1200	-923.838	1048.197	0.298	0.000	502.063	626.719

Теплоємності

Температура, К	H2O2	C3H8O3	CO2	H2O	K2O
200	89.337	218.940	44.142	30.002	83.700
300	89.340	218.960	44.143	30.003	83.700
400	89.343	218.980	44.144	30.004	83.700
500	89.346	219.000	44.144	30.005	83.700
600	89.350	219.021	44.145	30.006	83.700
700	89.353	219.041	44.146	30.007	83.700
800	89.356	219.061	44.147	30.009	83.700
900	89.360	219.081	44.148	30.010	83.700
1000	89.363	219.101	44.149	30.011	83.700
1100	89.366	219.121	44.150	30.012	83.700
1200	89.370	219.141	44.151	30.013	83.700

Додаток 6

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі перекису водню, гліцерину та нітрату кальцію.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
H_2O_2	2	187.8	120.4	89.33	0.033	-0.00002
$C_3H_8O_3$	1	669.6	608.1	218.9	0.201	-0.00025
$Ca(NO_3)_2$	1	937.2	742	122.9	0.154	-0.0001728
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	3	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	6	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
CaO	1	635.5	604.2	49.63	0.00452	-0.0000625
N_2	1	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-1284.67	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-1116.48	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				-0.15841	-3.252E-07	0.01642

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-1284.67	47.20618	0.01443775	5.51E-05	-1237.4493

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298 \ln 298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-1116.48	1237.449327	-268.938021	-0.014438	2.755E-05	-147.9831037
						$\Sigma/298$
Константа I						-0.496587596

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-1237.449327	0.15841	1.6258E-07	-0.00821	-0.4965876

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-1237.449	167.861	0.007	0.000	-99.318	-1168.899
400	-1237.449	379.643	0.026	0.000	-198.635	-1056.415
600	-1237.449	608.003	0.059	0.000	-297.953	-927.341
800	-1237.449	847.127	0.104	0.000	-397.270	-787.488
1000	-1237.449	1094.258	0.163	0.000	-496.588	-639.617
1200	-1237.449	1347.767	0.234	0.000	-595.905	-485.353
1400	-1237.449	1606.581	0.319	0.000	-695.223	-325.772
1600	-1237.449	1869.937	0.416	0.000	-794.540	-161.636
1800	-1237.449	2137.264	0.527	0.000	-893.858	6.484

2000	-1237.449	2408.118	0.650	0.000	-993.175	178.144
2200	-1237.449	2682.145	0.787	0.000	-1092.493	352.990

Теплоємності

Температура, К	H2O2	C3H8O3	CO2	H2O	CaO
200	89.337	218.940	44.142	30.002	49.631
400	89.343	218.980	44.144	30.004	49.632
600	89.350	219.021	44.145	30.006	49.633
800	89.356	219.061	44.147	30.009	49.634
1000	89.363	219.101	44.149	30.011	49.635
1200	89.370	219.141	44.151	30.013	49.635
1400	89.376	219.181	44.153	30.015	49.636
1600	89.383	219.222	44.154	30.017	49.637
1800	89.389	219.262	44.156	30.019	49.638
2000	89.396	219.302	44.158	30.021	49.639
2200	89.403	219.342	44.160	30.024	49.640

Додаток 7

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі аміачної селітри та нітрометану.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CH_3NO_2	2	112.6	14.4	106.6	0.085	-0.00007
$N_2H_4O_3$	3	365.7	184	139.4	0.049	-0.00005
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	2	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	9	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
N_2	4	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-1641.28	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-1749.32	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				-0.27312	-2.026E-07	0.01491

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-1641.28	81.38976	0.00899673	5.003E-05	-1559.8812

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298 \ln 298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-1749.32	1559.881193	-463.685072	-0.008997	2.502E-05	-653.13285
						$\Sigma/298$
Константа I						-2.191720973

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-1559.881193	0.27312	1.0131E-07	-0.007455	-2.191721

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-1559.881	289.415	0.004	0.000	-438.344	-1708.806
900	-1559.881	1672.083	0.082	0.000	-1972.549	-1860.265
1600	-1559.881	3224.022	0.259	0.000	-3506.754	-1842.354
2300	-1559.881	4862.500	0.536	0.000	-5040.958	-1737.804
3000	-1559.881	6560.097	0.912	0.000	-6575.163	-1574.035
3700	-1559.881	8302.719	1.387	0.000	-8109.368	-1365.143
4400	-1559.881	10081.729	1.961	0.000	-9643.572	-1119.764
5100	-1559.881	11891.284	2.635	0.000	-11177.777	-843.739

5800	-1559.881	13727.163	3.408	0.000	-12711.982	-541.292
6500	-1559.881	15586.173	4.280	0.000	-14246.186	-215.614
7200	-1559.881	17465.811	5.252	0.000	-15780.391	130.791

Теплоємності

Температура, К	CH3NO2	N2H4O3	CO2	H2O	N2
200	106.617	139.410	44.142	30.002	0.000
900	106.676	139.444	44.148	30.010	0.000
1600	106.736	139.478	44.154	30.017	0.000
2300	106.795	139.513	44.161	30.025	0.000
3000	106.855	139.547	44.167	30.032	0.000
3700	106.914	139.581	44.173	30.040	0.000
4400	106.974	139.616	44.180	30.047	0.000
5100	107.033	139.650	44.186	30.055	0.000
5800	107.093	139.684	44.192	30.062	0.000
6500	107.152	139.718	44.199	30.070	0.000
7200	107.212	139.753	44.205	30.077	0.000

Додаток 8

Розрахунки Енергії Гіббса для вибухового складу на основі перхлорату калію та нітрометану.

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CH_3NO_2	2	112.6	14.4	106.6	0.085	-0.00007
$KClO_4$	2	430.1	300.4	112.4		
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	2	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	9	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
K_2O	1	363.2	322.1	83.7		
ClO_2	2	104.6	122.3	48.28	0.00753	-0.0000774

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-2450.58	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-2267.22	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				0.10054	-4.056E-08	-0.01557

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-2450.58	-29.96092	0.00180095	-5.22E-05	-2480.5392

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298 ln298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-2267.22	2480.539171	170.690162	-0.001801	-2.612E-05	384.0075064
						$\Sigma/298$
Константа I						1.288615793

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-2480.539171	-0.10054	2.028E-08	0.007785	1.2886158

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-2480.539	-106.539	0.001	0.000	257.723	-2329.354
900	-2480.539	-615.521	0.016	0.000	1159.754	-1936.290
1600	-2480.539	-1186.816	0.052	0.000	2061.785	-1605.518
2300	-2480.539	-1789.967	0.107	0.000	2963.816	-1306.582
3000	-2480.539	-2414.881	0.183	0.000	3865.847	-1029.390
3700	-2480.539	-3056.368	0.278	0.000	4767.878	-768.751
4400	-2480.539	-3711.251	0.393	0.000	5669.909	-521.488
5100	-2480.539	-4377.379	0.527	0.000	6571.941	-285.450
5800	-2480.539	-5053.196	0.682	0.000	7473.972	-59.082
6500	-2480.539	-5737.529	0.857	0.000	8376.003	158.792
7200	-2480.539	-6429.455	1.051	0.000	9278.034	369.091

Теплоємності

Температура, К	CH3NO2	KClO4	CO2	H2O	K2O
200	106.617	112.400	44.142	30.002	83.700
900	106.676	112.400	44.148	30.010	83.700
1600	106.736	112.400	44.154	30.017	83.700
2300	106.795	112.400	44.161	30.025	83.700
3000	106.855	112.400	44.167	30.032	83.700
3700	106.914	112.400	44.173	30.040	83.700
4400	106.974	112.400	44.180	30.047	83.700
5100	107.033	112.400	44.186	30.055	83.700
5800	107.093	112.400	44.192	30.062	83.700
6500	107.152	112.400	44.199	30.070	83.700
7200	107.212	112.400	44.205	30.077	83.700

Додаток 9

Розрахунки Енергії Гіббса для ЕВР «Азнітро».

Енергія Гіббса хімічних реакцій

Вихідні дані

Речовини у лівій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
$C_2H_8N_2$	2	50.6	35.2	89.76	0.075	-0.00006
$N_2H_4O_3$	3	365.7	184	139.4	0.049	-0.00005
Речовини у правій частині рівняння	Кількість молів	$(-\Delta H^o_{298})$	$(-\Delta G^o_{298})$	a	b	c
CO_2	2	393.51	329.86	44.14	0.00904	-0.0000853
H_2O	20	241.84	185.6	30	0.0107	0.0000033
N_2	1	0				

Проміжні результати розрахунку

		ΔH^o_{298}				
Ентальпія реакції при 298		-4425.52	ΔG^o_{298}			
Зміна енергії Гіббса			-3749.32	Δa	Δb	Δc
Зміна коефіцієнтів теплоємності				0.09056	-6.492E-08	0.01654

	ΔH^o_{298}	$-\Delta a298$	$-0{,}5\Delta b298^2$	$\Delta c298^{-1}$	ΔHo
Константа ΔH^o	-4425.52	-26.98688	0.00288258	5.55E-05	-4452.5039

	ΔG^o_{298}	$-\Delta Ho$	$\Delta a298ln298$	$0{,}5\Delta b298^2$	$0{,}5\Delta c298^{-1}$	Σ
	-3749.32	4452.503942	153.746778	-0.002883	2.775E-05	856.9278654
						$\Sigma/298$
Константа I						2.875596864

	$-\Delta Ho$	$-\Delta a$	$-0{,}5\ \Delta b$	$-0{,}5\ \Delta c$	I
Коефіцієнти підсумкового рівняння	-4452.503942	-0.09056	3.246E-08	-0.00827	2.8755969

Остаточні результати розрахунку

Температура, К	$-\Delta Ho$	$-\Delta aTlnT$	$-0{,}5\ \Delta bT^2$	$-0{,}5\ \Delta cT^{-1}$	IT	Енергія Гіббса
200	-4452.504	-95.963	0.001	0.000	575.119	-3973.346
500	-4452.504	-281.397	0.008	0.000	1437.798	-3296.095
800	-4452.504	-484.287	0.021	0.000	2300.477	-2636.292
1100	-4452.504	-697.617	0.039	0.000	3163.157	-1986.925
1400	-4452.504	-918.452	0.064	0.000	4025.836	-1345.057
1700	-4452.504	-1145.154	0.094	0.000	4888.515	-709.049
2000	-4452.504	-1376.675	0.130	0.000	5751.194	-77.856
2300	-4452.504	-1612.288	0.172	0.000	6613.873	549.253
2600	-4452.504	-1851.453	0.219	0.000	7476.552	1172.814
2900	-4452.504	-2093.761	0.273	0.000	8339.231	1793.239
3200	-4452.504	-2338.884	0.332	0.000	9201.910	2410.854

Теплоємності

Температура, К	C2H8N2	N2H4O3	CO2	H2O	N2
200	89.775	139.410	44.142	30.002	0.000
500	89.797	139.424	44.144	30.005	0.000
800	89.820	139.439	44.147	30.009	0.000
1100	89.842	139.454	44.150	30.012	0.000
1400	89.865	139.469	44.153	30.015	0.000
1700	89.887	139.483	44.155	30.018	0.000
2000	89.910	139.498	44.158	30.021	0.000
2300	89.932	139.513	44.161	30.025	0.000
2600	89.955	139.527	44.164	30.028	0.000
2900	89.977	139.542	44.166	30.031	0.000
3200	90.000	139.557	44.169	30.034	0.000

Додаток 10

Система ініціювання неелектрична «ХВИЛЯ». Технічні умови. Титульна сторінка.

ДКПП 22.29.29-10.00 УКНД 71.100.30

ПОГОДЖЕНО

Директор Шосткинського інституту
Сумського державного університету
к.ф.н.

Н.О.Тугай

СИСТЕМА ІНІЦІЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНА
«ХВИЛЯ»
Технічні умови
ПРОЕКТ
(Введено вперше)
Термін введення 2024

ПОГОДЖЕНО
Державна служба України з питань праці
Лист № _____
від _____

ПОГОДЖЕНО
Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України
Лист № _____
від _____

ПОГОДЖЕНО
Заступник головного державного санітарного лікаря
Лист № _____
від _____

ПОГОДЖЕНО
Організація-експерт
Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки і охороні праці
Лист _____
від _____

РОЗРОБЛЕНО
Заст. директора ШІ СумДУ
з наукової роботи, к.т.н., доцент

Р.В.Закусило

Професор кафедри геоінженерії НТУУ КПІ ім. Сікорського, д.т.н., проф.

В.Г.Кравець

Додаток 11

Директивний технологічний процес ДТП 24020192.06300.00005 виробництва по збиранню системи ініціювання неелектричної «Хвиля» на дільниці ПрАТ «Інтервибухпром». Титульна сторінка.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Шосткинського Інституту СумДУ

Н.О.Тугай

ДИРЕКТИВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

ДТП 24020192.06300.00005

виробництва по збиранню системи ініціювання неелектричної «Хвиля» на дільниці ПрАТ «Інтервибухпром»

Заступник директора з наукової роботи

Р.В.Закусило

Завідувач секції процесів та обладнання хімічних виробництв

В.В.Банишевський

Шостка, 2023

Додаток 12

План проведення спільних робіт з дослідження характеристик сумішей тринітротолуолу з нітрометаном і конусних проміжних детонаторів.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Шосткинського інституту СумДУ
Тугай Н.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний інженер
ШКЗ «Імпульс»
Сафронов А.Р.

ПЛАН
проведення спільних робіт з дослідження характеристик сумішей тринітротолуолу з нітрометаном і конусних проміжних детонаторів

1. Визначити критичний діаметр детонації сумішей тринітротолуол:нітрометан в співвідношенні 90:10; 85:15; 80:20; 75:25.
2. Визначити швидкість детонації сумішей, представлених в п.1.
3. Дослідити вплив конусних проміжних детонаторів на пробиття металевої пластини свідка (чотири випробування)
4. Оболонки конусних проміжних детонаторів з кутом конусності від 15° до 45° готує ШИ Сум ГУ.
5. Паперові конуси і циліндри для визначення критичного діаметра детонації і швидкості детонації готує ШІ СумДУ.
6. Нітрометан поставляє ШІ СумДУ і заливає в тринітротолуол для забезпечення необхідного співвідношення компонентів.

Роботи проводяться на вибуховий майданчику ШКЗ «Імпульс».

Для виконання робіт необхідно 1000 грамів дисперсного чешуйованого тринітротолуолу, 8 електродетонаторів ЕД-8 і 8 метрів детонуючого шнура ДШЕ-8 або іншої марки.

Прошу допустити до виконання робіт на вибуховий майданчику ШКЗ «Імпульс»:

Закусило Романа Васильовича - заст. директора з наукової роботи ШІ СумДУ, к.т.н.,

Закусило Василя Романовича - консультанта, к.т.н., с.н.с.

Відповідальні виконавці:

від ШІ СумДУ
Заст. директора з наукової роботи
Закусило Р.В.

від ШКЗ «Імпульс»
Головний технолог
Войноренко М.Г.

Додаток 13

Акт Дослідження характеристик сумішей тринітротолуолу з нітрометаном та роботоздатності конічних проміжних детонаторі складу тринітротолуол – нітрометан.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Шосткинського Інституту СумДУ

Тугай Н.О.

«____» _____ 2018

ЗАТВЕРЖДУЮ

Головний інженер ШКЗ «Імпульс»

Сафронов А.Р.

«____» _____ 2018

А К Т

Дослідження характеристик сумішей тринітротолуолу з нітрометаном та роботоздатності конічних проміжних детонаторі складу тринітротолуол - нітрометан

м. Шостка, Сумської області від 18 липня 2018 р.

Дослідження проводили:

Від ШІ СумДУ

Закусило Р.В. - заст. директора з наукової роботи

Від ШКЗ «Імпульс»

Войноренко М.Г. – головний технолог

Афанасьєв В.Ф. – начальник випробувальної станції

Підстава : План проведення спільних робіт від 3.07.2018 р.

План проведення спільних робіт від 17.07.2018 р.

Додаток 14

Акт № 1 впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у ТОВ «Азінтерпартлайиш», м. Баку, Республіка Азербайджан

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI
AZİNTERPARTLAYIŞ-X
MƏHDUD MƏSULİYYƏTLİ CƏMİYYƏTİ

AZERBAİJAN REPUBLİC
AZİNTERPARTLAYİSH-X
LİMİTED LİABLİTY COMPANY

Ünvan: Nəcəf Nəriman küçəsi, 5a
Tel. (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
Elektron ünvan: info@azinterpartlayish.com
Web səhifəsi: www.azinterpartlayish.com

VÖEN:1001709311

Adress: Najaf Nariman Street, 5a
Phone : (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
E-mail:info@azinterpartlayish.com
Web site: www.azinterpartlayish.com

№ 212/24 «26» noyabr 2024 il.

АСТ № 1

Implementation of Roman Zakusylo's doctoral thesis results for the degree of Doctor of Technical Sciences at PLC Azinterpartlayish in Baku, Republic of Azerbaijan

The results of the doctoral thesis by Roman Zakusylo, dedicated to the scientific foundations of low-speed detonation processes in open-pit mining, have practical value and are used for conducting open-pit blasting operations at PLC Azinterpartlayish.

The proposed intermediate detonators of local production from an explosive mixture of ammonium nitrate and nitromethane in a ratio of 85:15 with a taper angle from 15° to 45° have undergone a series of tests in open-pit mines of the Republic of Azerbaijan and effectively used by specialists of PLC Azinterpartlayish to initiate borehole charges of industrial explosives during mineral extraction. Intermediate detonators developed by Roman Zakusylo significantly increase the safety of blasting operations in open-pit mineral deposits and non-metallic quarries.

"Azinterpartlayish-X" LLC

Director: **Azer Shukurov**

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI
AZİNTERPARTLAYIŞ-X
MƏHDUD MƏSULİYYƏTLİ CƏMİYYƏTİ

AZERBAİJAN REPUBLİC
AZİNTERPARTLAYİSH-X
LİMİTED LİABLİTY COMPANY

Ünvan: Nəcəf Nəriman küçəsi, 5a
Tel. (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
Elektron ünvan: info@azinterpartlayish.com
Web səhifəsi: www.azinterpartlayish.com

VÖEN:1001709311

Adress: Najaf Nariman Street, 5a
Phone : (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
E-mail:info@azinterpartlayish.com
Web site: www.azinterpartlayish.com

№ 213/24 «26» noyabr 2024 il.

АКТ № 1

впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у ТОВ «Азінтерпартлайиш», м. Баку, Республіка Азербайджан

Результати дисертаційної роботи Р.В. Закусило, присвяченої науковим основам низькошвидкісних процесів детонації при відкритих гірничих роботах, мають практичну цінність і використовуються для проведення відкритих вибухових робіт у ТОВ «Азінтерпартлайиш».

Запропоновані Закусило Р.В. проміжні детонатори місцевого приготування з вибухової суміші аміачної селітри та нітрометану у співвідношенні 85:15 з кутом конусності від 15° до 45° пройшли низку випробувань на відкритих гірничих кар'єрах Республіки Азербайджан та ефективно використовуються фахівцями ТОВ «Азінтерпартлайиш» для ініціювання свердловинних зарядів промислових вибухових речовин при видобутку корисних копалин. Використання розроблених Закусило Р.В. проміжних детонаторів помітно підвищує безпеку вибухових робіт на відкритих родовищах корисних копалин та нерудних кар'єрах.

ТОВ "Азінтерпартлайш-Х".

Директор: **Азер Шукуров**

Додаток 15

УЗГОДЖЕНО

Директор ООО «D M Servis»

Заур Годжаев

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Шосткинського Інституту СумДУ

Н.О.Тугай

ДИРЕКТИВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

виробництва емульсійної вибухової речовини Геоніт (HANFO)

та сумішевої вибухової речовини, гранулита Ігданіт (ANFO)

Заступник директора з наукової роботи

Р.В.Закусило

Завідувач секції процесів та обладнання хімічних виробництв

В.В.Банишевський

Шостка, 2021

Додаток 16

Акт № 2 впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у ТОВ «Азінтерпартлайиш», м. Баку, Республіка Азербайджан

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI
AZİNTERPARTLAYIŞ-X
MƏHDUD MƏSULİYYƏTLİ CƏMİYYƏTİ

AZERBAİJAN REPUBLİC
AZİNTERPARTLAYİSH-X
LİMİTED LİABLİTY COMPANY

Ünvan: Nəcəf Nəriman küçəsi, 5a
Tel. (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
Elektron ünvan: info@azinterpartlayish.com
Web səhifəsi: www.azinterpartlayish.com

VÖEN:1001709311

Adress: Najaf Nariman Street, 5a
Phone : (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
E-mail:info@azinterpartlayish.com
Web site: www.azinterpartlayish.com

№ 211/24 «26» noyabr 2024 il.

АСТ № 2

Implementation of Roman Zakusylo's doctoral thesis results for the degree of Doctor of Technical Sciences at PLC Azinterpartlayish in Baku, Republic of Azerbaijan

The results of the doctoral thesis by Roman Zakusylo, dedicated to the scientific foundations of low-speed detonation processes in open-pit mining, have practical value and are used for conducting open-pit blasting operations at PLC Azinterpartlayish.

Roman Zakusylo, with specialists of PLC Azinterpartlayish, developed the emulsion explosive "Aznitro" of three types, the feature of which is the stability of detonation properties and the power specified for difficult geological conditions. Taking into account the availability and cheapness of raw materials, the absence of individual explosives in the composition of emulsion explosive, the elimination of the problem of transportation and storage of explosive substances, the possibility of mechanizing the emulsion explosives production process with adjustable characteristics and charging operations, in combination with low-speed initiating means, the developed emulsion explosive is able to meet the needs of the republican mining industry.

"Azinterpartlayish-X" LLC

Director: **Azer Shukurov**

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI
AZİNTERPARTLAYIŞ-X
MƏHDUD MƏSULİYYƏTLİ CƏMİYYƏTİ

AZERBAİJAN REPUBLİC
AZİNTERPARTLAYİSH-X
LİMİTED LİABLİTY COMPANY

Ünvan: Nəcəf Nəriman küçəsi, 5a
Tel. (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
Elektron ünvan: info@azinterpartlayish.com
Web səhifəsi: www.azinterpartlayish.com

VÖEN:1001709311

Adress: Najaf Nariman Street, 5a
Phone : (+99412) 436 17 22 / 436 18 34
E-mail:info@azinterpartlayish.com
Web site: www.azinterpartlayish.com

№ 214/24 «26» noyabr 2024 il.

АКТ № 2

впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук у ТОВ «Азінтерпартлайиш», м. Баку, Республіка Азербайджан

Результати дисертаційної роботи Р.В. Закусило, присвяченої науковим основам низькошвидкісних процесів детонації при відкритих гірничих роботах, мають практичну цінність і використовуються для проведення відкритих вибухових робіт у ТОВ «Азінтерпартлайиш».

Закусило Р.В., спільно з фахівцями ТОВ «Азінтерпартлайиш», розроблена емульсійна вибухова речовина ЕВР «Азнітро» трьох типів, особливістю яких є стабільність детонаційних властивостей та задана для складних геологічних умов потужність. Враховуючи доступність і дешевизну сировини, відсутність у складі ЕВР індивідуальних вибухових речовин, ліквідацію проблеми перевезення та зберігання небезпечних речовин, можливості механізації процесу виробництва ЕВР з регульованими характеристиками та зарядних робіт, в комплексі з низькошвидкісними ініціюючими засобами розроблена ЕВР здатна задовольнити потреби республіканського гірництва.

ТОВ "Азінтерпартлайш-Х".

Директор: **Азер Шукуров**

Додаток 17

Директивний технологічний процес ДТП виробництва сферичного анозиту ПОХП.001.000.00.00.00 ДТП

Шосткинський інститут
Сумського державного університету

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ШІ СумДУ

_____ **В.Л.Акуленко**
24.12.2012 р.

ДИРЕКТИВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

виробництва сферичного анозиту

ПОХП.001.000.00.00.00 ДТП

УЗГОДЖЕНО

Зав. кафедрою ШІ СумДУ

_____ **В.В. Банишевський**

Термін перегляду _____

2012 рік

Додаток 18

ДОВІДКА про впровадження результатів дисертаційної роботи Закусила Романа Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ТЕХНОСТАРТ УА»

LIMITED LIABILITY COMPANY «TECHNOSTART UA»

Україна 01024 м. Київ, Печерський р-н, вул. Басейна 5Б, код ЄДПРОУ 45208459 technostartua@gmail.com

вих. №291 від 22.11.2024 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Закусила Романа Васильовича
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Результати дисертаційної роботи Р.В. Закусило, присвяченої низькошвидкісним вибуховим речовинам, що застосовуються у відкритій розробці родовищ корисних копалин, мають практичну цінність і використовуються для отримання сферичних кристалів високоенергетичних матеріалів у ТОВ «Техностарт УА».

Запропонований Закусило Р.В. спосіб отримання кристалів ізогідричним методом дозволяє підвищити можливість отримання прогнозованих за характеристиками високодисперсних високоенергетичних матеріалів заданої округлої форми.

З повагою,
Генеральний директор Анатолій ВАСИЛЬЄВ

УКРАЇНА ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ТЕХНОСТАРТ УА» Ідентифікаційний код 45208459 МІСТО КИЇВ

Додаток 19

Акт проведення контрольних випробувань низькошвидкісних зарядів місцевого виготовлення для відбивання блочного каменю.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ТОВ «Буропідривник»
_____ Овсяник І.М.
«____» _____ 2017 г.

АКТ

проведення контрольних випробувань низькошвидкісних зарядів місцевого виготовлення для відбивання блочного каменю

м. Івано-Франківськ «____» _____2017 р.

Випробування проводили:

Керівник вибухових робіт Білінський В.В., вибуховик Скіба М.М., заст. директора ШІ СумДУ з наукової роботи Закусило Р.В., фахівець ШІ СумДУ Романченко А.М.

Мета роботи:

Визначення якості та надійності відбивання блочного каменю низькошвидкісними зарядами місцевого виготовлення на основі перхлорату калію.

Умови проведення роботи:

Випробування проводили на території ТОВ «Буропідривник» за стандартними методиками.

1. Об’єкт випробувань

Випробуванням піддавалися низькошвидкісні заряди місцевого виготовлення для відбивання блочного каменю на основі перхлорату калію в якості окисника, дизельного палива (нітрометану) - пального і оксиду марганцю (IV) - каталізатора термічного розкладання.

Масова доля компонентів : перхлорат калію - 94,5 % (89,5 %), дизельне паливо - 5 % (нітрометан - 10 %), оксид марганцю (IV) - 0,5 %. Спорядження дослідних зразків робили безпосередньо на кар'єрі.

3. Результати випробувань

3.1. Перевірено запропонований спосіб виготовлення зарядів для відбою блокового каменю безпосередньо на місці проведення вибухових робіт. Усі заряди вище вказаних складів детонували повністю.

3.2. Застосування розроблених зарядів забезпечує збереження властивостей каменю і оптимальний вихід блоків з корисної копалини, яка розробляється.

4. Висновки

4.1. Низькошвидкісні заряди забезпечили «м'який» і якісний відбій каменю.

4.2. Невибухові матеріали тільки після змішування утворюють суміш з вибуховими характеристиками. Це дозволяє виключити перевезення вибухових сумішей від підприємства-виробника спеціальним транспортом по території країни, що пов'язано з безпекою населення, і зменшити кількість складських приміщень, що охороняються.

Підписи:

В.В. Білінський

М.М. Скіба

Р.В. Закусило

А.М. Романченко