

2. Crystal Chemistry of Dichalcogenides  $MX_2$  /Podberezskaia, N.V, Maharill, S.A., Pervukhina, N.V. and Borisov, S.V. (2001) // Journal of Structural Chemistry –Vol. 42.–no.4.– pp.783-817.

3. Kovalenko, I.L. and Kuprin, V.P.(2010), Reactions of Emulsion explosives and Their Components With Sulphidic Minerals // Vzryvnoe Delo – Moscow: ZAO MVK Po Vzryvnomu Delu pri AHN. - no. 103/60. – pp. 154-170. [in Russian].

3. Kovalenko, I.L. and Kuprin, V.P. (2013) Inhibition of reactions between pyrite and ammonium nitrate based explosives // Suchasni Resursoenergozberihaiuchi Tekhnolohii Hirnychoho Vyrobnystva.– Iss. 1 (11).–pp.84-91 [in Russian].

5.Electrochemistry of Sulphidic Minerals. Electrochemical Processes on a Pyrite's and Pyrrhotine's Surface in Water Solution of Electrolytes / Radyushkina, K.A., Vigdergauz, V. E., Tarasevich, M.R. and Chantury, V.A. (1986) // Elektrokhimiya. – Vol. XXII, no 10. –pp. 1394-1398 [in Russian].

6. Prognosis and Prevention of Spontaneous Ignitions and Explosions of Ammonium Nitrate Based Explosives in the Drilling and Blasting Operations of Non- Kazakhstan's Ferrous Metallurgy (1988).– Iss. 2.–Moscow: Tsentralnyi Nauchno-Issledovatel'skii Institut Tsvetnykh Metallov Ekonomiki i Informatsii.–48 p. [in Russian].

7. Pat 2305674 RU: C 06B 31/38, C06B 25/08 / Abdrakhmanov, I.A., Hazizov, M.F., Ibrahimov, R.A. et al. (2005) [in Russian].

Стаття надійшла 12.05.2014.

УДК 662.217

## ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ НИЗКОПЛОТНОГО ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОГО ЛЕГКИМИ МАЛОПРОЧНЫМИ ГРАНУЛАМИ

**С. А. Горинов, И. Ю. Маслов**

ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша», г. Москва, Россия.

E-mail: akaz2006@yandex.ru; ilmaslov@mail.ru

Показано, что в низкоплотных эмульсионных взрывчатых веществах, полученных при смешении эмульсии со значительным объемом легких малопрочных гранул (в смеси возникает связная гранульно-воздушной система), возбуждение детонации происходит под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления. При этом химическая реакция происходит в форме поверхностного горения частиц эмульсии, взаимодействующих с потоком газа. Установлены аналитические критерии для оценки условий возникновения струйной детонации. Полученные сведения являются полезными с практической точки зрения для обоснования технологии осуществления щадящего взрыва с применением низкоплотных эмульсионных взрывчатых веществ.

**Ключевые слова:** низкоплотные эмульсионные взрывчатые вещества, связная гранульно-воздушная система, высокоэнтальпийный газовый поток, передача детонации струями взрывных газов.

**ОСОБЛИВОСТІ ДЕТОНАЦІЇ НИЗЬКОЩІЛЬНОЇ ЕМУЛЬСІЙНОЇ  
ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ, СЕНСИБІЛІЗОВАНІ ЛЕГКИМИ  
МАЛОМІЦНИМИ ГРАНУЛАМИ**

**С. О. Горинов, І. Ю. Маслов**

ТОВ «Глобал Майнінг Експлозив-Раша», м. Москва, Росія.

E-mail: akaz2006@yandex.ru; ilmaslov@mail.ru

Показано, що в низькощільних емульсійних вибухових речовинах, отриманих при змішуванні емульсії зі значним об'ємом легких маломіцних гранул (у суміші виникає зв'язна гранульно-повітряна система), збудження детонації відбувається під дією високоентальпійного газового потоку, що фільтрується з області високого тиску. При цьому хімічна реакція перебігає у формі поверхневого горіння частинок емульсії, що взаємодіють з потоком газу. Встановлені аналітичні критерії для оцінки умов виникнення струменевої детонації. Отримані дані є корисними з практичної точки зору для обґрунтування технології проведення обережного підривання із застосуванням низькощільних емульсійних вибухових речовин.

**Ключові слова:** низькощільні емульсійні вибухові речовини, зв'язна гранульно-повітряна система, високоентальпійний газовий потік, передача детонації струменями вибухових газів.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Одним из перспективных направлений ведения щадящих высокомеханизированных взрывных работ при открытой добыче полезных ископаемых может стать применение низкоплотных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), сенсibilизированных легкими малопрочными гранулами (например: гранулами пенополистирола). Экспериментально доказано [1], что ЭВВ, сенсibilизированные гранулами пенополистирола, допускают механизированную зарядку в нисходящие скважины и, несмотря на низкую плотность (менее  $0,5 \text{ г/см}^3$ ), сохраняют способность к детонационному разложению. Низкоплотные ЭВВ, сенсibilизированные гранулами пенополистирола, позволяют формировать скважинный заряд практически не подверженный усадке под действием гидростатического давления (в пределах до 5–6 атм, что достаточно для практического использования), а из-за малых плотностей ЭВВ следует ожидать низкий уровень давления взрывных газов в скважине, что благоприятно при щадящем взрывании.

Ранее выполненные исследования [1, 2] показали, что при плотностях рассматриваемых ЭВВ более  $0,75 \text{ г/см}^3$  (для ЭВВ с окислительной фазой на аммиачной селитре), возбуждение взрывчатого вещества (ВВ) осуществляется вследствие разогрева вещества матричной эмульсии при втекании его в поверхностные минипоры гранулы пенополистирола под действием давления во фронте детонационной волны.

При плотностях ЭВВ, сенсibilизированном гранулами пенополистирола, менее  $0,75 \text{ г/см}^3$  (для ЭВВ с окислительной фазой на аммиачной селитре) отмечены отклонения между расчетными и экспериментальными значениями скорости детонации [1].

## НОВІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Для объяснения отклонений расчетного и экспериментального значений скорости детонации при плотности ЭВВ, сенсibilизированном гранулами пенополистирола, менее  $0,75 \text{ г/см}^3$  (для ЭВВ с окислительной фазой на аммиачной селитре) выдвинута следующая гипотеза:

а) при малой плотности рассматриваемого ЭВВ в нем образуется связанная система «гранулы пенополистирола–воздушные поры»;

б) наличие сквозных каналов меняет механизм возбуждения ЭВВ. Возбуждение будет происходить по механизму, предложенному в работе [3], – под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления. При этом химическая реакция происходит в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа.

Цель работы – исследование особенностей детонации низкоплотного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного легкими малопрочными гранулами.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Для проверки данных положений были проведены экспериментальные и теоретические исследования.

В ходе опытно-полигонных исследований осуществлялись опыты по измерению полноты и скорости детонации при подрыве открытых цилиндрических зарядов исследуемого ЭВВ в картонных оболочках (гильзах). Гильзы изготавливать из листов ламинированного электротехнического картона толщиной 1 мм, навиваемых в три оборота на заранее подготовленные цилиндрические шаблоны. Для измерения скорости детонации использовалась аппаратура: «VOD Mate» («Instantel») и «HandyTrap» («MREL»), непрерывно измеряющая величину сопротивления электрической цепи проводника-датчика. Последний наклеивался на лист картона перед навивкой на шаблон. После навивки на шаблон, листы картона фиксировались лентой «скотч». После извлечения шаблона один из торцов полученной трубы заполнялся монтажной пеной «Макрофлекс», после чего гильза принимала законченный вид («пробка» из затвердевшей монтажной пены препятствовала вытеканию Эмульпора из гильзы; в таком виде заполненную Эмульпором гильзу удобно перемещать на полигоне). Длина гильзы была не менее 1000 мм, длина заряжаемой (ЭВВ) части гильзы – не менее 900 мм.

Рассмотрим подробно одну из серий опытов.

Для создания ЭВВ использовалась эмульсия следующего химического состава:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 75,0 % массы,  $\text{H}_2\text{O}$  – 18 % массы, эмульгатор – 1,0 % массы, индустриальное масло – 6,0 % массы. Плотность эмульсии при данном химическом составе на основании лабораторных измерений составила  $1328 \text{ кг/м}^3$ .

Для сенсibilизации указанной эмульсии использовались гранулы попкорна насыпной плотностью  $40 \text{ кг/м}^3$  и средним диаметром 8,0 мм (данные гранулы имеют пористость и механические характеристики, близкие к данным показателям для гранул пенополистирола аналогичной насыпной плотности). ЭВВ готовили смешением указанной эмульсии (ЭМ) с гранулами попкорна (ПК) в соотношении объемных частей: 7 ЭМ и 4 ППС. Плотность смеси составила  $600 \text{ кг/м}^3$ .

Введем обозначения:  $\psi$  – отношение насыпного объема гранул попкорна к

## НОВІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

объему матричной эмульсии;  $\rho_{oo}$  – плотность ЭВВ, сенсibilизированного гранулами попкорна;  $\rho_{эм}$  – плотность матричной эмульсии;  $\rho_{nn}$  – насыпная плотность гранул попкорна.

В рассматриваемом случае  $\psi = 1,75$ ;  $\rho_{oo} = 600 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{эм} = 1328 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{nn} = 40 \text{ кг/м}^3$ .

Если выполняется условие (1), то в ЭВВ образуется связная система «сенсibilизирующие гранулы–воздушные поры», и структура рассматриваемого ВВ представляет собой «туман» из капелек матричной эмульсии, отделенных друг от друга воздушными включениями и(или) легкими малопрочными гранулами. Коэффициент упаковки гранул попкорна определялся лабораторно и составил  $k_{уп} = 1,6$ .

$$1 + \frac{1}{4} \left[ \frac{2k_{уп}}{\psi} \left( \frac{\rho_{эм} - \psi \left( \frac{\rho_{oo} - \rho_{nn}}{k_{уп}} \right) - 1}{\rho_{oo}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} - \left[ \frac{\rho_{эм} - \psi \left( \frac{\rho_{oo} - \rho_{nn}}{k_{уп}} \right)}{\psi \rho_{oo}} + \frac{1}{k_{уп}} \right]^{\frac{1}{3}} \geq 0 \quad (1)$$

Подставляя приведенные значения параметров в (1), получаем  $0,089 > 0$ .

Таким образом, в рассматриваемой серии опытов структура ЭВВ представляла собой «туман» из капелек матричной эмульсии, разделенных друг от друга воздушными включениями и(или) легкими и непрочными гранулами из вещества с акустической жесткостью близкой к акустической жесткости матричной эмульсии.

На рис. 1 представлен внешний вид опытного заряда в картонной гильзе диаметром 130 мм.

В результате опытов установлено, что при иницировании состава промежуточными детонаторами из тротильовых шашек Т–1000–Л–ПО, он полностью детонирует. При этом скорость детонации составляет 4123 м/с при взрывании заряда диаметром 240 мм (рис. 2) и 4065 м/с – при диаметре заряда 130 мм (рис. 3).

*Обсуждение экспериментальных данных.* Допустим, что детонационные процессы описываются моделью, предложенной в работах [4–7] для описания детонации промышленных аммиачно-селитренных ВВ. Выбор данной модели обусловлен тем, что при распространении в указанных ВВ детонационной волны не происходит мгновенного его разложения. В начальный период под действием детонационной волны происходит уплотнение ВВ вследствие заполнения им порового пространства, разогрев вещества, обусловленный внутренним трением и теплотой газов, заполняющих поровое пространство, и лишь последующее возгорание взрывчатого вещества. При этом в модели учитывается, что при уплотнении среда приобретает дополнительную скорость в направлении распространения детонационной волны, а это позволяет объяснить ряд ранее непонятных кинематических эффектов при распространении детонации в аммиачно-селитренных ВВ [4].

В рамках принятой модели описания детонационного процесса имеем: в соответствии с законом сохранения энергии, при условии несжимаемости твердых продуктов реакции (в рамках двухполитропной модели описания расширения продуктов детонации):

# НОВІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

$$\frac{Q_v}{D^2} \left(1 - \frac{3 \sum_j f_j \xi_j}{c \Delta b}\right) = \frac{1}{2(k+1)} \left\{ \frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \left(\frac{1}{K_+ \alpha \rho_0^{2\alpha}}\right)^{(k-1)} + \frac{\sum_j \beta_j}{k+1} \left(1 + (k+1) \frac{u}{D}\right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{k+1} \left[ k \frac{\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0}}{\frac{1}{\rho_{00}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} + (k+2) \left(1 + k \frac{\frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho_0}}{\frac{1}{\rho_{00}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}\right) \frac{u}{D} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\bar{c}$  – относительная мольная теплоемкость продуктов взрыва;  $k$  – коэффициент политропы продуктов взрыва;  $\gamma$  – коэффициент адиабаты взрывных газов;  $\sum_i \beta_i$  – суммарная доля твердого вещества в продуктах взрыва;  $\sum_i \frac{\beta_i}{\rho_i}$  – суммарный относительный объем твердых продуктов взрыва;  $\rho_o^{2\alpha}$  – плотность газообразных продуктов взрыва в момент начала разложения ЭВВ;  $K_+$  – параметр, характеризующий объем газообразных продуктов взрыва в точке сопряжения при двухполитропном описании  $P=P(V)$  газообразных продуктов взрыва (на основании обработки эмпирических данных  $K_+ \approx 4,4$  [4]);  $u$  – приращение скорости движения продуктов взрыва во фронте детонационной волны;  $\rho_o = k_p \rho_{oo}$  – плотность ВВ в момент начала разложения ( $k_p$  – коэффициент уплотнение ВВ в момент начала его разложения);  $Q_v$  – удельная теплота реакции;  $c_v$  – удельная теплоемкость продуктов взрыва;  $\alpha$  – коволюм продуктов взрыва (по Власову).



Рисунок 1 – Внешний вид опытного заряда в картонной гильзе диаметром 130 мм

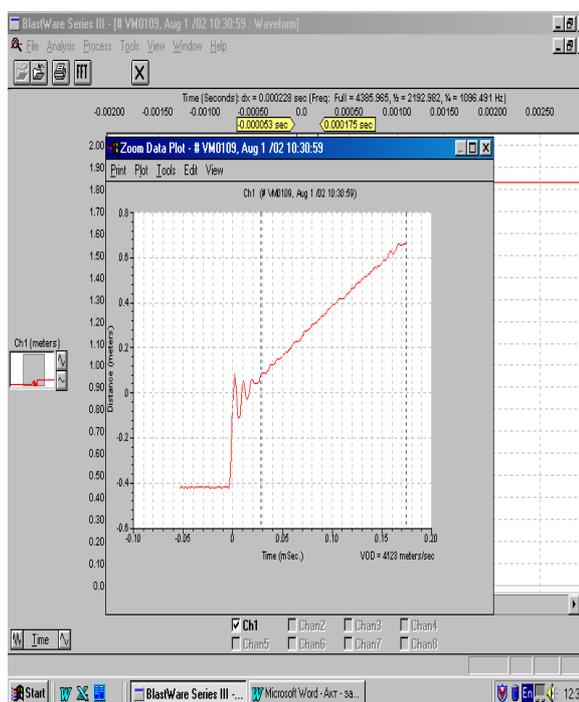


Рисунок 2 – Зависимость пути, пройденного детонационной волной от времени: диаметр заряда – 240 мм; VOD = 4123 м/с; ПД – шашка Т-1000-ЛІ-П

# НОВІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Начальная плотность газообразных продуктов взрыва:

$$\rho_0^{gas} = \rho_0 (1 - \beta_j) \left( 1 - \rho_0 \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right)^{-1} \quad (3)$$

Величина  $\frac{u}{D}$  определяется на основании закона сохранения импульса, и в данном случае приблизительно равна:

$$\frac{u}{D} \approx k_p - 1. \quad (4)$$

Уравнение состояния взрывных газов

$$\frac{Q_v}{D^2} = \frac{\bar{c}}{2(k+1)} \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_0^{gas} \right) (1 - \sum \beta_i). \quad (5)$$

Скорость детонации  $D$  в системе координат, движущейся в направлении процесса со скоростью  $u$ , равна:

$$D^2 = \frac{2(k+1)Q_v}{\bar{c} \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_0^{gas} \right) (1 - \sum \beta_j)}. \quad (6)$$

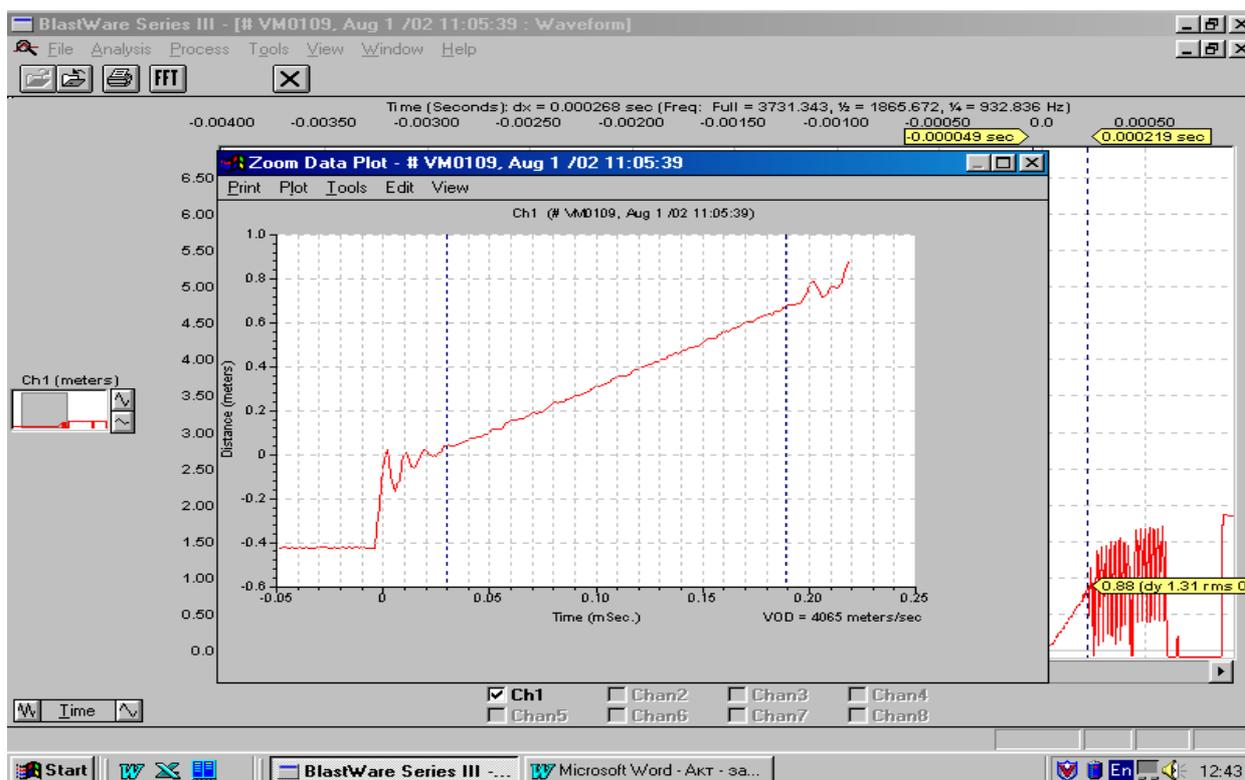


Рисунок 3 – Зависимость пути, пройденного детонационной волной от времени: диаметр заряда – 130 мм; VOD = 4065 м/с; ПД – шашка Т–1000–Л–П

Замеряемая скорость детонации (скорость детонации в лабораторной системе координат) равна:

$$D_* = D + u \quad (7)$$

Система уравнений (2)–(5) разрешается, если известна величина коэффициента уплотнения  $k_p$ .

В нашем случае оценка  $k_p$  осуществлялась экстраполяцией расчетных значений  $k_p$  для плотностей эмульпоров в диапазоне 1,0–1,27 г/см<sup>3</sup> ( $k_p$  рассчитывался по методике работ [1, 2]) в область низких плотностей заряда. График экстраполяции представлен на рис. 4. На основании полученных результатов для оценочных расчетов принимали:  $k_p \approx 1,45 - 0,37\rho_{oo}$ , где  $\rho_{oo}$  в г/см<sup>3</sup>. При  $\rho_{oo} = 0,6$  г/см<sup>3</sup> величина  $k_p = 1,23$ .

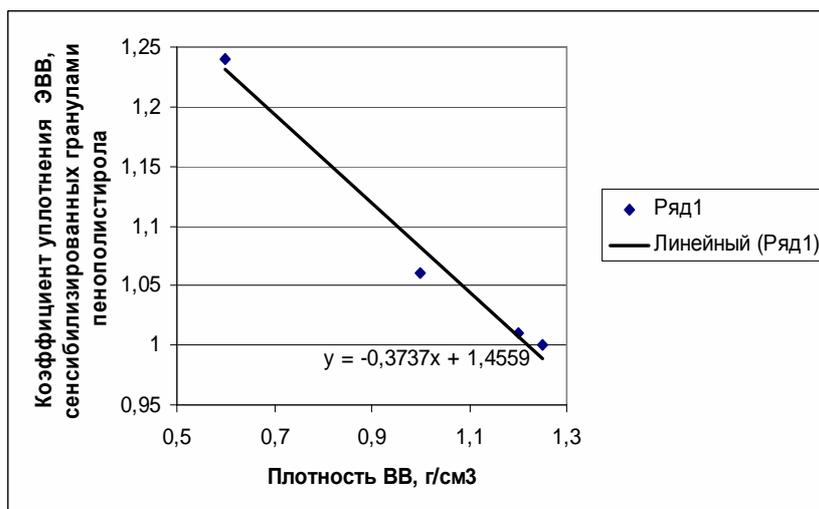


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента уплотнения ЭВВ, сенсibilизированного гранулами пенополистирола, от плотности ЭВВ (экстраполяция)

Результаты расчета скорости детонации по приведенным выше уравнениям для рассматриваемой серии опытов:  $D_* = 3195$  м/с ( $D = 2622$  м/с  $u = 572$  м/с).

Расчетное значение значительно меньше, полученного в ходе экспериментов.

Таким образом, предположение, что детонационное разложение рассматриваемого ЭВВ обуславливается его разогревом вследствие внутреннего трения при заполнении порового пространства и(или) теплотой газов в сжимающихся порах, не позволяет объяснить столь высокие скорости детонации при такой низкой плотности ЭВВ.

Следовательно, для объяснения наблюдаемых скоростей детонации необходима другая концепция.

В соответствии с (1) в рассматриваемом низкоплотном ЭВВ имеется связанная гранульно-воздушная система. Положим, что возбуждение детонации в данном ЭВВ будет происходить в соответствии с механизмом возбуждения ВВ, рассмотренный в работе [3].

Тогда возбуждение указанного ЭВВ будет происходить под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давле-

## НОВІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

ния. При этом химическая реакция проходит в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа.

Определим параметры фильтрующегося потока взрывных газов из области высокого давления. Введем следующие обозначения:  $u_*$  – скорость потока относительно неподвижного наблюдателя;  $\rho_f, T_f$  – плотность и температура взрывных газов в головной части потока взрывных газов, истекающих из области высокого давления;  $\rho_x, T_x$  – плотность и температура воздуха в головной части ударной воздушной волны, вызванной потоком взрывных газов.

На основании газодинамических соотношений [8] в рамках двухполитропной модели расширения взрывных газов, имеем следующие уравнения для определения параметров потока взрывных газов, фильтрующегося из области высокого давления:

$$\frac{u_*}{D} = \frac{3k-1}{k^2-1} + \frac{u}{D} + \frac{2k(k-\gamma)}{(\gamma-1)(k^2-1)} \left( \frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2\alpha}} \right)^{\frac{k-1}{2}} - \frac{2k}{(k-1)(\gamma-1)} \left( \frac{(\gamma_a+1)(k+1)\rho_a}{2\rho_o^{2\alpha}} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \times \left( \frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2\alpha}} \right)^{\frac{k-\gamma}{2\gamma}} \left( \frac{u_*}{D} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (8)$$

$$\rho_f = \left( \frac{(\gamma_a+1)(k+1)\rho_a u_*^2}{2\rho_o^{2\alpha} D^2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{k+1}{k} K_+ \alpha \rho_o^{2\alpha} \right)^{\frac{k}{\gamma}} \frac{1}{K_+ \alpha}, \quad (9)$$

$$T_f = \frac{2k}{k+1} T_B \left( \frac{k}{k+1} \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2\alpha}} \right)^{\frac{k-\gamma}{\gamma}} \left( \frac{(\gamma_a+1)(k+1)\rho_a u_*^2}{2\rho_o^{2\alpha} D^2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (10)$$

где  $\gamma_a=1,2$  – показатель адиабаты воздуха в ударной волне;  $T_B$  – температура продуктов взрыва.

Истекающий из области высокого давления поток взрывных газов вызывает в воздухе, находящемся между легкими гранулами и в гранулах (пористость 95–98 %) ударную волну. Данная ударная волна и следующий за ней поток горячих взрывных газов обтекают капельки «тумана» из матричной эмульсии. Если данные капельки вспыхнут за время, меньшее, нежели продолжительность процесса разложения ВВ в зоне активной химической реакции (область высокого давления), то распространение взрывного процесса по низкоплотному ЭВВ будет определяться скоростью распространения данного зажигательного процесса.

Время зажигания капелек эмульсии оцениваем на основании работы [9]. Время индукции –  $\tau$  – зажигания капли эмульсии при обдуве ее ударной воздушной волной и потоком взрывных газов найдется из уравнений (полагаем, что вследствие чрезвычайной кратковременности процесса зажигания, основную роль в его осуществлении играет лучистая энергия):

## НОВІ ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ Й ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

$$\tau = \tau_{\vartheta} t_a ; \quad t_a = \frac{cRT_s^2}{EQz} \exp\left(\frac{E}{RT_s}\right); \quad \tau_{\vartheta} = \frac{1 - 0,2|\Theta_H| + 0,36\Theta_H^2}{1 - 0,8\beta}, \quad (11)$$

где  $\Theta_H = \frac{E(T_H - T_S)}{RT_S^2}$  – температурный напор;  $\beta = \frac{RT_S}{E}$  – показатель зависимости

скорости реакции от температуры;  $T_H$  – начальная температура эмульсии;  $T_S$  – температура поверхности капли эмульсии при при обдуве ее ударной воздушной волной и потоком взрывных газов;  $E$  – энергии активации;  $z$  – предэкспонент.

Определение температуры поверхности капли эмульсии осуществляем с учетом торможения ударной волны и потока взрывных газов и тепловой активностью веществ, участвующих в процессе теплопередачи [10]:

$$T_S = T_H + T_{уд.в.}^{тормож.} \frac{K_{\epsilon}^{уд.в.}}{1 + K_{\epsilon}^{уд.в.}} + T_{поток}^{тормож.} \frac{K_{\epsilon}^{поток}}{1 + K_{\epsilon}^{поток}}, \quad (12)$$

$$T_{уд.в.}^{тормож.} = T_{уд.в.} + \frac{V_{уд.в.}^2}{2c_{возд.}}. \quad V_{уд.в.} = \frac{\gamma_a + 1}{2} u_*;$$

$$T_{поток}^{тормож.} = T_f + \frac{u_*^2}{2c_{поток}}, \quad (13)$$

где  $K_{\epsilon}^{уд.в.}$ ,  $K_{\epsilon}^{поток}$  – коэффициенты тепловой активности по воздуха в ударной волне и потока взрывных газов отношению к веществу эмульсии, соответственно;  $T_{уд.в.}$  – температура воздуха в ударной волне (находится на основании решений [8]).

Условие возникновения передачи детонации струями взрывных газов, истекающих из области высокого давления, будет происходить при выполнении условия

$$\tau < t_{хим.р.}, \quad (14)$$

где  $t_{хим.р.}$  – время химической реакции в зоне высокого давления.

В рассматриваемом случае

$$t_{хим.р.} = \frac{R_{dr}}{v_{гор.}}, \quad (15)$$

где  $R_{dr}$  – средний радиус капли эмульсии;  $v_{гор.}$  – скорость абляционного горения.

Скорость абляционного горения определяется на основании данных [3]:

$$v_{гор.} = 3 \frac{(\rho_{эм} D_*)^{\frac{2}{3}}}{R_{dr}^{\frac{1}{3}}}. \quad (16)$$

Полученные соотношения (8)–(10) позволяют оценить скорость распространения детонационно-подобного процесса, а уравнения (11)–(16) – возможность передачи процесса струями взрывных газов, истекающих из области высокого давления. Однако необходимо рассмотреть устойчивость данного явления.

Согласно Трофимову В.С. срыва детонационного процесса из-за падения давления в волне разряжения, движущейся за зоной химической реакции, не будет происходить при выполнении условия [11]:

$$\frac{Q_v}{c_v} \frac{d\zeta}{dt} + \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_{s,\zeta} \frac{dv}{dt} \geq 0, \quad (17)$$

$\zeta$  – доля прореагировавшего вещества ЭВВ;  $v$  – удельный объем;  $\rho_*$  – плотность продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге;  $\theta$  – коэффициент температурного расширения продуктов взрыва в зоне реакции;

На основании преобразований термодинамических соотношений [12] можно показать, что

$$\left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_{s,\zeta} = \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_P + \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v \left( \frac{\partial P}{\partial v} \right)_S = -\frac{k-1}{\theta v}. \quad (18)$$

Подставляем (18) в (17) и интегрируем. В результате получаем следующее условие отсутствия срыва детонационного процесса:

$$\frac{\zeta_{\min} Q_v}{c_v} \geq \frac{k-1}{\theta} \ln \left( \frac{\rho_*}{\rho_{oo}} \right). \quad (19)$$

В соответствии с [13] состояние продуктов детонации в зоне активной химической реакции приближается к свойствам жидкости. Ввиду отсутствия экспериментальных данных  $\theta$ , данная величина определялась по формуле [14, 15]

$$\theta = 1,5(1-\mu)(2-3\mu)^{-1} c_v C_{3\theta}^{-2}, \quad (20)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона (в данном случае  $\mu = 0,5$ );  $C_{3\theta}$  – скорость звука в продуктах взрыва в зоне реакции.

На основании (6), (19), (20) получаем следующий критерий отсутствия срыва детонации:

$$\frac{\rho_*}{\rho_{oo}} \leq \exp \left( \frac{3\bar{c} \left( 1 - \sum_i \beta_i \right) \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_o^{zaz} \right)}{4(k^2 - 1)} \right). \quad (21)$$

Приближенно имеем следующие выражения для некоторых параметров, входящих в (21):

$$\frac{\rho_*}{\rho_{oo}} = \frac{k+1}{k} \frac{k_p}{1 + \frac{k_p}{k} \rho_{oo} \sum_i \frac{\beta_i}{\rho_i}} \approx \frac{k+1}{k} k_p, \quad (22)$$

$$\rho_o^{zaz} = \frac{1 - \sum_i \beta_i}{\frac{1}{k_p \rho_{oo}} - \sum_i \frac{\beta_i}{\rho_i}} \approx k_p \rho_{oo} \left( 1 - \sum_i \beta_i \right). \quad (23)$$

На основании (21)–(23) получаем следующее критериальное выражение для оценки отсутствия срыва детонации:

$$\frac{k}{(k+1)k_p} \exp \left( \frac{3\bar{c} \left( 1 - \sum_i \beta_i \right) \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha k_p \rho_{oo} \left( 1 - \sum_i \beta_i \right) \right)}{4(k^2 - 1)} \right) \geq 1. \quad (24)$$

Результаты расчетов по модели струйной передачи детонации. При выполнении расчетов полагали, что возгорание эмульсии начинается с экзотермического разложения аммиачной селитры. Тогда значения энергии активации  $E$  и величину предэкспонента  $z$  в формулах (11) можно принять равными [10]:  $E = 169,5$  кДж/моль,  $z = 6,8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ .

Скорость газового потока, истекающего из области высокого давления – 3837 м/с; скорость ударной воздушной волны, распространяющейся перед потоком, – 4221 м/с; время химической реакции – 56,2 мкс; время индукции загорания эмульсии – 51,7 мкс; критерий отсутствия срыва реакции – 0,982 (~1).

Таким образом, представление о возбуждении низкоплотного ЭВВ струями взрывных газов, истекающих из области высокого давления, позволяют получить численные значения для скорости детонации близкие к экспериментально определенным.

Дополнительные расчетные данные:

1. Коэффициент работоспособности относительно аммонита № 6ЖВ (1 г/см<sup>3</sup>) – 0,433 (по Ванштейну [18]); 0,412 (по Лангефорсу [19]); 0,415 (по Кукибу [20]); 0,431 (по двухполитропному приближению [21]);
2. Коэфф.политропы – 1,907, коэф.адиабаты – 1,289;
3. Теплота взрыва – 596,5 ккал/кг; удельный объем газов – 1093 л/кг;
4. Плотность взрывных газов в головной части потока – 0,0457 г/см<sup>3</sup>;
5. Температура взрывных газов в головной части потока – 628 К;
6. Давление во взрывных газах в головной части потока – 115 атм;
7. Давление в области активного протекания хим.реакции – 1,69 ГПа.

**ВЫВОДЫ.** 1. Выдвинутая рабочая гипотеза для объяснения высоких значений скорости детонации в низкоплотных ЭВВ – корректна.

2. В низкоплотных ЭВВ (имеется связанная гранульно-воздушной система) возбуждение детонации происходит под действием высокоэнтальпийного газового потока, фильтрующегося из области высокого давления. При этом химическая реакция происходит в форме поверхностного горения частиц ВВ, взаимодействующих с потоком газа.

3. Получены аналитические критерии для оценки условий возникновения струйной детонации.

4. Полученные сведения позволяют получить полезные с практической точки зрения результаты для разработки новых видов низкоплотных ЭВВ и обоснования технологии осуществления щадящего взрывания с применением данных ВВ.

*Авторы выражают благодарность за полезные обсуждения рассматриваемых вопросов д.т.н., член-корр. ВАН Андрееву В.В.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов И.Ю. Разработка технологии взрывной отбойки обводненных горных пород глубокими скважинами с применением эмульсионных взрывчатых веществ на основе пенополистирола: автореф. дис. ... канд. техн. наук, спец. 25.00.20; Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе. – М., 2013. – 23 с.
2. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Оценка детонационных параметров эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных пластиковыми полимикросферами: Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технический журнал). – 2011. – № 7. – С. 53–63. – М.: Издательство «Горная книга», 2011 г.)
3. Андреев В.В., Ершов А.П., Лукьянчиков Л.А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Физика горения и взрыва. – 1979. – Т. 15, № 1. – С. 89–93.
4. Горинов С.А. Аппроксимационный метод расчета детонационных параметров низкоплотных аммиачно-селитренных ВВ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 10. – С. 244–256.
5. Теоретическая оценка влияния химической природы окислителя на детонационные характеристики эмульсионных взрывчатых веществ/ Горинов С.А., Куприн В.П., Коваленко И.Л., Собина Е.П. // В кн.: Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. – С. 191–201.
6. Горинов С.А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэмитов. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 8. – С. 121–130.
7. Кутузов Б.Н., Горинов С.А. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 7; препринт. – С. 34–52.
8. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.
9. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. – Новосибирск: Наука, 1984. – 189 с.
10. Теория горения и взрыва / Кукин П.П., Юшин В.В., Емельянов С.Г. и др. – М.: Изд-во Юрайт, 2014. – 435 с.
11. Дремин А.Н. Пульсирующий детонационный фронт // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 4, т. 19. – С. 159–169.
12. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т. 1. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит.-ры, 1969. – 912 с.
13. Ландау Л.Д., Станюкович К.П. Об изучении детонации конденсированных ВВ // ДАН СССР. – 1945. – Т. 46, № 9. – С. 399–402.
14. Белопоместных В.Н. Акустический параметр Грюнайзена твердых тел // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, вып. 3. – С. 14–19.

15. Теслеева Е.П. Исследование полиморфных превращений в ионно-молекулярных диэлектриках методами физической акустики и теплофизики: дис. ... канд. ф.-м. наук., спец. 01.04.07; Юргинский технологический институт Томского политехнического университета. – Барнаул, 2006. – 187 с.

16. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Теплофизические свойства несенсибилизированной эмульсионной матрицы – компонента эмульсионных взрывчатых веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи. – М.: Изд-во "Горная книга", 2011. – № 12. – С. 17–20.

17. Изучение разложения эмульсии под действием ударных волн (заключительный отчет) / Рук. К.К. Шведов, Институт проблем химической физики. – Черноголовка, 2004. – 17 с.

18. Вайнштейн Б.И., Чернов К.С., Песоцкий М.К. Анализ методов определения работоспособности // Взрывное дело № 84/41. – М.: Недра, 1982. – С. 75–83.

19. Johansson C.H., Langefors U. Methods of physical characterization of explosives // Proc.of the 36<sup>th</sup> Intern.Congress on Industrial Chemistry. – Brussels, 1972. – V.III. – P.610.

20. Афанасенков А.Н., Котова Л.И., Кукиб Б.Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 115–125.

21. Давыдов В.Ю., Дубнов Л.В., Гришкин А.М. Универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28, № 4. – С. 102–107.

## **DETONATION PECULIARITIES OF THE LOW-DENSITY EMULSION EXPLOSIVES SENSITIZED WITH LIGHT LOW-STRENGTH GRANULES**

**S. Gorinov, I. Maslov**

"Global Mining Explosive-Russia"

vul. Tennesnaya, 50, Seliatino, Moscow region, 143345, Russia.

E-mail: akaz2006@yandex.ru; ilmaslov@mail.ru

It is shown that in the low-density emulsion explosives (EE) obtained by mixing the emulsion with a significant amount of light low-strength pellets (when mixed, a connected pellet-air system arises within a compound) shock initiation occurs under high enthalpy gas flow, which is filtered from the high-pressure area. This chemical reaction proceeds by the mechanism of a surface combustion of the emulsion particles interacting with the gas flow. It was identified the analytical criteria to assess the conditions of jet detonation. The experimental findings provide useful application to all practical purposes when substantiating the gentle blasting technology using low-density EE.

**Key words:** low-density EE, connected pellet-air system, high enthalpy gas stream, transmission of detonation by explosive gas jets.

REFERENCES

1. Maslov, I.Y. (2013), "Improving the efficiency of explosive training of enclosing rocks in sections of Kuzbass using the emulsion explosives sensitized with polystyrene pellets", Thesis... for Cand. Sci., Engineering, spec. 25.00.20, MGRI-RSGPU, Moscow, Russia.
2. Gorinov, S.A., Maslov, I.Y. (2011), "Evaluation of the detonation parameters of the emulsion explosives sensitized with plastic polymicrospheres", *Coll. works of Mining information and analytical bulletin*, no. 7, pp. 53–63.
3. Andreev, V.V., Ershov, A.P., Lukyanchikov, L.A. (1979), "Porous low-speed two-phase detonation of explosives", *Fizika goreniya i vzryva*, vol. 15, no.1, pp. 89–93.
4. Gorinov, S.A. (2010), "The approximation method for calculation of the detonation parameters of low-density ammonium explosive", *Mining information and analytical bulletin*, no. 10, pp. 244–256.
5. Gorinov, S.A., Kuprin, V.P., Kovalenko, I.L., Sobin, E.P. (2009), "Theoretical evaluation of the influence of the chemical nature of the oxidant on the detonation characteristics of emulsion explosives", in the book *Razvitie resursosberigayushchikh tekhnologii vo vzryvnom dele* [Development of resource-saving technologies in the explosives works], Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.
6. Gorinov, S.A. (2010), "Theoretical estimation of the detonation parameters the granemites", *Mining information and analytical bulletin*, no. 8, pp. 121–130.
7. Kutuzov, B.N., Gorinov, S.A. (2011), "Physical and technical basis for emulsion and granular explosives and their means of initiation", *Mining information and analytical bulletin*, no. 7, pp. 34–52, preprint.
8. Baum, F.A., Stanyukovich, K.P., Schechter, B.I. (1959), *Fizika vzryva* [Explosion physics], Fizmatgiz, Moscow, Russia.
9. Vilyunov, V.N. (1984), *Teoriya zazhiganiya kondensirovannykh veshchestv* [Theory of ignition of condensed substances], Nauka, Novosibirsk, Russia.
10. Kykin, P.P., Yushin, V.V., Emelyanov, S.G. et al. (2014), *Teoriya goreniya i vzryva* [The theory of combustion and explosion], Yurait, Moscow, Russia.
11. Dremin, A.N. (1983), "Pulsating detonation front", *Fizika goreniya i vzryva*, no. 4, vol. 19, pp. 159–169.
12. Levich, V.G. (1969), *Kurs teoreticheskoi fiziki* [Course of Theoretical Physics], vol. 1, Nauka, Moscow, Russia.
13. Landau, L.D., Stanyukovich, K.P. (1945), "Comment on the study of detonation of condensed explosives", *RAS USSR*, vol. 46, no. 9, pp. 399–402.
14. Belopomestnyh, V.N. (2004), "Acoustic Gruneisen parameter of solids" *Technical Physics Letters*, vol. 30, no. 3, pp. 14–19.
15. Tesleeva, E.P. (2006), "Study of polymorphic transformations in ion-molecular dielectrics by the methods of physical acoustics and thermophysics", Thesis abstract... Cand. Sci., Physics & mathematics, Yurga Technical Institute of Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russia.
16. Gorinov, S.A., Maslov, I.Y. (2011), "Thermophysical properties of unsensitized emulsion matrix - part of emulsion explosives", *Coll. works of Mining information and analytical bulletin*, no. 12, pp. 17–20.

17. (2004), "The study of decomposition of the emulsion under the action of shock waves", Final research report, under the supervision of K.K. Shvedov, Institute of Problems of Chemical Physics, Chernogolovka, Russia.

18. Weinstein, B.I., Chernov, K.S., Pesotskii, M.K. (1982), "Analysis of the methods for operation efficiency assessment", *Vzryvnoe delo*, no. 84/41, pp. 75–83.

19. Johansson, C.H., Langefors, U. (1972), "Methods of physical characterization of explosives", *Proc. of the 36<sup>th</sup> Int. Congress on Industrial Chemistry*, Brussels, vol. 3, p. 610.

20. Afanasenkov, A.N., Kotova, L., Kukib, B.N. (2001), "On the efficiency of industrial explosives", *Fizika goreniya i vzryva*, vol. 37, no. 3, pp. 115–125.

21. Davydov, V.Y., Dubnov, L.V., Grishkin, A.M. (1992), "Universal thermodynamic efficiency criterion of explosives", *Fizika goreniya i vzryva*, vol. 28, no. 4, pp. 102–107.

Стаття надійшла 13.05.2014.

УДК 622.235

## СНИЖЕНИЕ ПЕРЕИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНОМ ДРОБЛЕНИИ НЕГАБАРИТА

**В. Н. Долударев, А. М. Пеев**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина.

E-mail: tehm@kdu.edu.ua

При взрывной отбойке нерудных горных пород переизмельчение среды является так же нежелательным, как и выход негабаритных фракций. Поэтому при проектировании буровзрывных работ (БВР) стремятся получить как можно более равномерное дробление массива. Одним из новых методов снижения переизмельчения твердых сред является расположение в виде наружной оболочки заряда взрывчатого вещества (ВВ) газообразующей энергоактивной добавки. Это приводит к снижению пика давления в зарядной полости на начальной стадии взрыва и усилению дробления среды на последующих стадиях за счет горения газообразующей добавки.

**Ключевые слова:** шпуровой заряд, оболочка, газообразующее вещество, переизмельчение.

## ЗНИЖЕННЯ ПЕРЕПОДРІБНЕННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ВИБУХОВОМУ ДРОБЛЕННІ НЕГАБАРИТА

**В. М. Долударєв, А. М. Пєєв**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна.

E-mail: tehm@kdu.edu.ua