

14. Рудько Г. І., Литвинюк С.Ф., Ловінюков В.І. Геолого-економічна оцінка вугільних родовищ України / Мінеральні ресурси України. – 2012 – № 3. – С. 23 – 28.
15. Гошовський С.В., Андрієвський І.Д., Андрієвський Є.І. та ін. Державне регулювання користування надрами / Під ред. С. В. Гошовського, І.Д. Андрієвського. К.: УкрДГРІ, 2012. – 386 с. укр.: іл.

*Стаття надійшла до редакції 24.01.2015 р.*

УДК 662.1+235

**В. Р. Закусило, к. т. н., А. Н. Романченко, асп., Р. В. Закусило, к. т. н.**  
(Шосткинський інститут Сумського державного університета)

### **ГЕТЕРОГЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ТИПА**

**V. R. Zakusylo, A. N. Romanchenko, R. V. Zakusylo** (Shostka institute of Sumy State University)

### **HETEROGENEOUS EXPLOSIVE COMPOSITIONS TYPE OF PYROTECHNIC**

*Представлены результаты исследований взрывчатого состава на основе перхлората калия с дизельным топливом. Установлено влияния катализаторов на снижение температуры разложения перхлората калия, что обеспечивает и снижение энергии активации процесса. Показано, что изменением дисперсности перхлората калия можно регулировать взрывчатые характеристики состава: скорость детонации и критический диаметр детонации.*

**Ключевые слова:** взрывчатый состав, перхлорат калия, катализатор, термическое разложение, взрывчатые характеристики.

*Представлені результати досліджень вибухового складу на основі перхлорату калію з дизельним паливом. Встановлено вплив каталізаторів на зниження температури розкладу перхлорату калію, що забезпечує зниження енергії активації процесу. Показано, що зміною дисперсності перхлорату калію можливо регулювати вибухові характеристики складу: швидкість детонації та критичний діаметр детонації.*

**Ключові слова:** вибухова суміш, перхлорат калію, каталізатор, термічний розклад, вибухові характеристики.

*The article presents the results of investigations of the explosive composition on the basis potassium perchlorate with diesel fuel. The influence of catalysts on lowering the decomposition temperature of potassium perchlorate, which provides reduction in the activation energy of the process. It is shown that the change in dispersion of potassium perchlorate can be controlled explosive characteristics of the detonation velocity and critical diameter of detonation.*

**Keywords:** explosive composition, potassium perchlorate, the catalyst, the thermal decomposition, characteristics of explosives.

**Вступление.** Известно, что смесь горючего с окислителем является основой любого пиротехнического состава [1]. Однако основной формой химического превращения пиротехнических составов является горение. Для выполнения некоторых промышленных взрывных работ, например, для отбойки блочного декоративного камня, необходимы взрывчатые составы с низкими значениями скорости детонации, критического диаметра, теплоты взрыва и малым объемом газообразных продуктов взрыва. Одним из направлений разработки взрывчатых составов с такими характеристиками является применение пиротехнических соединений. При выборе окислителя были рассмотрены: нитраты, хлораты, перхлораты, которые широко используются в различных пиротехнических составах и твердых ракетных топливах.

Из рассмотренных пиротехнических окислителей  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ,  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{KClO}_4$  и т.д. наибольший интерес представляет перхлорат калия (ПХК). Перхлорат калия  $\text{KClO}_4$  (хлорнокислый калий) относится к числу очень сильных окислителей, он имеет кислородный баланс плюс 46%. В отличие от почти всех окислителей ПХК имеет низкую растворимость в воде, она составляет 2,03 г на 100 г воды при 25 °С. Перхлорат калия имеет высокую плотность 2,5 кг/м<sup>3</sup>, отличается низкой гигроскопичностью и слеживаемостью.

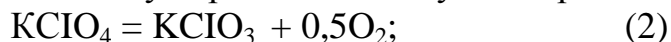
Однако ПХК разлагается с крайне малым выделением тепла (0,6 кДж/моль) поэтому взрывчатое разложение в составах с  $\text{KClO}_4$  возникает и распространяется с большим трудом [2]. Даже при сжигании ПХК в больших объемах (до 100кг) перехода горения в детонацию не наблюдается. ПХК не способен к горению без горючего. При разложении ПХК выделяет 300 л/кг газообразных продуктов. В качестве горючего планировали применять дизельное топливо.

**Цель работы.** Исследование влияния катализаторов разложения перхлората калия на взрывчатые характеристики гетерогенной системы: перхлорат калия – дизельное топливо.

**Результаты исследований.** Термическое разложение перхлората калия начинается ниже температуры его плавления 525°С и происходит через образование хлората калия как промежуточного продукта реакции. Суммарное разложение ПХК описывается уравнением:



Считается, что одновременно могут протекать следующие реакции:



Для улучшения разложения ПХК необходимы катализаторы, в качестве которых применяют оксиды практически всех металлов. В работах [3,4] исследовано влияние некоторых оксидов металлов  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , применяемых в качестве катализаторов, ускоряющих разложение ПХК. С помощью дифференциального анализа установлено, что исследуемые катализаторы снижают температуру разложения ПХК от 80 до 100° С.

Проведены исследования по установлению количества катализатора, вводимого в состав, обеспечивающего снижение температуры разложения ПХК.

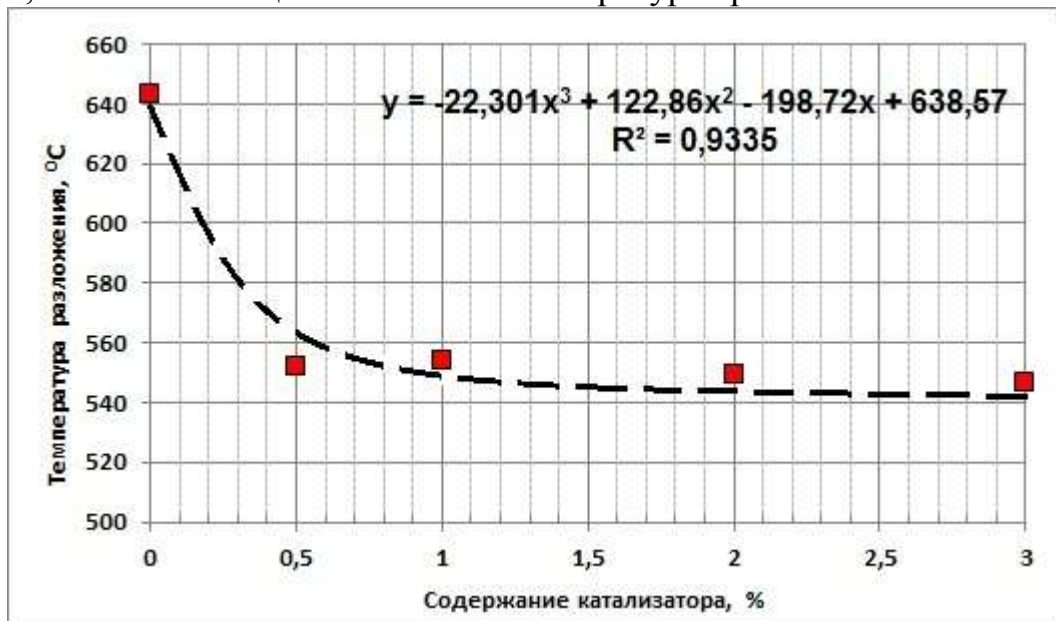


Рис. 1. Зависимость температуры разложения ПХК от содержания катализатора

Экспериментально установлено, что для каталитического воздействия достаточно применять 0,5% катализатора к массе ПХК. При этом перхлорат калия и особенно катализатор должны иметь высокую степень дисперсности и быть тщательно смешаны. Катализаторы снижают не только температуру разложения ПХК, но и энергию активации. Энергия активации представляет собой минимальное количество энергии, которое требуется сообщить системе, чтобы прошла реакция. Определение кинетических параметров термического разложения ПХК с катализаторами осуществляли на основе динамического термогравиметрического анализа, который дает возможность рассчитать эффективные значения порядка константы скорости превращения и энергии активации в соответствии с уравнением Аррениуса:

$$K = Z \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \text{ где:} \quad (4)$$

$Z$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_a$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура.

Для обработки результатов термогравиметрического анализа применяли метод Фримена и Кэррола. Авторами данной статьи [2] было определено, что энергия активации ПХК без катализатора составляет  $22,01 \times 10^{-3}$  кДж/моль, при добавлении 0,5% оксида марганца значение энергии активации снижается до  $9,13 \times 10^{-3}$  кДж/моль, при этом значения констант скорости составляют 1,15 и 0,49 соответственно. Таким образом, введение катализаторов разложения снижает энергию активации практически в два раза.

При определении взрывчатых характеристик состава на основе ПХК без катализаторов с горючим дизельным топливом устойчивой детонации при иницировании электродетонатором ЭД-8 получить не удалось. При

использовании ПХК с катализаторами разложения  $MnO_2$  или  $MgO$  в количестве 0,5% и 5% дизельного топлива состав надежно детонирует от электродетонатора ЭД-8. Критический диаметр детонации пиротехнического состава определяли экспериментально методом конуса (в бумажной оболочке) с углом раскрытия  $5^\circ$ . ПХК применяли с дисперсностью 100 мкм, 200 мкм, 315 мкм и 400 мкм, катализаторы просеивали через сито 80 мкм. Состав состоял из 84,5% ПХК, 0,5% катализатора и 5% дизельного топлива. Скорость детонации определяли в бумажных или пластмассовых цилиндрах диаметром 40 мм и длиной 200 мм методом Дотриша. Инициирование проводили электродетонатором ЭД-8. Результаты определения взрывчатых характеристик представлены в таблице 1.

Таблица 1. Взрывчатые характеристики пиротехнического состава

Дисперсность ПХК, мкм	Критический диаметр детонации, мм	Скорость детонации, м/с
100	5	1660
200	18	1800
315	19	1986
400	20	2060

Из таблицы следует, что дисперсность ПХК имеет большее влияние на критический диаметр детонации, чем на скорость детонации.

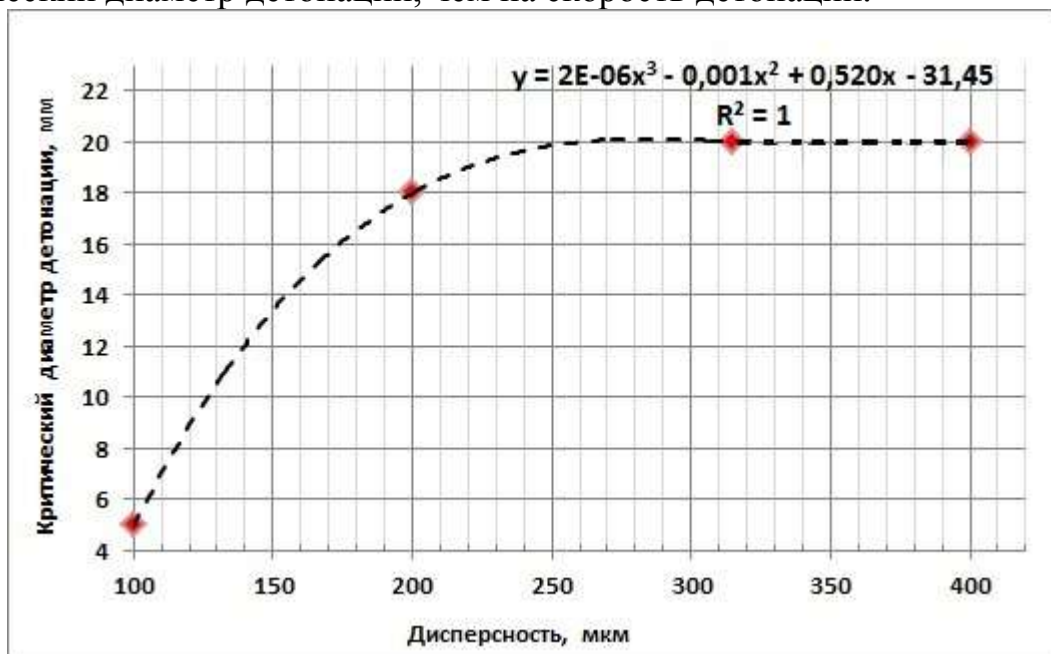


Рис. 2. Зависимость критического диаметра детонации от дисперсности ПХК

В зависимости от дисперсности ПХК от 100 мкм до 400 мкм критический диаметр детонации состава изменялся от 5 мм до 20 мм. Скорость детонации

составила от 1,660 м/с до 2060 м/с соответственно. Погрешность измерения скорости детонации  $\pm 10$  м/с.

Дисперсность катализатора разложения ПХК во всех образцах составляла 80 мкм, концентрация 0,5%. Тщательное перемешивание высокодисперсных ПХК (100 мкм) и катализатора обеспечивает хороший контакт между ними и полноту химической реакции разложения ПХК. Горючий компонент дизельное топливо полностью впитывается компонентами, обеспечивая их тесный контакт. Это способствует более полному протеканию химической реакции разложения состава с высокой дисперсностью ПХК и поэтому критический диаметр детонации такого состава минимальный. Учитывая низкую пористость такого состава, скорость детонации образца с высокодисперсным ПХК будет ниже, чем у образца с крупными частицами ПХК. Крупные частицы ПХК в составе не обеспечивают тесного контакта между собой и катализатором, при этом он будет иметь повышенную пористость. Имеющиеся пустоты могут служить горячими точками при взрыве, потому состав с крупным ПХК имеет несколько повышенную скорость детонации в сравнении с составом на основе высокодисперсного ПХК.

Оптимальное содержание горючего компонента дизельного топлива (ДТ) составляет 5- 6%, при этом сохраняется физическая стабильность состава без стекания ДТ вниз заряда. Увеличение содержания горючего дизельного топлива до 10-12% несколько снижает его физическую стабильность и не привит к снижению критического диаметра детонации и увеличению скорости детонации. Критический диаметр детонации образца (дисперсность ПХК 400 мкм) с 10% дизтоплива оставался на уровне образца с 5% ДТ – 19-20 мм, скорость детонации при этом тоже сохранилась на отметке 2,0 км/с.

Расчетные характеристики состава ПХК с 5% дизельного топлива: кислородный баланс – 29,7; теплота взрыва – 1027 кДж/кг; температура взрыва – 1295 К; объем газообразных продуктов – 319 л/кг; скорость детонации – 1712 м/с.

Состав и количество газообразных продуктов, выделяющихся при взрыве пиротехнического состава (84,55% ПХК, 0,5% катализатор, 5% дизтопливо) определяли расчетным путем с помощью программы «Астра» «Моделирование химических фазовых равновесий при разных температурах». Основными продуктами взрыва, не зависимо от применяемого катализатора, являются: кислород 6,92%, КСИ 6,7 - 6,8% и катализатор - оксид металла, который не участвует в реакции взрыва. Кроме того, образуется 3,95 % водяного пара и 4,05% двуокиси углерода.

Пиротехнические заряды применяются для отбойки блочного камня, при этом диаметр шпуров составляет от 36 – 42 мм, а длина около 2 м. Известно, что при применении удлиненных зарядов малого диаметра насыпной плотности возможно затухание детонации, что может быть связано с канальным эффектом, т. е. уплотнением взрывчатого вещества впереди фронта детонации ударной волной [5]. Для установления детонационной способности удлиненного пиротехнического заряда проведены испытания состава

состоящего из 94,5% ПХК дисперсностью 200 мкм, 0,5% катализатора  $Fe_2 O_3$  и 5% дизельного топлива. Диаметр заряда равнялся 40 мм, длина 1000 мм. Скорость детонации измеряли на начальном участке удлиненного заряда на расстоянии 80 мм от торца с базой измерения 80 мм и в конце заряда (от 820 мм до 900 мм) с базой 80 мм. Инициирование осуществляли электродетонатором ЭД-8. Скорость детонации на начальном участке заряда составила 1800 м/с, а в конечной части заряда она повысилась на 20% до 2160 м/с. Повышение скорости детонации в конце заряда предположительно связывалось с уплотнением заряда по длине ударной волной.

Для выяснения этого предположения проведено измерение насыпной плотности пиротехнического заряда с утряской и с уплотнением деревянным цилиндром. Насыпная плотность заряда с утряской составила  $1,04 \text{ г/см}^3$ , а подпрессованного –  $1,14 \text{ г/см}^3$ . При испытании уплотненного заряда получено значение скорости детонации 2100 м/с. Это подтверждает механизм уплотнения взрывчатого состава удлиненных зарядов впереди фронта детонации. Точно определить степень этого уплотнения при взрыве не представляется возможным, но ясно, что величина уплотнения заряда в данном случае способствует повышению скорости детонации и не приводит к затуханию детонации.

### Выводы

Разработана рецептура гетерогенного взрывчатого состава пиротехнического типа на основе окислителя перхлората калия и дизельного топлива как горючего. Исследовано влияние катализаторов оксидов металлов на снижение температуры разложения ПХК и снижение энергии активации процесса его разложения, что обеспечило надежную работу состава от штатного средства инициирования – электродетонатора ЭД-8. Показана возможность регулирования скорости детонации и критического диаметра детонации за счет изменения дисперсности перхлората калия. Установлено, что при детонации удлиненного заряда взрывчатого состава происходит его уплотнение ударной волной, что приводит к повышению скорости детонации в конце заряда. Затухание детонации при этом не происходит. Учитывая малые значения критического диаметра детонации и скорости детонации, разработанные заряды рекомендуется использовать при отбойке блочного камня. Так как при взрыве пиротехнических зарядов выделяется значительное количество  $KCl$ , который является ингибитором воспламенения метана, планируется проведение испытаний разработанного состава на предохранительные свойства.

### Список использованных источников

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский – М: Машиностроение, 1973. – 320с.

2. Zakusylo V. Potassium perchlorate – the component of the loshh-speed ehplosive composition/ V.Zakusylo, A. Romanchenko – Metallurgical and Mining Industry, Dnepropetrovsk, 2014. – №4. – S. 64-70.

3. Закусило В. Р. Влияние катализаторов на термическое разложение перхлората калия и взрывчатые характеристики составов на его основы / В. Р. Закусило, А. Н. Романченко, Р. В. Закусило. Вісник Кременчутського національного університету. – Кременчук: КДПУ, 2013. – Вип. 5/2013(82). – С. 103 -107.

4. Zakusylo V.R., Efymenko A. A., Romanchenko A.N. Patent 68559 U Ukraine МРК6 С06В31/28. Ehplosive composition, № u 2011 12120; applied 17.10.2011; publ. 26.03.2012, bul. No.

5. Дубнов Л. Б. Исследование канального эффекта при детонации некоторых промышленных взрывчатых веществ / Л. Б. Дубнов, Л. Д. Чотина. Взрывное дело, Сборник 52/9. Промышленные взрывчатые вещества. Госгортехиздат, 1963. – С. 168 – 179.

*Статья поступила в редакцию 10.03.2015 г.*

УДК 620.9: 622.3

**В. Г. Кравець**, докт. техн. наук, професор (НТУУ «КПІ»), **О. А. Темченко**, докт. техн. наук, професор, **Г. В. Темченко**, канд. екон. наук, ст. викл ДВНЗ «Криворізький національний університет», **Я. Тайєб-Тамаша**, студ. (КНЭУ)

### **ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ ПРОГРАМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

**V. G. Kravets** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»), **O. A. Temchenko**, **H. V. Temchenko**, («National University of Kryvyi Rih»), **J. Taieb-Tamash** (Kyiv National Economic University)

### **ECONOMIC AND TECHNOLOGICAL BACKGROUND OF ENERGY EFFICIENCY PROGRAM FORMATION AT MINING ENTERPRISES**

*Досліджено економіко-технологічні передумови впровадження енергозберігаючих заходів на основних операціях процесу видобутку та переробки корисної копалини на гірничо-збагачувальних підприємствах, що дозволить зменшити матеріало- та енергомісткість кінцевої продукції та підвищити її конкурентні переваги у відповідності до сучасних вимог ринку залізорудної сировини.*

**Ключові слова:** гірничорудні підприємства, програма енергозбереження, критерії ефективності.

*Исследованы экономико-технологические предпосылки внедрения энергосберегающих мероприятий на основных операциях процесса добычи и переработки полезного ископаемого*