

УДК 622.235.24

І.А. Лучко, д.т.н., проф.

А.В. Прокопенко, аспір.

Національний технічний університет України "КПІ"

І.В. Косьмін, інж.

ЗАТ "Техновибух"

А.І. Лучко, інж.

Проектний інститут "Укрспецтунельпроект"

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НОВИХ БЕЗТРОТИЛОВИХ СУМІШЕВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН З НУЛЬОВИМ КИСНЕВИМ БАЛАНСОМ

Наведено кількісні та якісні результати дослідження термодинамічних і детонаційних характеристик безтритилових сумішевих вибухових складів з нульовим кисневим балансом (суміші з аміачної селітри, дизельного палива, порошка залізорудного концентрата та вати кордного волокна).

Досягнення ефективного та якісного дроблення твердої гірської породи є актуальною проблемою відкритого способу розробки корисних копалин, оскільки від якості підготовленої гірничої маси значною мірою залежать техніко-економічні показники екскавації, транспортування та інших процесів гірничого виробництва. На цей час головним джерелом енергії дроблення є енергія вибуху промислових вибухових речовин (ВР). У зв'язку з цим у нашій країні й за кордоном широким фронтом виконуються дослідження щодо розробки нових ВР і методів їх застосування з метою досягнення при цьому високих техніко-економічних показників із забезпеченням технологічної та екологічної безпеки.

Зокрема в [1] розроблено ряд типів промислових ВР для заряджання свердловин з формуванням зарядів у поліетиленові рукави, а саме: полімікси ГР1, комполайти ГС, комполайти ПС й інші. У роботі [2] висвітлено термодинамічні характеристики різновиду комполайтів ПС – тетрамону, у [3] – їх технічна ефективність.

У цій статті розглянемо питання про вибір відсоткового співвідношення компонентів за масою з метою збереження стехіометрії (тобто нульового кисневого балансу) і дослідимо відповідні термодинамічні та детонаційні характеристики вибухових складів: суміші з аміачної селітри; дизельного палива; порошка залізної руди, виготовленого із залізорудного концентрату; вати кордного волокна.

Відомо [4], що максимальне виділення енергії під час вибуху відбувається при нульовому кисневому балансі вибухової суміші. Для досліджуваних складів можна записати першу умову формування нульового кисневого балансу у вигляді:

$$KB_{AC} \cdot m_{AC} + KB_{ДП} \cdot m_{ДП} + KB_{KB} \cdot m_{KB} + KB_{FeO} \cdot m_{FeO} = 0, \quad (1)$$

де  $m_{AC}$ ,  $m_{ДП}$ ,  $m_{KB}$ ,  $m_{FeO}$  – вміст за масою у вибуховому складі відповідно аміачної селітри, дизельного палива, вати кордного волокна та окису заліза;  $KB_{AC}$ ,  $KB_{ДП}$ ,  $KB_{KB}$ ,  $KB_{FeO}$  – кисневий баланс відповідно аміачної селітри, дизельного палива, вати кордного волокна та окису заліза, що міститься в порошку залізорудного концентрату – ЗРК.

Другою умовою формування рецептури ВР з нульовим кисневим балансом є

$$m_{AC} + m_{ДП} + m_{KB} + m_{ЗРК} = 1, \quad (2)$$

де  $m_{ЗРК}$  – масовий вміст порошку ЗРК у вибуховому складі.

Враховуючи, що в складі ЗРК окис заліза  $FeO$  складає приблизно 30 %, і задаючи фіксовані значення  $m_{KB}$  і  $m_{ЗРК}$ , отримуємо систему двох рівнянь відносно  $m_{AC}$  і  $m_{ДП}$ :

$$\begin{aligned} KB_{AC} \cdot m_{AC} + KB_{ДП} \cdot m_{ДП} &= -KB_{KB} \cdot m_{KB} - KB_{FeO} \cdot m_{ЗРК}, \\ m_{AC} + m_{ДП} &= 1 - m_{KB} - m_{ЗРК}. \end{aligned} \quad (3)$$

Розв'язок системи (3) дає рецептуру сумішевої ВР з нульовим кисневим балансом.

Для аналізу було вибрано 32 суміші з нульовим кисневим балансом із зазначенням кількості  $AC$ ,  $ДП$ ,  $KB$ ,  $ЗРК$  в складі ВР, умовної хімічної формули і складу продуктів вибуху.

Розраховані основні термодинамічні параметри досліджуваних сумішевих ВР з  $KB = 0$  при різному масовому співвідношенні вхідних компонент. Слід зазначити, що до основних термодинамічних параметрів ВР належать: теплота вибуху  $Q_v$ , питомий об'єм газів вибуху  $V_0$ ,



температура вибуху  $T$ , питомі теплоємкості при постійному об'ємі  $C_v$  і постійному тиску  $C_p$ , показники адіабаты  $\gamma$  і політропи  $n$  продуктів вибуху (ПВ), початковий тиск ПВ  $P_n$ .

Теплоту вибуху  $Q_v$  згідно з законом Гесса визначають у вигляді різниці між теплотою утворення продуктів вибуху  $\Sigma q_{ПВ}$  і теплотою утворення  $ВР$   $q_{ВР}$ , тобто

$$Q_v = \Sigma q_{ПВ} - q_{ВР}. \quad (4)$$

Складність розрахунків за формулою (4) пов'язана з визначенням справжнього складу  $ПВ$  на момент завершення процесу їх розширення чи будь-якої іншої стадії, за якої визначається тепловий ефект вибуху. Зазвичай вибирають два значення  $Q_v$ , а саме: в момент вибуху після завершення розкладу  $ВР$  (в точці Чепмена-Жуге) – детонаційна теплота вибуху  $Q_d$  і при розширенні газів до атмосферного тиску – фугасна теплота  $Q_f$ . Ці величини не можна розглядати як деякі сталі, що залежать тільки від хімічного складу  $ВР$ .

Детонаційна теплота може залежати від тиску в детонаційній хвилі, який сильно залежить від щільності  $ВР$ , а фугасна теплота – від тиску зовнішнього середовища та газодинамічних умов процесу розширення  $ПВ$ . Найстабільнішою термодинамічною величиною є теплота вибуху  $Q_{max}$ , яка відповідає максимальному тепловому ефекту, можливого під час вибуху певної  $ВР$ . Ця величина є сталою, яка визначається тільки хімічним складом  $ВР$ , не залежить від початкових і кінцевих параметрів стану  $ПВ$  і досягається, якщо утворюються вищі окисли горючих елементів  $ВР$ .

Для розрахунку фугасної теплоти вибуху  $Q_f$  часто використовують принцип Ле-Шательє, згідно з яким кінцевий склад  $ПВ$  на кінець процесу розширення повинен відповідати максимальному об'єму газів  $V_{max}$ . Розрахунок за  $V_{max}$  передбачає таку послідовність витрати кисню: спочатку весь вуглець окислюється до окису, потім рівними частками – на окислення водню до води і окислу вуглецю до його двоокису. На жаль ця методика не враховує вплив охолодження газів у процесі їх розширення на рівноважні реакції, що протікають з виділенням тепла.

Оскільки хімічні реакції вибухового перетворення сумішевих  $ВР$  протікають у режимах детонації (у детонаційній хвилі) і дефлаграції (швидке горіння і вторинні реакції в  $ПВ$ ), відповідно фугасну (фактичну) теплоту вибуху  $Q_f$  можна представити у вигляді суми детонаційної і дефлаграційної  $Q_t$  теплот вибуху:

$$Q_f = Q_d + Q_t. \quad (5)$$

Згідно з рекомендаціями [5] величину фугасної теплоти вибуху  $Q_f$  будемо визначати за усередненим складом  $ПВ$ , отримуваним з розрахунку на максимальну теплоту вибуху (реакції I типу). Детонаційну теплоту вибуху  $Q_d$  будемо розраховувати за формулою [6]:

$$Q_d = Q_{max}[1 - (0,528 - 0,165\rho_0)(1,4 - \alpha_k)^{1,4}], \quad (6)$$

де  $\alpha_k$  – кисневий коефіцієнт,  $\rho_0$  – щільність  $ВР$ . При відомих  $Q_f$  і  $Q_d$  дефлаграційна теплота вибуху  $Q_t$  дорівнює:

$$Q_t = Q_f - Q_d. \quad (7)$$

Оскільки під час вибуху  $ВР$  з нульовим і додатнім  $КБ$  майже повністю утворюються вищі окисли горючих елементів, фактичну (фугасну) теплоту вибуху цих складів можна вважати близькою до  $Q_{max}$ . Тому розрахунки термодинамічних параметрів  $ВР$  з нульовим  $КБ$  автори виконували за реакціями першого типу, тобто на  $Q_{max}$ . Інші термодинамічні параметри визначалися за відомими методиками [4].

Із аналізу зображених на рис. 1 залежностей  $Q_{max} = Q_f = f(КБ)$  випливає, що зі збільшенням відсоткового вмісту кордного волокна в складі сумішевих  $ВР$  і відповідним зменшенням вмісту порошка  $ЗРК$  теплота вибуху лінійно зростає. При цьому зі збільшенням сумарного вмісту  $КБ$  і  $ЗРК$  та відповідним зменшенням сумарного вмісту  $АС$  і  $ДП$  при збереженні для складу умови  $КБ = 0$  максимальна теплота вибуху зменшується. Отже, одне й те ж значення  $Q_{max}$  можна отримати при різних співвідношеннях компонент у суміші. А сама рецептура  $ВР$  може бути підібрана з використанням системи рівнянь (3).

Аналіз розрахункових даних показав, що зі збільшенням сумарного вмісту  $КБ$  і  $ЗРК$  у складі з нульовим кисневим балансом зменшуються абсолютні значення детонаційної  $Q_d$  і дефлаграційної  $Q_t$  теплот вибуху, що є наслідком зменшення максимальної теплоти вибуху  $Q_{max}$  (рис. 1). Зі збільшенням вмісту в суміші кордного волокна  $КБ$  і відповідним зменшенням

вмісту порошку ЗРК значення теплот вибуху  $Q_d$  і  $Q_t$  лінійно зростають. Зі збільшенням сумарного вмісту КВ і ЗРК відношення  $Q_d/Q_{max}$  збільшується (рис. 2, а), а відношення  $Q_t/Q_{max}$  навпаки – зменшується (рис. 2, б), що пов'язується зі збільшенням щільності ВР і зменшенням впливу вторинних хімічних реакцій в ПВ. Зі збільшенням вмісту КВ у складі при одночасному відповідному зменшенні ЗРК доля детонаційної складової зменшується при збільшенні долі дефлаграційної складової (рис. 2).

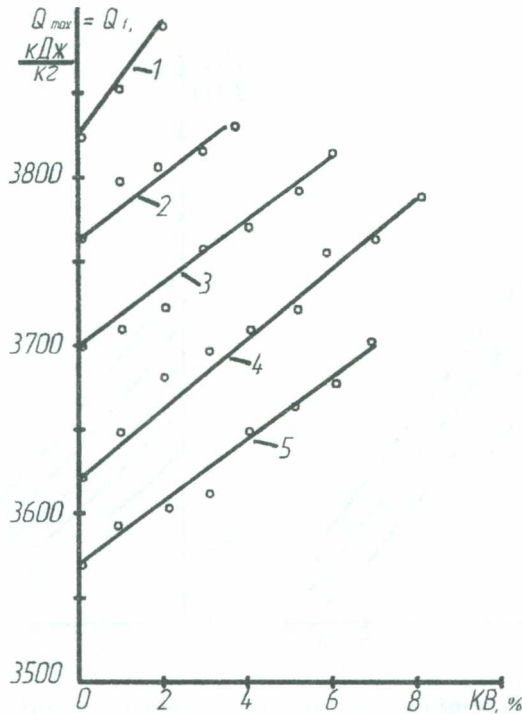


Рис. 1. Залежність теплоти вибуху  $Q_{max} = Q_f$  від вмісту в складі з нульовим кисневим балансом кордного волокна при фіксованих значеннях сумарного вмісту КВ і порошка ЗРК: 1 – КВ + ЗРК = 2%; 2 – КВ + ЗРК = 4%; 3 – КВ+ЗРК=6%; 4 – КВ + ЗРК = 8%; 5 – КВ + ЗРК = 10%

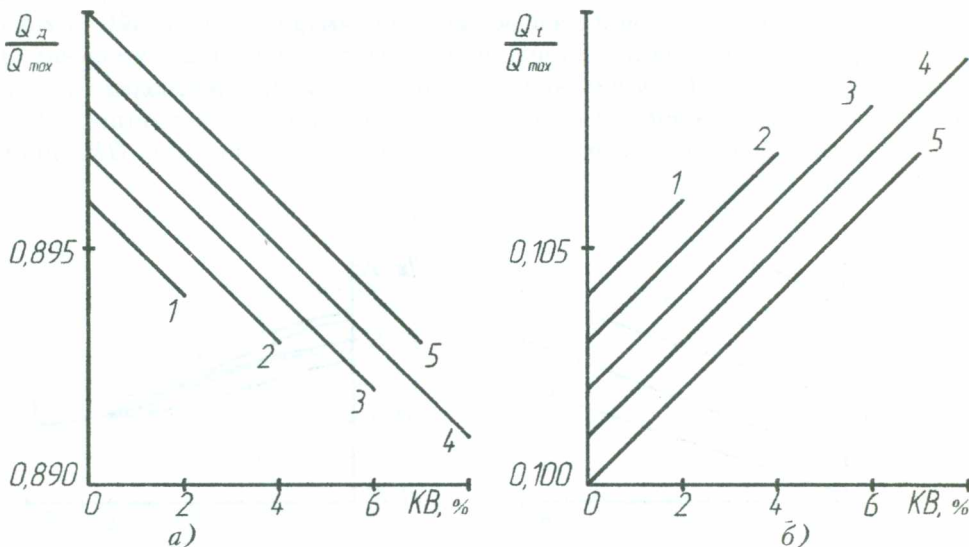


Рис. 2. Залежності відношення детонаційної теплоти  $Q_d$  (а) та дефлаграційної теплоти  $Q_t$  (б) до максимальної теплоти  $Q_{max}$  вибуху від вмісту в суміші КВ при різних фіксованих значеннях сумарного вмісту КВ і ЗРК: 1 – КВ + ЗРК = 2%; 2 – КВ + ЗРК = 4%; 3 – КВ + ЗРК = 6%; 4 – КВ + ЗРК = 8%; 5 – КВ + ЗРК = 10%



Зі збільшенням вмісту кордного волокна у вибуховому сумішевому складі з  $KB = 0$  об'єм газів лінійно зростає, а початковий тиск майже лінійно зменшується. Останній результат однозначно пов'язаний із зменшенням щільності  $BP$  зі збільшенням вмісту  $KB$  при відповідному зменшенні вмісту  $ZPK$ . Зі збільшенням сумарного вмісту  $KB$  і  $ZPK$  об'єм газів вибуху зменшується, а початковий тиск  $ПВ$ , хоч і незначно, але збільшується.

На рис. 3, а зображені залежності швидкості детонації, а на рис. 3, б – тиску детонації вибухових сумішей з  $KB = 0$  від вмісту  $KB$  у їх складі при різних фіксованих значеннях сумарного вмісту  $KB$  і  $ZPK$ .

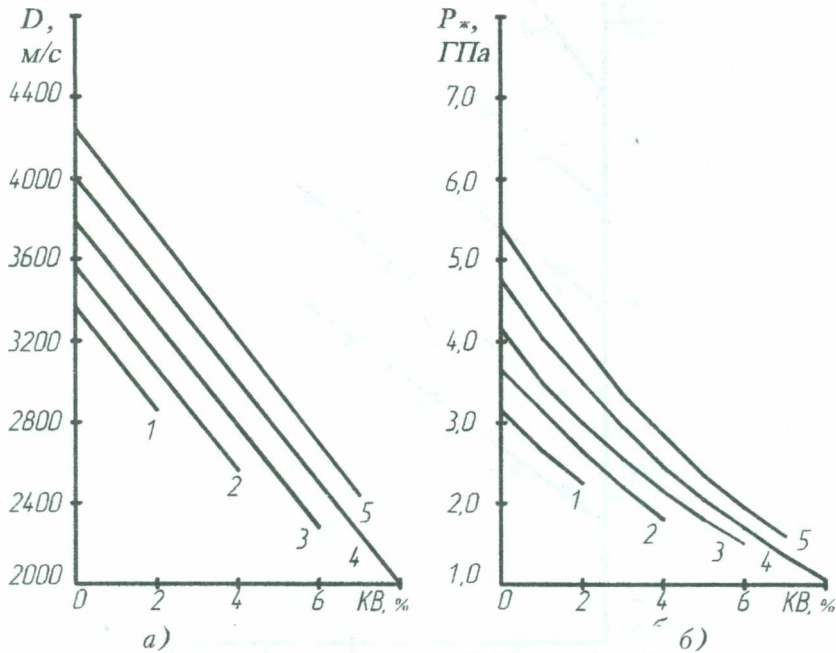


Рис. 3. Залежності швидкості (а) та тиску (б) детонації від вмісту в складі з  $KB = 0$  кордного волокна при різних фіксованих значеннях сумарного вмісту  $KB$  і  $ZPK$ :  
 1 –  $KB + ZPK = 2\%$ ; 2 –  $KB + ZPK = 4\%$ ; 3 –  $KB + ZPK = 6\%$ ; 4 –  $KB + ZPK = 8\%$ ;  
 5 –  $KB + ZPK = 10\%$

Із аналізу наведених залежностей випливає, що збільшення вмісту  $KB$  за рахунок відповідного зменшення вмісту  $ZPK$  викликає зменшення детонаційних параметрів досліджуваних вибухових сумішей з  $KB = 0$ . У той же час збільшення сумарного вмісту  $KB$  і  $ZPK$  призводить до посилення бризантності, тобто детонаційних властивостей цих сумішевих  $BP$ . Отже, збільшення вмісту порошка  $ZPK$  у вибухових сумішевих складах призводить до збільшення їх щільності, зменшення теплоти вибуху та збільшення детонаційних параметрів  $BP$ .

На ідеальну роботу вибуху  $A_{0,5}$ , яка відповідає 50 %-му розширенню  $ПВ$ , вміст  $KB$  і  $ZPK$  впливає слабо (рис. 4).

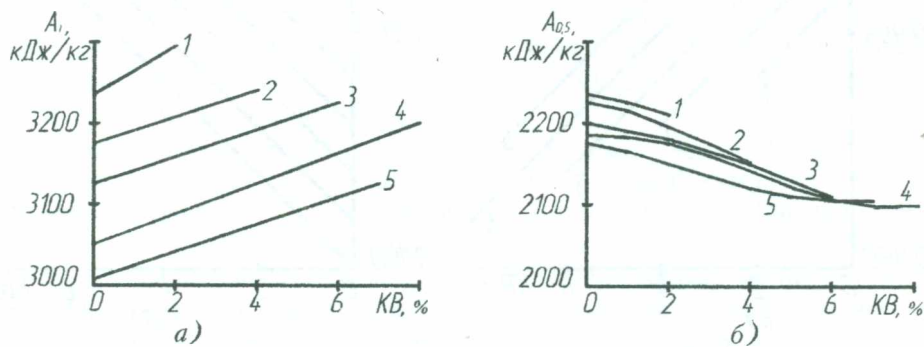


Рис. 4. Залежності ідеальної роботи вибуху  $A_i$  (а) та роботи вибуху при 50%-му розширенні  $ПВ$   $A_{0,5}$  (б) від вмісту в складі з  $KB = 0$  кордного волокна при різних фіксованих значеннях сумарного вмісту  $KB$  і  $ZPK$ : 1 –  $KB + ZPK = 2\%$ ; 2 –  $KB + ZPK = 4\%$ ;  
 3 –  $KB + ZPK = 6\%$ ; 4 –  $KB + ZPK = 8\%$ ; 5 –  $KB + ZPK = 10\%$

Значення  $A_{0,5}$  коливаються в межах 2100...2260 кДж/кг. Таким чином, визначальним є те, що склад має  $KB = 0$ . Повна ідеальна робота вибуху  $A_i$  зі збільшенням вмісту  $KB$  і при відповідному зменшенні вмісту  $ZPK$  зростає, а при збільшенні сумарного вмісту  $KB$  і  $ZPK$  – зменшується. Значення  $A_i$  при цьому змінюються в достатньо вузьких межах: від 3000 до 3290 кДж/кг.

Отже, з використанням системи рівнянь (3) успішно підібрана рецептура  $BP$  стехіометричного складу з планованими властивостями, які визначаються конкретними умовами чи метою застосування того чи іншого вибухового складу.

У подальшому автори планують дослідити рівняння стану газів вибуху досліджуваних сумішевих вибухових речовин і особливості їх взаємодії з ґрунтовими та скельними масивами.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Прокопенко В.С. Физико-технические основы разрушения скальных горных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах // Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Киев: Национальный научно-исследовательский институт охраны труда, 2003. – 36 с.
2. Прокопенко В.С., Косьмін І.В., Лучко А.І. й ін. Термодинамічні характеристики тетрамонів – безтритилових вибухових сумішей // Вісник Національного технічного університету України „КПІ” / Гірництво: Збірник наук. праць. – Київ: НТУУ „КПІ”, ЗАТ „Техновибух”, 2003. – Вип. 8. – С. 65–73.
3. Прокопенко В.С., Косьмін І.В., Лучко А.І. й ін. Технічна ефективність комполайтів – безтритилових вибухових речовин місцевого приготування // Вісник Національного технічного університету України „КПІ” / Гірництво: Збірник наук. праць. – Київ: НТУУ „КПІ”, ЗАТ „Техновибух”, 2003. – Вип. 9. – С. 59–64.
4. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1982. – 358 с.
5. Светлов Б.Я., Солнцева Р.Н., Павлов А.Г. О работоспособности водонаполненных ВВ, содержащих алюминий // Физико-технич. проблемы разраб. полезн. ископаемых. – 1970. – №3. – С. 69–77.
6. Пепекин В.И., Кузнецов Н.М., Лебедев И.А. О взаимосвязи параметров детонации с химическим составом взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 234. – № 1. – С. 105–108.

ЛУЧКО Іван Андрійович – доктор технічних наук, професор кафедри інженерної екології Національного технічного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

– дослідження дії вибуху в ґрунтах і гірських породах.

Тел.: 241-96-32.

ПРОКОПЕНКО Антон Вікторович – аспірант кафедри інженерної екології Національного технічного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

– дослідження дії вибуху нових вибухових речовин з метою вторинного дроблення скельних гірських порід.

КОСЬМІН Ігор Вікторович – інженер ЗАТ „Техновибух”.

Наукові інтереси:

– руйнування скельних гірських порід вибухом.

ЛУЧКО Андрій Іванович – інженер проектного інституту „Укрспецтунельпроект”.

Наукові інтереси:

– деформування ґрунтів і гірських порід дією вибуху;

– застосування вибуху в будівельній справі.