

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ  
ПАТРОНИРОВАННЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ,  
СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ МИКРОСФЕРАМИ**

**С. А. Калякин, Р. И. Азаматов**

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, 83001, г. Донецк, Украина. E-mail: yglenit@gmail.com

Обобщены исследования скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществ в патронах конечного диаметра. На основании результатов исследования и результатов работ, выполненных за рубежом, была получена эмпирическая математическая модель расчета неидеальной скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществ в патронах конечного диаметра. Эта модель позволяет на стадии проектирования эмульсионных взрывчатых веществ предсказывать их скорость детонации и критический диаметр детонации, что значительно снижает объем экспериментальных работ. Данная модель может быть использована при разработке эмульсионных взрывчатых веществ предохранительного типа для угольных шахт.

**Ключевые слова:** скорость детонации, эмульсионная матрица, микросферы, сенсibilизатор, критический диаметр, математическая модель.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ШВИДКОСТІ ДЕТОНАЦІЇ  
ПАТРОНОВАНИХ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН,  
СЕНСИБІЛІЗОВАНИХ МІКРОСФЕРАМИ**

**С. О. Калякін, Р. І. Азаматов**

Донецький національний технічний університет

вул. Артема, 58, 83001, м. Донецьк, Україна. E-mail: yglenit@gmail.com

Узагальнені дослідження швидкості детонації емульсійних вибухових речовин у патронах кінцевого діаметру. На основі результатів дослідження та результатів робіт, виконаних за кордоном, була отримана емпірична математична модель розрахунку неідеальної швидкості детонації емульсійних вибухових речовин у патронах кінцевого діаметру. Ця модель дозволяє на етапі проектування емульсійних вибухових речовин передбачувати їх швидкість детонації та критичний діаметр детонації, що значно знижує обсяг експериментальних робіт. Дана модель може бути використана при розробці емульсійних вибухових речовин запобіжного типу для вугільних шахт.

**Ключові слова:** швидкість детонації, емульсійна матриця, микросфери, сенсibilізатор, критичний діаметр, математична модель.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) широко применяются в горнодобывающей промышленности на открытых работах в основном в наливном виде, а в подземных условиях рудников – в патронированном виде [1, 2]. В последние годы, как за рубежом, так и в Украине интенсивно ведутся работы по разработке патронированных ЭВВ для угольных шахт,

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

---

опасных по газу и взрывам угольной пыли. Вместе с тем, в опасных условиях угольных шахт разрешается применение при взрывных работах только специальных предохранительных ВВ [3]. Поэтому разработка предохранительных ЭВВ для угольных шахт является актуальной задачей, решение которой значительно повысит эффективность и безопасность взрывных работ в угольных шахтах.

*Анализ последних исследований и публикаций* показал, что решение поставленной задачи разработки патронированных предохранительных ЭВВ встречает определенные трудности. Они связаны с тем, что патронированные предохранительные ЭВВ должны удовлетворять ряду требований, связанных с обеспечением необходимого уровня предохранительных свойств по газу метану и угольной пыли и детонационным свойствам, необходимым для полноты и устойчивости детонации шпуровых зарядов ВВ при их групповом короткозамедленном взрывании при взрывных работах [4]. Известно, что уровень предохранительных свойств у ВВ в канальной мортире зависит от их удельной теплоты взрыва –  $Q_v$  и концентрации соли ингибитора в продуктах детонации ВВ –  $\epsilon$ . Эти показатели предохранительных ВВ можно достаточно точно рассчитать по известному составу ВВ и сделать вывод о его безопасности при взрывании в канальной мортире без забойки. В угловой мортире предохранительные свойства открытого заряда ВВ определяются его скоростью детонации, которую определяют экспериментально известными методами [5]. Полнота и устойчивость детонации патронированных ВВ в шпуровых зарядах зависит от скорости детонации ВВ, его критического диаметра и способности передавать детонацию через инертный промежуток от одного патрона другому. Все эти показатели ВВ определяются экспериментально на основании гостированных методов испытаний. Вместе с тем у предохранительных ВВ все выше перечисленные показатели предохранительных свойств и детонационной способности ВВ в той или иной степени связаны между собой, т.к. они в сильной степени зависят от содержания в составе ВВ ингибиторов, которые предотвращают взрыв метана или угольной пыли в смеси с воздухом. Поэтому разработка любого класса предохранительного ВВ весьма трудоемка, т.к. требует большого объема экспериментальных исследований.

ЭВВ, в отличие от порошкообразных аммиачно-селитренных ВВ, обладают рядом преимуществ, поскольку они негорючие, а их сенсбилизация и способность к детонации достигается не применением бризантных ВВ (тротил или смесь нитроглицерина и нитродигликоля), а путем ввода в эмульсионную матрицу полых микросфер или создание в ней газовых пузырьков, которые выполняют роль «горячих точек», ответственных за инициирование и протекание детонационных процессов в ЭВВ.

В этой связи большой интерес вызывают исследования скорости детонации патронированных предохранительных ЭВВ в зависимости от диаметра патрона и начальной плотности ВВ, сенсбилизированного микросферами. Поскольку эти исследования позволят ответить на вопрос о возможности разработки предохранительных ЭВВ, содержащих необходимое количество ингибитора для безопасности взрывных работ и определить их детонационную способность, необходимую для полноты и устойчивости детонации патронов ЭВВ в шпуровых зарядах.

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

Целью работы является исследование скорости детонации патронированных предохранительных ЭВВ в патронах различного диаметра и начальной плотности ВВ для создания математической модели расчета скорости детонации ЭВВ с учетом его состава и наличия ингибитора в продуктах детонации, а также критического диаметра детонации ВВ и параметров полых микросфер для сенсibilизации эмульсионной матрицы.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В основе ЭВВ лежит эмульсионная матрица из водного раствора окислителя и жидкого горючего. Размеры частиц окислителя в эмульсии 1...2 мкм, а толщина пленки горючего между ними – 0,1 мкм. Благодаря такой структуре эмульсионной матрицы достигается тесный контакт между горючим и окислителем и одновременно она не способна к детонации за счет флегматизирующего действия водного раствора окислителя. Для перевода эмульсионной матрицы в детонационное состояние в ее структуру вводят мелкие полые микросферы сенсibilизаторы, которые при их ударном сжатии являются «горячими центрами», ответственными за протекание экзотермических реакций при детонационном процессе в ЭВВ. Такой механизм сенсibilизации ЭВВ вызывает ряд особенностей детонационного поведения ЭВВ, связанных как с немонотонностью зависимости скорости детонации от плотности ВВ в заряде, так и с увеличением критического диаметра детонации за счет роста ширины зоны реакции при увеличении плотности ЭВВ. В результате этого наблюдается немонотонная экстремальная зависимость скорости детонации ЭВВ от плотности ВВ –  $\rho_{ЭВВ}$ , регулируемой с помощью объемной доли полых микросфер. Эта зависимость для патронов диаметром 25,4 и 50,8 мм показана на рис. 1. Кроме того, видно, что скорость детонации ЭВВ зависит и от диаметра заряда [6, 7]. Данная зависимость скорости детонации патронированных ЭВВ от диаметра и плотности патронирования получена в работе [6], а в работе [7] получена зависимость скорости неидеальной детонации ЭВВ от параметров патронов в виде:

$$D(m_{mc}; \tau_0; d_n; d_{mc}) = \frac{D_0(m_{mc}; \tau_0)}{1 + \frac{n}{n+1} \frac{D_0(m_{mc}; \tau_0)}{d_n} \left( \varphi_c \sqrt{d_{mc}} + \varphi_g \tau_0 \frac{d_{mc}^3}{m_{mc}} \right)}, \quad (1)$$

где  $m_{mc}$  – весовая доля микросфер в ЭВВ;

$\tau_0$  – объемная доля «сфер горения» в точке Чепмена-Жуге;

$d_n$  – диаметр патрона;

$d_{mc}$  – диаметр микросфер;

$D_0$  – скорость идеальной детонации ЭВВ:

$$D_0 = \frac{\beta(1-m_{mc})}{[\beta - (\beta-1)m_{mc}](1-\sigma m_{mc})} \sqrt{2(n^2-1)(\tau_0 - m_{mc})Q_v};$$

где  $\beta$  – отношение плотностей эмульсионной матрицы к истинной плотности микросфер;

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

$\sigma$  – отношение истинной плотности микросфер к плотности материала стенок микросфер;

$n$  – показатель политропы продуктов детонации ЭВВ;

$Q_v$  – удельная теплота горения эмульсии;

$\varphi_c, \varphi_g$  – параметры горения эмульсии.

В работе [7] эти параметры имеют следующие значения:  $\varphi_c = 4,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{1/3}/\text{с}$ ,  
 $\varphi_g = 8,689 \cdot 10^5 \text{ с}/\text{м}^{-3}$ .

D, м/с

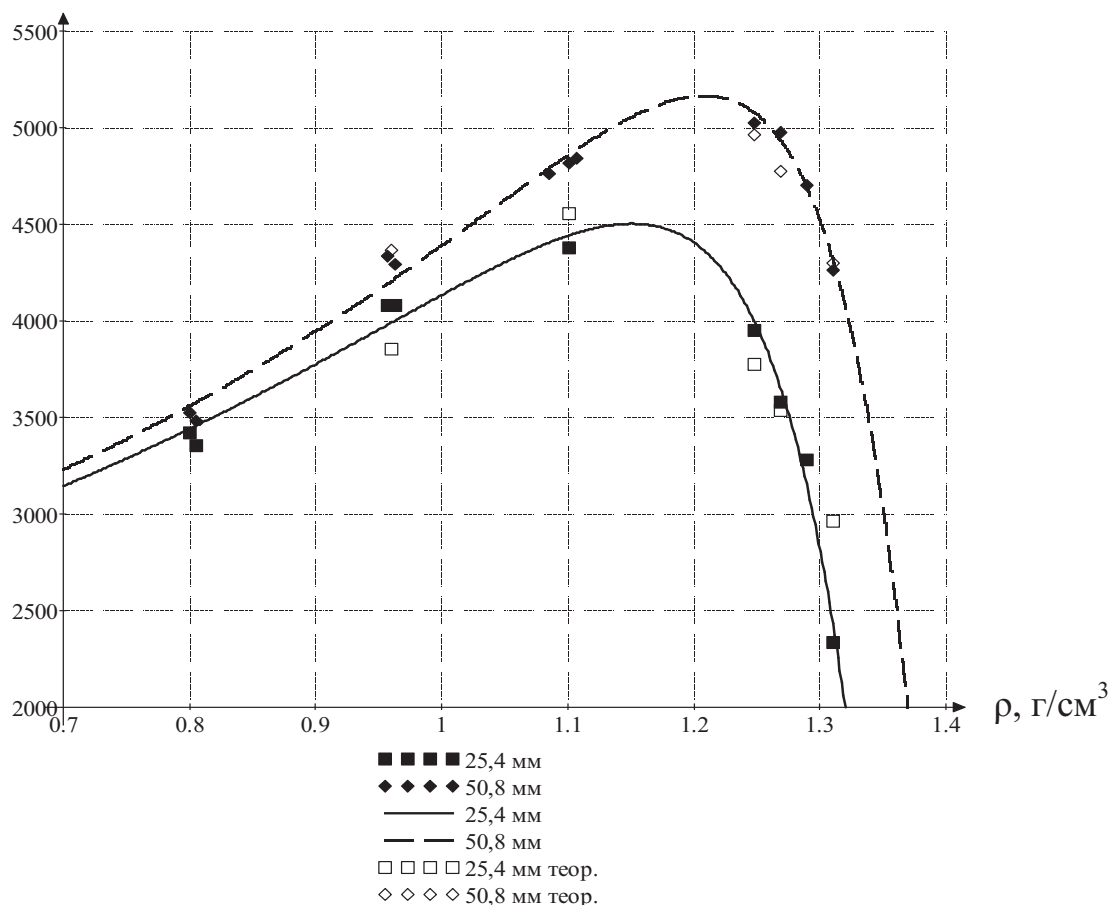


Рисунок 1 – Скорость детонации ЭВВ в зависимости от плотности патронирования

Вполне очевидно, что зависимость неидеальной скорости детонации в виде (1) достаточно полно характеризует детонационный процесс в патронированном ЭВВ и в теоретическом плане представляет определенный интерес. Вместе с тем, для практического использования на стадии проектирования ЭВВ она вряд ли пригодна, поскольку требует достаточного объема исследований и экспериментальных данных не только по скоростям детонации ЭВВ, но и по параметрам горения эмульсии во фронте детонационной волны. С этой точки зрения была поставлена задача нахождения более простой и удобной зависимости неидеальной скорости детонации ЭВВ от параметров патронов и плотности ЭВВ. Для

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

решения этой задачи были использованы опытные и экспериментальные данные, заимствованные из работ [6, 8], в которых проведены исследования скорости детонации ЭВВ в патронах различного диаметра и плотности патронирования. В качестве сенсбилизаторов эмульсий у этих ЭВВ использовались стеклянные микросферы *QCel 400*, изготовленные PQ Corp., Valley Forge PA с размером от 64 мкм до 153 мкм, и полые полистирольные гранулы различных размеров. Для изготовления эмульсионной матрицы использовали композицию, состоящую из водного раствора нитрата аммония (66,91 %), нитрата кальция (14,59 %), воды (12,0 %), светлого минерального масла (5,0 %), эмульгатора SPAN-80 (1,5 %). По составу эта эмульсионная матрица очень близка к эмульсионной матрице ЭВВ II класса Грэмикс–М, выпускаемому по ТУ У 24.6–32690803–001:2009. Это расширило наши возможности в построении эмпирической модели для расчета скорости детонации патронированных ЭВВ, т.к. используя Грэмикс–М в патронах различного диаметра можно получить данные, которые существенно дополнили опытные данные исследований скорости детонации патронированных ЭВВ, полученных в работах [6, 8].

Приведенные на рис. 1 графики зависимостей скорости детонации ЭВВ, сенсбилизированных стеклянными микросферами в патронах различного диаметра и плотности ЭВВ, позволяют сделать вывод, что данные зависимости полиномиальные с характерным экстремумом. Это позволило априори выбрать полиномиальную квадратичную зависимость скорости детонации ЭВВ от диаметра патрона и плотности ЭВВ следующего вида:

$$D_n(d_n, \rho_{ЭВВ}) = b_0 + b_1 d_n + b_2 \rho_{ЭВВ} + b_{11} d_n^2 + b_{22} \rho_{ЭВВ}^2 + b_{12} d_n \rho_{ЭВВ}, \quad (2)$$

где  $b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$  – коэффициенты, получаемые согласно реализации плановой матрицы эксперимента для различных значений переменных  $d_n$  и  $\rho_{ЭВВ}$ .

Для определения этих эмпирических коэффициентов составлена матрица планирования двухфакторного эксперимента для полиномиальной квадратичной зависимости вида (2), которая приведена на рис. 2.

Опыт	x0	x1	x2	x1 <sup>2</sup> -2/3	x2 <sup>2</sup> -2/3	x1x2	D, м/с
Планирование 2 <sup>3</sup>	1	-1	-1	0.3333333	0.3333333	1	3917.1
	1	1	-1	0.3333333	0.3333333	-1	4348.4
	1	-1	1	0.3333333	0.3333333	-1	2811.1
	1	1	1	0.3333333	0.3333333	1	4242.3
Звездные точки	1	-1	0	0.3333333	-0.6666667	0	4679.4
	1	1	0	0.3333333	-0.6666667	0	5996.5
	1	0	-1	-0.6666667	0.3333333	0	4240.8
	1	0	1	-0.6666667	0.3333333	0	4195.5
Нулевая точка	1	0	0	-0.6666667	-0.6666667	0	5488.3

Рисунок 2 – Матрица планирования двухфакторного эксперимента  
в Microsoft Excel

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

Кодирование переменных неидеальной скорости детонации патронов ЭВВ  $d_n$  (мм) и  $\rho_{ЭВВ}$  (г/см<sup>3</sup>) в безразмерные факторы показано на рис. 3.

Реализация матрицы планирования экспериментов и расчет эмпирических коэффициентов приведены на рис. 4.

	Диаметр	Плотность
Интервал варьирования	13.60	0.20
Верхний звездный	50.80	1.33
Верхний уровень	50.80	1.33
Нулевой уровень	37.20	1.13
Нижний уровень	23.60	0.93
Нижний звездный	23.60	0.93

Рисунок 3 – Кодирование факторов двухфакторного эксперимента в Microsoft Excel

$x_0y$	$x_1y$	$x_2y$	$x_1^2y$	$x_2^2y$	$x_1x_2y$
3917.1	-3917.1	-3917.1	1305.7	1305.7	3917.1
4348.4	4348.4	-4348.4	1449.4667	1449.4667	-4348.4
2811.1	-2811.1	2811.1	937.03333	937.03333	-2811.1
4242.3	4242.3	4242.3	1414.1	1414.1	4242.3
4679.4	-4679.4	0	1559.8	-3119.6	0
5996.5	5996.5	0	1998.8333	-3997.6667	0
4240.8	0	-4240.8	-2827.2	1413.6	0
4195.5	0	4195.5	-2797	1398.5	0
5488.3	0	0	-3658.8667	-3658.8667	0
4435.4889	529.93333	-209.56667	-309.06667	-1428.8667	249.975
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
5213.8833	529.93333	-209.56667	-309.06667	-1428.8667	249.975

Рисунок 4 – Расчет коэффициентов модели двухфакторного эксперимента в Microsoft Excel

Проверка значимости полученных эмпирических коэффициентов для полученной двухфакторной модели расчета неидеальной скорости детонации патронированных ЭВВ проведена согласно данным работы [9]. Все полученные эмпирические коэффициенты оказались значимы. Поэтому был сделан переход от безразмерной кодированной модели к реальной модели расчета неидеальной скорости детонации патронированных ЭВВ, сенсублизованных полыми микросферами. Эта эмпирическая модель имеет следующий вид:

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

$$D = -39114.732 + 59.377d_n + 76264.647\rho_{\text{ЭВВ}} - 1.671d_n^2 - 35721.75\rho_{\text{ЭВВ}}^2 + 91.891d_n\rho_{\text{ЭВВ}}, \text{ м/с.} \quad (3)$$

Условия применимости данной эмпирической модели расчета скорости детонации ЭВВ определены диаметром патронов  $51 \geq d_n \geq 24$  и плотности ЭВВ  $1,33 \geq \rho_{\text{ЭВВ}} \geq 0,93$ .

Расчет скорости детонации патронированных ЭВВ по эмпирическому уравнению (3) показал достаточно хорошую воспроизводимость экспериментальных результатов определения скорости детонации ЭВВ в патронах диаметром 24...51 мм при плотности патронирования  $0,92 \dots 1,33 \text{ г/см}^3$ . Ошибка расчета  $D$  не превышает 5 % от экспериментального значения скорости детонации ЭВВ. Результаты расчета неидеальной скорости детонации ЭВВ в патронах различного диаметра и плотности патронирования показаны на рис. 5, а на рис. 1 они показаны на графиках зависимостей  $D=f(\rho_{\text{ЭВВ}})$  для диаметров патронов 25,4 и 50,8 мм в виде светлых точек.

dn, мм	25.4	50.8	25.4	25.4	50.8	25.4	50.8	25.4	50.8
$\rho_{\text{ЭВВ}}$ , г/см <sup>3</sup>	0.96	1.311	1.101	1.311	1.269	1.269	1.248	1.248	0.96
Код.фактор X1	-0.868	1.000	-0.868	-0.868	1.000	-0.868	1.000	-0.868	1.000
Код.фактор X2	-0.850	0.905	-0.145	0.905	0.695	0.695	0.590	0.590	-0.850
D, м/с	3851.55	4301.04	4553.21	2965.20	4772.66	3534.85	4961.20	3772.42	4368.05

Рисунок 5 – Результаты расчета скорости детонации ЭВВ по модели двухфакторного эксперимента в Microsoft Excel

Таким образом, удалось получить адекватную эксперименту математическую модель для расчета неидеальной скорости детонации патронированных ЭВВ, которая учитывает не только изменяющиеся параметры зарядов и патронов –  $d_n$  и  $\rho_{\text{ЭВВ}}$ , но и влияние взаимодействия этих факторов на скорость детонации заряда ЭВВ.

В дальнейшей работе сделано развитие полученной эмпирической модели расчета скорости детонации патронированных ЭВВ с учетом того, что может меняться состав ингредиентов эмульсионной матрицы, например, для предохранительных ВВ в ее состав вводятся соответствующие ингибиторы реакций окисления метана и угольной пыли, или сенсбилизация эмульсионных матриц ВВ может осуществляться различного рода и типа микросферами. С учетом этого была сделана корректировка эмпирических коэффициентов в модели (3), которая включала возможность изменения потенциальной энергии взрыва ЭВВ, его детонационной способности через критический диаметр детонации и параметров плотности патронов в зависимости от типа, дисперсности и фактической насыпной плотности полых микросфер. В общем новый вид эмпирической модели расчета неидеальной скорости детонации патронированных ЭВВ представляет собой следующее:

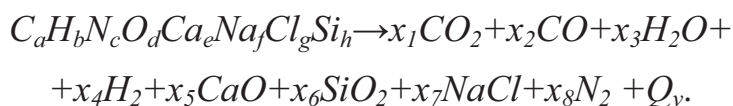
$$D = D_{1,2}(d_n; \rho_{\text{ЭВВ}}; d_n \rho_{\text{ЭВВ}}) \cdot F(Q_v; \varepsilon) \cdot \varphi_0(d_{\text{кр}}; C_u) \cdot \varphi_1(\rho_{\text{мс}}; r_{\text{мс}}), \text{ м/с}, \quad (4)$$

где  $F(Q_v; \varepsilon)$  – функция, учитывающая изменение удельной теплоты взрыва ЭВВ ( $Q_v$ ) за счет изменения его компонентного состава и ввода ингибиторов в виде конденсированной фазы с концентрацией  $\varepsilon$ , кг/кг;

$\varphi_0(d_{\text{кр}}; C_u)$  – функция, учитывающая изменение неидеальной скорости детонации ЭВВ в зависимости от критического диаметра ( $d_{\text{кр}}$ ) и концентрации в ВВ полых микросфер ( $C_u$ );

$\varphi_1(\rho_{\text{мс}}; r_{\text{мс}})$  – функция, учитывающая изменение критического диаметра детонации ЭВВ в зависимости от размера микросфер ( $r_{\text{мс}}$ ) и их фактической насыпной плотности ( $\rho_{\text{мс}}$ ).

В целом, функция  $F(Q_v; \varepsilon)$  зависит от состава ЭВВ, выражаемого общей брутто-формулой  $C_a H_b N_c O_d Ca_e Na_f Cl_g Si_h$ , и состава продуктов взрыва, если при детонации протекает следующая реакция разложения ВВ:



Удельная теплота взрыва ЭВВ определяется по закону Гесса как разность между теплотой образования продуктов детонации ЭВВ и его собственной теплотой образования, формируемой теплотой образования отдельных компонентов состава:

$$Q_v = \sum_{i=8}^i (q_i x_i) - \sum_{i=n}^i (q_i y_i)_{\text{ЭВВ}},$$

где  $q_i$  – теплота образования моля продуктов детонации ЭВВ или компонента его состава;

$x_i$  – число молей того или иного продукта реакции при детонации ВВ;

$y_i$  – число молей того или иного компонента в составе ЭВВ.

Продукты детонации  $CaO$  и  $NaCl$  представляют собой два известных ингибитора предохранительных ВВ, а  $SiO_2$  – продукт разрушения стеклянных микросфер. Их общее содержание в ЭВВ определяется концентрацией –  $\varepsilon$ .

Функция  $\varphi_0(d_{\text{кр}}; C_u)$  устанавливалась экспериментально по данным критического диаметра детонации заряда ЭВВ в зависимости от концентрации в нем микросфер.

Функция  $\varphi_1(\rho_{\text{мс}}; r_{\text{мс}})$  установлена на основании физико-химических исследований полых микросфер и опытных взрываний составов ЭВВ с теми или иными типами и видами микросфер.

На основании проведенных исследований получена математическая модель расчета неидеальной скорости детонации ЭВВ в патронах конечного диаметра в виде системы уравнений:



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

$$D = \left( -7134,53 + 10,83d_n + 13910,67\rho_{\text{ЭВВ}} - 0,3048d_n^2 - 6515,65\rho_{\text{ЭВВ}}^2 + 16,761d_n\rho_{\text{ЭВВ}} \right) \cdot \left( \frac{C_{ш}}{d_{кр}} \right)^\alpha \cdot \left[ 1 - \left( \varepsilon + \frac{C_{ш}}{100} \right) \right]^{0,5} \left[ Q_v \left( 1 - \frac{C_{ш}}{100} \right) \right]^{0,5} (C_{ш}r_{ш})^\beta, \text{ м/с}$$

$$\rho_{\text{ЭВВ}} = \frac{\rho_m \rho_{mc}}{C_{ш} \left( \frac{\rho_m - \rho_{mc}}{100} \right) + \rho_{mc}}, \text{ г/см}^3 \quad (5)$$

$$d_{кр} = \left[ \left( 0,0119 - 0,00988 \frac{\rho_{\text{ЭВВ}}}{C_m} \right) \right]^{-0,5048}, \text{ мм,}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – подгоночные коэффициенты модели для расчета скорости детонации патронов ЭВВ с учетом его критического диаметра детонации и типа применяемых микросфер;

$\rho_m$  – исходная плотность эмульсионной матрицы;

$\rho_{mc}$  – эффективная насыпная плотность микросфер;

$r_{ш}$  – размер микросфер (диаметр в мкм).

Реализация математической модели (5) расчета неидеальной скорости детонации ЭВВ в патронах конечного диаметра осуществлена на ЭВМ ПК в программе Microsoft Excel и представлена на рис. 6 для состава предполагаемого предохранительного ВВ.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Константы		Переменные					
2	A=	-7134.53	Ro м =	1.56				
3	B=	10.83	Ro ш =	0.205				
4	C=	13910.67	C ш =	5.21			D =	4429.8 м/с
5	E=	-0.3048	r ш =	95			Ro эвв =	1.160 г/см3
6	F=	-6515.65	d кр =	10.37			d кр =	10.372 мм
7	K=	16.761	Q эвв =	3110				
8	alfa=	0.52	d з =	36				
9	beta=	-0.311	Ro эвв =	1.16				
10			E вв =	0.1998				

Рисунок 6 – Автоматизация расчета параметров ЭВВ в Microsoft Excel

Таким образом, реализация полученной математической модели значительно облегчает выбор компонентов состава ЭВВ и позволяет проектировать его детонационные параметры без проведения трудоемких и сложных экспериментов.

**ВЫВОДЫ.** В работе получена эмпирическая математическая модель расчета неидеальной скорости детонации ЭВВ в патронах конечного диаметра, которая позволяет на стадии проектирования ВВ делать расчеты его скорости детонации и критического диаметра детонации, что существенно сокращает объем экспе-

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

риментальных исследований. Данная математическая модель может быть использована при разработке предохранительных ЭВВ для угольных шахт, так как позволяет делать расчет не только скорости детонации и критического диаметра, но и предсказывать необходимый уровень их предохранительных свойств по газу метану и угольной пыли.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Розробка і впровадження емульсійних вибухових речовин на кар'єрах в Україні / В.П. Купрін, І.Л. Коваленко. – Дніпропетровськ, 2012. – 242 с.
2. Колганов Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества / Е.В. Колганов, В.А. Соснин. – Кн. 1.– Дзержинск: ГОСНИИ «Кристалл», 2009. – 592 с.
3. Калякин Станислав. Безопасность взрывных работ в газоносных массивах угольных шахт. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing LAP LAMBERT, 2012. – 517 р.
4. Короткозамедленное взрывание в шахтах / Н.Г. Петров, Н.Л. Росинский. – М.: Недра, 1985. – 270 с.
5. Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев.– М.: Оборонгиз, 1960.– 595 с.
6. Lee J., Person P.A. Detonation behavior of emulsion explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 1990.– Vol. 15.– PP. 208–216.
7. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами / А.А. Дерibas, А.Е. Медведев, А.Ю. Решетняк, В.М. Фомин // Доклады РАН. – 2003. – Т. 389. – № 6. – С. 747–748.
8. Investigation of low detonation velocity emulsion explosives / V.V. Sil'vestrov, A.V. Plestinin // Combustion, Explosion and Shock waves. – 2009. – Vol. 45. – № 5. – PP. 618–626.
9. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаяев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романов.– М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

### MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF DETONATION SPEED OF CHARGED EMULSION EXPLOSIVES WHICH SENSIBILIZED WITH THE MICROSPHERES

**S. Kalyakin, R. Azamatov**

Donetsk state technical university

vul. Artyoma, 58, 83001, Donetsk, Ukraine. E-mail: yglenit@gmail.com

The researches of detonation velocity of emulsion explosives in cartridges are generalized in this article. The empirical mathematic model of calculation of non-ideal detonation velocity which grounded on local and foreign researches was determined. This model forecasts a detonation velocity and a critical diameter of detonation, and that is decreases quantity of experimental researches. Given model can be used during developing of preventive emulsion explosives for the coal mines.

**Key words:** velocity of detonation, matrix of emulsion, microspheres, sensitizer, critical diameter, mathematical model.

REFERENCES

1. Kuprin, V.P., Kovalenko, I.L. (2012) *Rozrobka i vprovadzhennya emulsiyних vibuhovih rechovin na kar'erah v Ukrayini* [Development and application of emulsion explosives in quarries in Ukraine], Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Kolganov, E.V., Sosnin, V.A. (2009) *Emulsiyonnyie promyshlennyye vzryivchatyye veschestva* [Emulsion industrial explosives], Book 1, GOSNII «Krystall», Dzerzhinsk, Ukraine.
3. Kalyakin, Stanislav (2012) *Bezopasnost vzryivnyih rabot v gazonosnyih massivah ugolnyih shaht* [Safety of explosive works in gas-bearing massif of coal mines], Palmarium Academic Publishing LAP LAMBERT, Saarbrücken, Germany.
4. Petrov N.G. *Korotkozamedlennoe vzryivanie v shahtah* [Short-delayed explosion in mines], Nedra, Moscow, USSR.
5. Andreyev, K.K., Belyaev, A.F. (1960) *Teoriya vzryivchatyyih veschestv* [Theory of explosives], Oborongiz, Moscow, USSR.
6. Lee, J., Person, P.A. (1990) “Detonation behavior of emulsion explosives”, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 15, pp. 208–216.
7. Deribas A.A., Medvedev, A.E., Reshetnyak, A.U., Fomin, V.M. (2003) “Detonation of emulsion explosives with empty microspheres”, *Thesis of RAN*, iss. 389, no.6, pp. 747–748.
8. Sil'vestrov, V.V., Plestinin, A.V. (2009) “Investigation of low detonation velocity emulsion explosives”, *Combustion, Explosion and Shock waves*, vol. 45, no. 5, pp. 618–626.
9. Zazhigayev, L.S., Kishyan, A.A., Romanov, U.I. (1978) *Metodyi planirovaniya i obrabotki rezultatov fizicheskogo eksperimenta* [Methods of planning and processing the results of physical experiment], Atomizdat, Moscow, USSR.

Стаття надійшла 13.11.2014.

УДК 661. 52: 662. 2

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПАТРОНИРОВАННЫХ  
ЭНЕРГОКОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ МАРКИ УКРАИНИТ**

**И. Л. Коваленко**

Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный  
химико-технологический университет»  
просп. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49000, Украина.  
E-mail: il-kovalenko@mail.ru

**В. П. Куприн**

ООО «Экком»  
ул. В. Дубинина, 69, г. Днепропетровск, 49000, Украина.  
E-mail: kuprinvp@mail.ru

**Д. В. Киященко**

ООО «Укрвзрывтехнология»  
пер. Краснознаменный, 4/ 1, г. Харьков, 61002, Украина.  
E-mail: kiyashenko@yandex.ua