

УДК 622.812:622.235.222:622.817

С. А. Калякин

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Украина

## Определение критических параметров ударных волн при взрыве заряда ВВ, вызывающих воспламенение метановоздушной смеси

В работе определены критические параметры ударных волн, вызывающие воспламенение МВС при детонации в ней зарядов ВВ. Установлено, что ВВ, содержащие в составе соли-ингибиторы метана, воспламеняют МВС ударными волнами, имеющими более высокие параметры во фронте ударной волны, чем у предохранительных ВВ.

Ключевые слова: ударная волна, детонация.

**Вступление.** Предохранительные взрывчатые вещества (ПВВ) применяются в опасных по газу и взрывам угольной пыли условиях угольных шахт. Они отличаются от предохранительных ВВ наличием в составе специальных солей-ингибиторов реакции окисления метана кислородом воздуха, способных при взрыве заряда ингибировать большие объемы метановоздушной смеси (МВС). Однако до настоящего времени не исследовано влияние солей-ингибиторов на параметры ударных волн, вызывающих воспламенение МВС при взрыве в ней открытого заряда ПВВ.

**Анализ предыдущих исследований.** В ранее проведенных работах предложен механизм воспламенения МВС ударной волной на основе сопоставления необходимых условий для воспламенения взрывоопасной смеси с параметрами ударных волн, образованных в ней детонирующим зарядом ПВВ. Эти исследования выдвинули ударную волну на место наиболее вероятного источника воспламенения МВС при взрыве в ней заряда ПВВ. Однако известно, что при определенной концентрации ингибитора в МВС происходит прекращение ее горения и детонации и воспламенение метана ударными волнами при взрыве заряда ПВВ не произойдет. Таким образом, определение параметров ударных волн вызывающих при взрыве ПВВ воспламенение МВС с учетом ее ингибирования солями, входящими в состав ВВ является очень важным для решения проблемы безопасности взрывных работ в шахтах.

**Целью работы** является исследование критических параметров ударных волн, вызывающих воспламенение МВС при взрыве в ней заряда ПВВ, продукты детонации которого содержат соли-ингибиторы реакции окисления метана.

**Материалы и результаты исследований.** Определение начальных параметров ударных волн (УВ) в газообразной среде при детонации в ней заряда ВВ представляет собой достаточно сложную задачу. В работах [1,2] Л. Д. Ландау, К. П. Станюковича и Ф. А. Баума дается решение, которое позволяет определять параметры ударной волны вблизи поверхности заряда ВВ, в зависимости от давления детонации ВВ –  $P_H$ , скорости его детонации –  $D$  и скорости истечения продуктов детонации в воздух  $W_D$ . Тогда отношение давления во фронте ударной волны –  $P_x$  к давлению детонации ВВ на границе раздела «ВВ – газообразная среда» можно определить по формуле:

$$\frac{P_x}{P_H} = \frac{\rho_e (\gamma_a + 1) \cdot (n + 1)}{2\rho_{ВВ}} \cdot \left(\frac{W_D}{D}\right)^2, \quad (1)$$

где  $\rho_e, \rho_{ВВ}$  – плотность воздуха и ВВ соответственно;

$n$  – показатель политропы продуктов детонации ВВ;

$\gamma_a$  – показатель адиабаты воздуха с учетом его ионизации,  $\gamma_a \approx 1,2$ .

В работе [2] римановское решение доводится до конца, рассматривая отдельно обе части уравнения, описывающего расширение продуктов детонации и взрыва ВВ, и связывая решения в точке их сопряжения. Таким образом, имеем решение, позволяющее оценить в характерном для

этого случая интервале расширения скорость истечения продуктов детонации ВВ в газообразную среду:

$$\frac{3n-1}{n^2-1}D \leq W_D \leq \frac{3n-1}{n^2-1}D + \frac{2C_K}{k-1}, \quad (2)$$

где  $C_K$  – скорость звука в точке сопряжения продуктов взрыва и продуктов детонации (ПД) ВВ;  
 $k$  – показатель адиабаты продуктов взрыва ВВ.

Уравнение (2) позволяет приближенно определить значение скорости истечения продуктов детонации ВВ в этом интервале. Тогда среднее значение скорости истечения можно найти из уравнения:

$$W_{Dcp} = \frac{3n-1}{n^2-1}D + \frac{C_K}{k-1}, \text{ м/с.} \quad (3)$$

В соответствии с работой [2], значение скорости звука в продуктах взрыва ВВ равно:

$$C_K = \frac{D}{n+1} \left( \frac{P_K}{P_H} \right)^{\frac{n-1}{2n}}, \quad (4)$$

где  $P_K$  – давление продуктов взрыва ВВ в точке сопряжения ударных адиабат.

Метод расчета давления продуктов взрыва ВВ в точке сопряжения дан в работе [3]. Известным методом (метод «аквариума») были определены параметры детонации зарядов промышленных ВВ II...VII классов. Это позволяет по уравнениям (1)...(4) рассчитать начальные параметры ударных волн в воздухе при взрыве зарядов промышленных ВВ. Результаты расчета приведены в табл. 1. Он сделан с учетом того, что продукты взрыва ПВВ содержат 20..40% соли-ингибитора. Поэтому показатель адиабаты продуктов взрыва ( $k$ ) у ПВВ может быть меньше, чем у непрехохранительных ВВ, имеющих состав продуктов взрыва, не содержащий конденсированных частиц ингибитора.

Табл. 1. Начальные параметры ударных волн в воздухе при взрыве ВВ

ПВВ	Класс ВВ	Параметры детонации ВВ					Параметры истечения ПД в газовую среду		Предельный заряд в МВС, кг
		$\rho_{ВВ}$ , кг/м <sup>3</sup>	D, м/с	n	k	$P_H$ , Па	$W_{Dcp}$ , м/с	$P_x$ , Па	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аммонит № 6ЖВ	II	1050	4204	2,24	1,19	$5,73 \cdot 10^9$	8197,2	$9,054 \cdot 10^7$	~ 0,010
Аммонит Т-19	IV	1050	4176	2,26	1,165	$5,576 \cdot 10^9$	7448,05	$7,475 \cdot 10^7$	~ 0,025
Угленит Э-6	V	1220	2224	2,05	1,195	$1,978 \cdot 10^9$	5758,57	$4,468 \cdot 10^7$	~ 0,25
Угленит 13П	V	1200	2318	2,09	1,145	$2,087 \cdot 10^9$	5805,8	$4,542 \cdot 10^7$	~ 0,20
Угленит 12ЦБ	VI	1300	1927	2,23	1,13	$1,495 \cdot 10^9$	4590,77	$2,8399 \cdot 10^7$	~ 1,2
Угленит 10П	VI	1250	1985	2,35	1,15	$1,47 \cdot 10^9$	4752,52	$3,049 \cdot 10^7$	~ 1,0
Ионит	VII	1170	1676	2,21	1,13	$1,024 \cdot 10^9$	4417,07	$2,629 \cdot 10^7$	~ 1,5

Расчеты показывают, что начальные значения параметров воздушных ударных волн ПВВ II...VII классов тем больше, чем больше их скорость детонации и энергия взрыва. Для ПВВ II...IV классов, имеющих высокую скорость детонации, начальные параметры ударных волн в воздухе или весьма близкой к нему 9,0%-ной МВС имеют очень большие значения, например, в 50...60 раз выше, чем давление во фронте детонационной волны МВС. Высокопрехранительные ВВ V...VII классов образуют при взрыве менее интенсивные ударные волны, однако и их параметры превышают параметры детонации МВС в 17,0...29,5 раз. Эти результаты показывают, что, если бы основным источником воспламенения МВС являлись бы ударные волны, то воспламенение метана происходило бы при взрыве любых ВВ. Вместе с тем, мы наблюдаем, что одни ВВ легко

воспламеняют МВС и имеют малый предельный заряд, а другие, наоборот, с трудом ее воспламеняют и имеют большой предельный заряд. Так, если сравнить аммонит Т-19 и ионит, то получается, что давление в образованных этими ВВ ударных волнах отличается в 2,84 раза, тогда как масса предельных свободноповешенных зарядов при взрыве в МВС отличается в 60 раз. Это указывает на то, что начальные параметры ударных волн, образованных при взрыве зарядов ПВВ в МВС, не всегда следует рассматривать как критерий их антигризутности. Для уточнения механизма воспламенения МВС открытым детонирующим зарядом ПВВ были проведены исследования, которые базируются на результатах, полученных в работах [4,5].

В работе [4] В.В. Адушкин получил эмпирические уравнения, которые позволяют определить избыточное давление –  $\Delta P_\phi$  во фронте воздушной ударной волны, скорость разлета продуктов детонации ВВ (ПД) –  $W_u$  и радиус сферы продуктов взрыва, начиная с момента выхода детонационной волны на поверхность сферического заряда до момента достижения радиуса  $R = (10 \dots 15)r_3$ , где  $r_3$  – радиус заряда ВВ. В своей работе [5] автор получил значение коэффициента  $a_y$ , который определяет часть потенциальной энергии взрыва, передаваемую при детонации открытого заряда ПВВ ударной волне. Этот коэффициент зависит от содержания ингибитора в составе ВВ и его скорости детонации. Для зарядов ПВВ с низкой скоростью детонации коэффициент  $a_y = 0,45 \dots 0,55$ , а с высокой  $a_y = 0,89 \dots 0,95$ . Воспользуемся этими результатами для преобразования эмпирических зависимостей, полученных для зарядов из тэна в работе [4]. При определении избыточного давления во фронте ударной волны и скорости разлета продуктов детонации открытых зарядов ПВВ вводим в эти уравнения коэффициент, учитывающий энергетическое подобие между ВВ, и коэффициент  $a_y$ . В результате преобразования уравнений, полученных в работах [4,5], имеем:

$$\Delta P_\phi = \frac{63549,886(\rho_{ВВ} \cdot E_n \cdot a_y)^{0,46}}{(R/r_3)^{1,38}}, \text{ Па}, \quad (5)$$

$$W_u = \frac{284,806(\rho_{ВВ} \cdot E_n)^{0,2165} \cdot (1 - \varepsilon)^{0,5}}{(R/r_3)^{0,65}}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

где  $E_n$  – потенциальная расчетная удельная энергия взрыва ВВ, кДж/кг;

$\varepsilon$  – относительное удельное содержание в 1 кг ВВ конденсированной фазы в виде соли-ингибитора, кг/кг.

Критические размеры безопасной воздушной оболочки вокруг заряда, через которую не передается детонация от ВВ к МВС, были установлены экспериментально, путем взрывания зарядов ПВВ в опытном штреке с взрывчатой МВС (9...10%  $\text{CH}_4$ ). В штреке подвешивали заряды ВВ разной массы, которые были отделены от взрывной камеры, заполненной МВС, воздушной оболочкой с известными размерами. В отдельных случаях штрек заполнялся МВС до устья, а заряды ВВ взрывали в воздухе. Согласно методике экспериментальной работы, предложенной проф. Шевцовым Н.Р., были установлены размеры воздушной оболочки, при которой взрываемый заряд в 10 опытах не вызывал воспламенение МВС, и размер оболочки, при которой происходили воспламенения. Средний размер воздушной оболочки в этих опытах рассматривали как критический и использовали его в уравнениях (5) и (6) для расчета критических параметров ударных волн. Экспериментальные и расчетные данные этих опытов приведены в табл. 2. В расчетах учитывали тот факт, что часть энергии взрыва ПВВ расходуется на нагрев и разгон частиц соли-ингибитора до скорости расширяющихся газообразных продуктов взрыва. Для того чтобы это учесть в уравнение (6) был введен коэффициент  $(1 - \varepsilon)$  степень при котором подобрали исходя из предположения, что соль-ингибитор и газообразные продукты взрыва находятся в термодинамическом равновесии и имеют максимальную скорость расширения при взрыве. Известно, что скорость расширения продуктов взрыва ПВВ зависит в большей степени от его энергии взрыва чем от скорости детонации, так как предохранительные ВВ имеют неидеальный режим детонации. Скорость неидеального режима детонации ПВВ зависит от содержанием в составе ВВ сенсibilизатора и его детонационной способности.

Таблица 2 – Критические параметры воздушных оболочек вокруг зарядов ВВ и ударных волн в них при воспламенении МВС

Тип ВВ	Класс	Приведенный радиус заряда ВВ, $r_z$ , м	Критический радиус оболочки, $R$ , м	$\frac{R}{r_z}$	Начальные параметры ударной волны (УВ)		Критические параметры УВ для МВС	
					давление, $\Delta P_\phi$ , Па	скорость истечения ПД, $W_n$ , м/с	давление, $\Delta P_\phi$ , Па	скорость, $D_y$ , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тротил	I	0,03581	1,3	36,303	$7,5946 \cdot 10^7$	7024,9	$5,343 \cdot 10^5$	805,7
Аммонит № 6ЖВ	II	0,03581	0,65	18,151	$6,9044 \cdot 10^7$	7851,3	$1,264 \cdot 10^6$	1153,8
-//-	-//-	0,0451	0,88	19,512	-//-	-//-	$1,1442 \cdot 10^6$	1103,4
-//-	-//-	0,0516	1,05	20,3488	-//-	-//-	$1,08 \cdot 10^6$	1076,0
Детонит 10А	II	0,0343	0,78	22,7405	$8,293 \cdot 10^7$	7968,3	$1,1126 \cdot 10^6$	1090,0
Детонит 10А	II	0,04315	0,95	22,016	$8,293 \cdot 10^7$	7968,3	$1,163 \cdot 10^6$	1111,5
-//-	-//-	0,05435	1,2	22,079	-//-	-//-	$1,159 \cdot 10^6$	1109,5
Аммонал скальный № 1	II	0,03581	0,95	26,529	$8,208 \cdot 10^7$	7950,9	$8,91 \cdot 10^5$	990,7
Аммонит ПЖВ-10	III	0,04099	0,6	14,6377	$6,597 \cdot 10^7$	7260,6	$1,6255 \cdot 10^6$	1289,7
-//-	-//-	0,0591	1,0	16,92	-//-	-//-	$1,331 \cdot 10^6$	1179,3
Аммонит ПЖВ-20	IV	0,0358	0,43	12,0112	$6,2744 \cdot 10^7$	6668,1	$2,031 \cdot 10^6$	1427,5
-//-	-//-	0,041	0,58	14,1463	-//-	-//-	$1,621 \cdot 10^6$	1287,9
-//-	-//-	0,0591	0,95	16,0744	-//-	-//-	$1,359 \cdot 10^6$	1190,1
Угленит Э-6	V	0,0599	0,375	6,204	$4,5895 \cdot 10^7$	5660,8	$3,651 \cdot 10^6$	1877,4

Скорость ударной волны, входящей в МВС из воздушной оболочки, окружающей заряд ВВ, определяли по уравнению, полученному в результате обработки табличных данных работы [1]:

$$D_y = 315,4 \cdot \left(1,46245 + \frac{\Delta P_\phi}{P_a}\right)^{0,49305}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление воздуха, Па.

Температуру МВС во фронте ударной волны определяли по формуле, полученной в работе [6]:

$$T_\phi = T_0 + T_y,$$

где  $T_y = \frac{2D_y^2}{C_p(T)} \cdot \frac{k}{(1+k)^2}$  – ударное приращение температуры МВС во фронте волны, °К;

$T_0$  – начальная температура МВС, °К;

$C_p(T)$  – молярная теплоемкость МВС при постоянном давлении в диапазоне температур ( $T_0 \dots T_y$ );

$k$  – отношение теплоемкостей  $C_p(T)/C_v(T)$ .

На рис. 1 показана зависимость температуры МВС в ударном фронте от скорости волны.

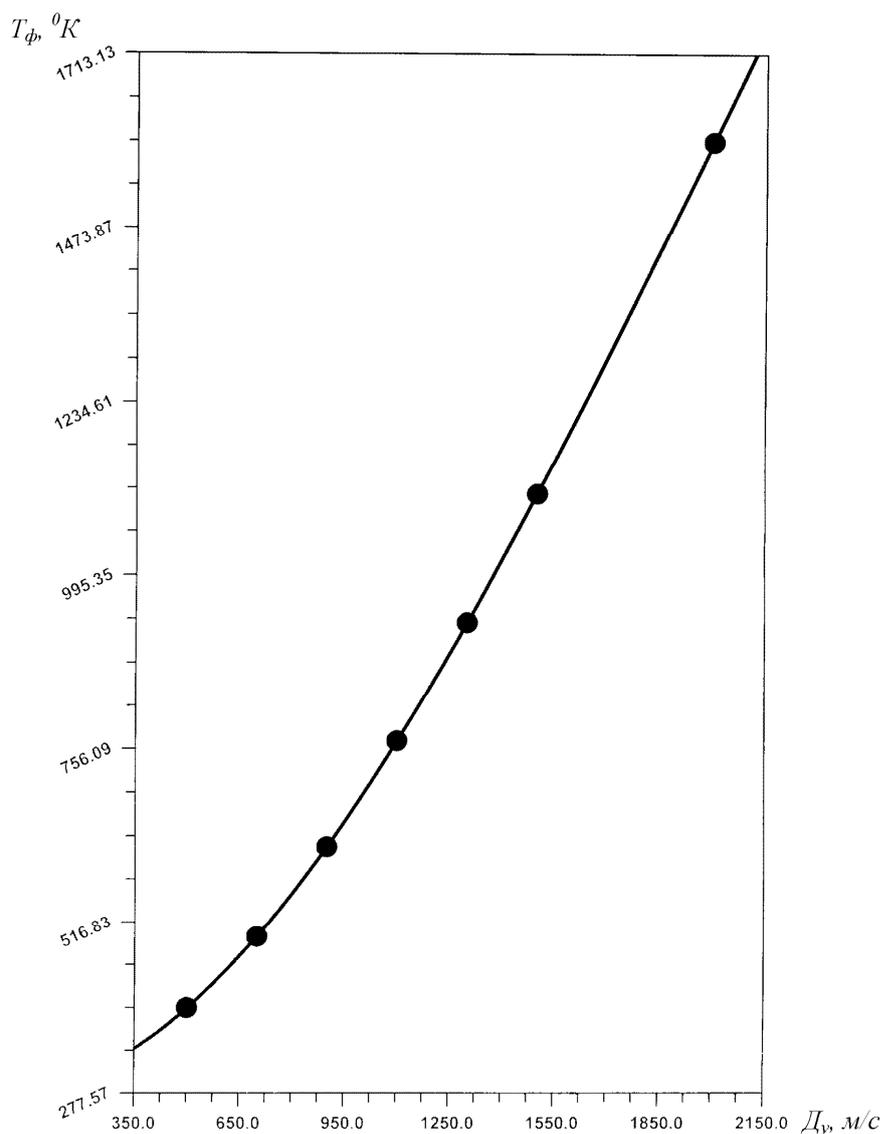


Рис. 1. График зависимости температуры МВС во фронте ударной волны от ее скорости

Анализ экспериментальных и расчетных данных, приведенных в табл. 2, показал следующее. Имеется хорошее совпадение результатов расчета начального давления во фронте ударной волны на границе раздела «заряд-воздух» и скорости истечения продуктов детонации ВВ в воздух с экспериментальными данными и расчетом по эмпирическим зависимостям, полученным в работах [4,5]. Это позволяет утверждать, что критические параметры ударных волн для МВС, полученные для каждого типа ВВ, являются достоверными и сравнимыми между собой, что поможет установить интересующую нас зависимость критических параметров УВ, воспламеняющих МВС, от типа взрывааемых в ней ВВ (непредохранительные и ПВВ).

Непредохранительные ВВ II класса являются сбалансированными по кислороду взрывчатыми смесями. Продукты взрыва этих ВВ, как правило, состоят из высших окислов горючих элементов. В эксперименте аммонит № 6ЖВ, детонит 10А и аммонал скальный № 1 (прессованный) имели при взрыве практически одинаковые критические параметры ударных волн, необходимые для воспламенения МВС:  $\Delta P_\phi = (0,9 \dots 1,1) \cdot 10^6$  Па. Совсем другая картина наблюдалась при взрыве зарядов тротила, имеющего резко отрицательный кислородный баланс. Продукты взрыва этого ВВ состоят, в большей части, из продуктов неполного окисления горючих элементов. Поэтому при взрыве они дают в смеси с воздухом вторичное пламя, которое, как видно из эксперимента, сильно снизило критические параметры ударных волн, необходимые для воспламенения МВС:  $\Delta P_\phi = 5,3 \cdot 10^5$  Па, что примерно в два раза меньше, чем у ВВ II класса. Противоположным действием тротила на МВС в экспериментах было действие ПВВ, которые, как

известно, сбалансированы по кислороду и содержат в своем составе соль-ингибитор реакции окисления метана. Для зарядов ПВВ III...V классов было установлено, что чем больше в их составе ингибитора, тем выше критические параметры ударных волн, необходимые для воспламенения МВС. На рис. 2 показан график зависимости критического давления во фронте ударной волны, воспламеняющей МВС, от содержания ингибитора в продуктах взрыва ПВВ. Данная зависимость описывается эмпирическим уравнением:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{-9522,31}{1 - 1,0083 \exp(-0,0144133 \cdot \varepsilon)}, \text{ Па.} \quad (8)$$

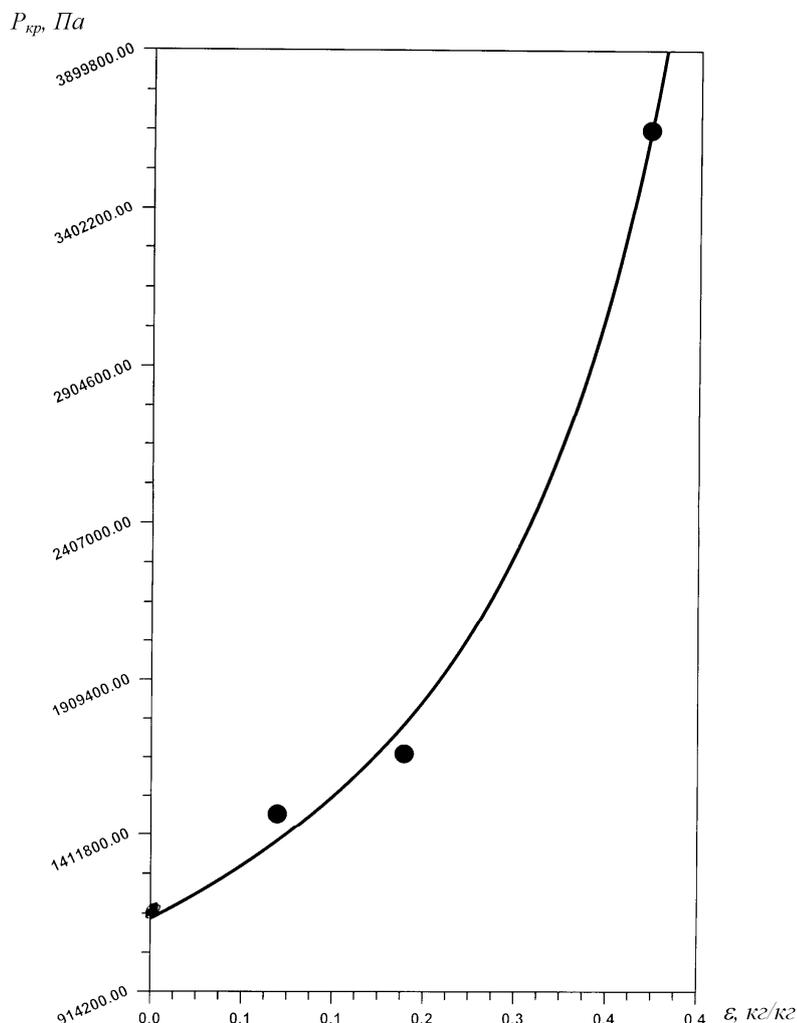


Рис. 2. График зависимости давления  $\Delta P_{\phi}$  во фронте ударной волны, воспламеняющей МВС от содержания в продуктах взрыва ПВВ ингибитора  $\varepsilon$

Анализ экспериментальных результатов показал, что увеличение концентрации соли-ингибитора в продуктах взрыва ПВВ повышает критические параметры УВ, необходимые для воспламенения МВС. Так, например, для неперехохранительного аммонита № 6ЖВ, не имеющего ингибитора в составе, то есть  $\varepsilon = 0$ , критические параметры УВ составили:  $\Delta P_{\phi} = 1,12 \cdot 10^6$  Па,  $D_y = 1111,0$  м/с, для предохранительного угленита Э-6 они имели следующие значения:  $\Delta P_{\phi} = 3,65 \cdot 10^6$  Па,  $D_y = 1877,4$  м/с. Другой интересный факт заключается в том, что температура ударно-сжатой МВС во фронте волны для критических условий инициирования взрывной реакции при взрыве аммонита составила  $T_{\phi} = 775,3$  °К, а при взрыве угленита 1470,5 °К. Температуру ударного сжатия МВС во фронте УВ рассчитывали по уравнению:

$$T_{\phi} = 275,94 + 3,43566 \cdot 10^{-2} D_y + 4,4974 \cdot 10^{-4} D_y^2 - 6,8772 \cdot 10^{-8} D_y^3, \text{ °К.}$$

Таким образом, исследования показали, что наличие в продуктах взрыва ВВ соли-ингибитора реакции окисления метана оказывает существенное влияние на параметры ударных волн, инициирующих взрыв МВС. Наличие ингибитора в составе ПВВ может существенно затруднить воспламенение МВС при взрыве в ней заряда. Механизм ингибирования ударно-сжатой МВС солью основан на рекомбинации ингибитором активных центров в зоне реакции и эффективном ее торможении вплоть до полного прекращения. Высокая скорость полета наночастиц ингибитора и малое миделевое сечение частиц позволяет им двигаться вслед за ударной волной на большее расстояние, чем радиус расширения газообразных продуктов взрыва заряда. По мере расширения продуктов взрыва и движения УВ происходит возрастание периода индукции МВС за ударной волной вследствие уменьшения ее параметров, а быстро летящие наночастицы ингибитора за этот период времени достигают зоны ударно-сжатой МВС. Это приводит к ингибированию реакции окисления метана в смеси, ее прекращению и подавлению воспламенения МВС.

**Вывод.** Установлено, что ввод в состав ВВ соли-ингибитора реакции окисления метана существенно влияет на параметры УВ, вызывающие воспламенение и детонацию МВС. В результате на определенном расстоянии от заряда происходит подавление реакции окисления метана ингибитором при воспламенении МВС. Поэтому применение ПВВ, содержащих соли-ингибиторы реакции окисления метана обеспечивает безопасность взрывных работ в угольных шахтах.

### Библиографический список

1. Физика взрыва [монография] / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. – М.: Наука, 1975. – 705 с.
2. Ландау Л. Д. Определение скорости истечения продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ: Собр. тр. Л. Д. Ландау. Т. 1 / Л. Д. Ландау, К. П. Станюкович – М.: Наука, 1969. – С. 499-503.
3. Зельдович Я. Б. Теория детонации / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец – М.: Гостехиздат, 1955. – 268 с.
4. Адушкин В. В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе / В. В. Адушкин – ПМТФ. - № 5, 1963. – С. 107-115.
5. Калякин С. А. О влиянии энергии, передаваемой при взрыве ВВ в ударную волну, на предохранительность // Научные труды ДонНТУ: Серия «Горно-геологическая». Вып. 86 / С. А. Калякин – Донецк: ДонНТУ, 2005. – С. 37-44.
6. Розловский А. И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / А. И. Розловский – М.: Химия, 1972. – 364 с.

Надійшла до редколегії 20.12.2011/

С. А. Калякин

*ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна.*

Визначення критичних параметрів ударних хвиль при вибуху заряду ВВ, що викликають займання метаноповітряної суміші

У роботі визначені критичні параметри ударних хвиль, викликаючі займання МВС при детонації в ній зарядів ВР. Встановлено, що ВР, що містять у складі соли-інгібітори метану, воспламеняють МВС ударними хвилями, що мають більш високі параметри у фронті ударної хвилі, ніж у незапобіжних ВВ.

Ключові слова: ударна хвиля, детонація.

S. A. Kalyakin

*Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine*

Determination of critical parameters of shock waves at explosion causing ignition of a methane - air mix

The critical parameters of shock waves which activate inflammation of methane-air mixture during detonation of explosives are adjusted in this work. The explosives which have methane salts-inhibitors in his composition are ignite the methane-air mixture with the shock waves. The shock waves of explosives have higher parameters in front of shock wave in comparison with non-permissible explosives.

Keywords: shock waves, detonation.