

Калякин С.А., к.т.н., доц.

Донецкий национальный технический университет

83000, г. Донецк, ул. Артема, д. 58

E-mail: yglenit@gmail.com

В работе раскрыта природа возникновения электромагнитного излучения (ЭМИ) продуктов взрыва предохранительных ВВ. Показана связь величины импульса сигнала ЭМИ с факторами, характеризующими взрыв заряда ВВ. Установлен период времени возбужденного состояния соли-ингибитора после расширения продуктов взрыва ВВ и ударной волны, который характеризует явление дезрекомбинационного эффекта.

Ключевые слова: предохранительное ВВ, электромагнитное излучение, возбужденное состояние кристалла, соль-ингибитор.

Вступление. В угольных шахтах при разрушении газоносных горных массивов применяются взрывные работы. С их помощью добывают около 10% угля и проводят 60% подготовительных выработок. Для ведения взрывных работ разрешено применение только предохранительных взрывчатых веществ (ПВВ), которые устойчивы к выгоранию и имеют необходимый уровень предохранительных свойств в метано-воздушной смеси (МВС) и пылевоздушной смеси (ПВС).

Модернизация и совершенствование ПВВ обусловлены необходимостью повышения их работоспособности и уменьшения стоимости ВВ без снижения антигизутности шпуровых зарядов при взрывных работах.

Анализ предыдущих исследований. Наиболее перспективным направлением достижения высокого уровня безопасности ПВВ при взрывании в МВС и ПВС является ввод в их состав химически активных солей-ингибиторов реакции окисления метана кислородом воздуха. Ингибитор тормозит скорость цепных реакций окисления метана и предотвращает взрыв МВС. Поэтому при взрывных работах можно обеспечить взрывопреупреждение МВС.

Вместе с тем, было установлено, что при детонации ПВВ соль-ингибитор теряет способность тормозить цепные реакции окисления метана. На нее действует детонационная волна, приводящая к предельному напряжению сдвига в кристаллах и временной потере ингибитором способности рекомбинировать радикалы на его поверхности (явление дезрекомбинационного эффекта). Исследование механизма возникновения этого явления и его продолжительности при взрыве заряда имеет большое значение при выборе эффективных солей-ингибиторов для ПВВ и обоснования безопасных параметров взрывных работ в угольных шахтах.

Целью работы является исследование электромагнитного излучения (ЭМИ) продуктов детонации предохранительных ВВ для определения продолжительности колебания кристаллической решетки соли при динамических процессах ударного сжатия ингибитора.

Материал и результаты исследований. Известно, что при взрыве различных конденсированных ВВ возникает электромагнитный импульс [1, 2].

В работе [3] исследовалась зависимость характеристик электромагнитного сигнала от способа инициирования ВВ, высоты подвеса, массы и формы заряда из литой смеси тротил-гексоген ТГ-50/50. В МакНИИ Зенин В.И. и Миц В.Н. первыми исследовали электромагнитное излучение при взрыве промышленных ВВ [4]. Они высказали предположение о том, что наблюдаемый электромагнитный импульс связан с продуктами детонации ВВ и возникающей в воздухе ударной волной. Указывались четыре возможные причины генерации электромагнитного поля при взрыве ВВ.

1. Поляризация проводящей области, возникающая при взрыве ВВ в геомагнитном поле Земли, а также перераспределение зарядов при касании этой области проводящей поверхности Земли.

2. Ударная поляризация конденсированных частиц ВВ, возникающая в процессе детонации ВВ и изменяющаяся за время ее развития.

3. Механизм, связанный с разлетающимися с большой скоростью твердыми частицами, которые образуются при взрыве. Причина эффекта – возникновение зарядов на частицах, так как при их движении относительно газообразных продуктов взрыва ВВ они заряжаются вследствие электрокинетического эффекта.

4. За фронтом ударной волны в воздухе образуется ионизированный слой, в котором наблюдается различная подвижность электронов и ионов, приводящая к их разделению в пространстве. Если в расширении электрических зарядов присутствует асимметрия, то система зарядов эквивалентна эффективному электрическому диполю. Дипольный момент меняется во времени из-за расширения ударной волны и процессов релаксации электрических зарядов. Все это ведет к появлению переменного электрического поля.

Все перечисленные выше гипотезы генерации электромагнитных полей при взрыве ВВ не позволяют в полной мере объяснить особенности электромагнитного импульса, возникающего при взрыве заряда ВВ в воздухе. В результате исследования импульсов электромагнитного излучения, возникающего при взрыве бризантных ВВ (тротил, гексоген), не предохранительных ВВ (аммонит № 6ЖВ, дето-

нит, скальный аммонит № 1 и др.) и предохранительных ВВ (аммонит ПЖВ-20, угленит Э-6 и др.), Зенин В.И. и Миц В.Н. [4] установили следующее:

- каждое ВВ имеет свой характерный электромагнитный импульс, возникающий при взрыве, воспроизводимый в параллельных опытах;

- для различных типов ВВ эти импульсы сильно отличаются друг от друга.

Было также установлено, что при взрыве ВВ, в состав которых вводились соли щелочных металлов, используемые в предохранительных ВВ как пламегасители или горючие добавки (алюминий, древесная мука), сигнал ЭМИ резко увеличивается. Так же резко увеличивает ЭМИ при взрыве песчаная оболочка вокруг заряда. Это указывает на то, что не только продукты взрыва ВВ и ударная волна в воздухе способны генерировать электромагнитные импульсы при взрыве.

Невзрывчатые добавки, введенные в состав ВВ, приводят при взрыве к появлению электромагнитных эффектов, не связанных с расширением продуктов взрыва и ударной волны. Известно появление электромагнитного поля радиодиапазона, возникающего при разрушении диэлектрических материалов [5], при распространении волн напряжений в диэлектрических материалах [6] и металлах [7]. Таким образом, при взрыве заряда ВВ возникающее электромагнитное излучение может быть индикатором динамических процессов, происходящих, например, в кристаллах соли-ингибитора, находящегося в продуктах детонации ПВВ. Интерес к изучению электромагнитного излучения кристаллами соли-ингибитора при взрыве ПВВ обусловлен тем, что потеря ингибитором способности рекомбинировать радикалы в МВС связана с экстремальным состоянием кристаллов соли. При взрыве ПВВ в результате ударной нагрузки подвижность дислокаций в кристаллах соли резко возрастает, они начинают двигаться и переводят кристалл в гидродинамический режим, создающий поверхностные волны Релея или Лява. Скорость движения дислокаций определяется действующим напряжением сдвига и силой трения в кристалле. Смещение атомов в узлах решетки и возникновение поверхностных волн делает невозможным протекание реакции рекомбинации радикалов на поверхности кристалла ингибитора – возникает дезрекомбинационный эффект.

Результаты, полученные в работе [8] показывают, что любые перемещения дислокаций в ионных кристаллах (ингибиторы NaCl и KCl) должны сопровождаться электромагнитной эмиссией, интенсивность которой может быть велика даже при умеренной плотности дислокаций на поверхности кристалла.

При детонации ПВВ у кристалла соли происходит возбуждение большого числа дислокационных сегментов, что должно дать значительное электромагнитное излучение. Исследование амплитуды и интенсивности электромагнитного излучения позволит судить о возбужденном состоянии кристалла соли-

ингибитора и тем самым установить период времени, при котором рекомбинация радикалов на поверхности кристалла не возможна.

С этой целью были использованы результаты ранее проведенных исследований, полученные в МакНИИ В.И. Зениным (техотчет № 22/25, 1962). Схема и методика проведения опытов по изучению сигналов ЭМИ при взрыве промышленных ВВ опубликованы в работе [4]. Рецептуры ВВ, используемые в опытах, были восстановлены, проанализированы по составу ингредиентов и по ним был сделан расчет взрывчатых показателей ВВ. Результаты измерений сигналов ЭМИ при взрыве ВВ и взрывчатые характеристики ВВ приведены в табл. 1. Сигнал ЭМИ, полученный в опыте, характеризуется амплитудой – A и продолжительностью – τ , которая складывается из времени нарастания сигнала до максимального значения амплитуды – τ_1 и времени затухания сигнала τ_2 . В качестве параметра, характеризующего сигнал ЭМИ при взрыве открытого заряда ВВ, принят импульс излучения: $I_u = A(\tau_1 + \tau_2)$, В·мс. Для выяснения влияния на параметры ЭМИ факторов, связанных с взрывом ВВ, был проведен корреляционный анализ, который позволил установить зависимости импульса излучения от взрывчатых характеристик ВВ. Были получены следующие эмпирические зависимости импульса ЭМИ при взрыве ВВ:

– от энергии взрыва ВВ на моль продуктов взрыва q_m :

$$I_u = \exp\left[122,2 - \frac{1602,97}{q_m} - 22,7 \ln(q_m)\right], \text{ В·мс, (1)}$$

$$q_m = \frac{\rho_{ВВ} \cdot Q_v}{\rho_u N_u + \rho_{ВВ} \cdot N_{ПВ}}, \text{ кДж/моль;}$$

– от среднего давления продуктов взрыва ВВ P_{cp} :

$$I_u = \exp\left[49,3 - \frac{8664,3}{P_{cp}} - 5,55 \ln(P_{cp})\right], \text{ В·мс, (2)}$$

$$P_{cp} = \frac{\Sigma N}{N_{ПВ}} \cdot \rho_{ВВ} \cdot Q_v (1 - \varepsilon), \text{ МПа;}$$

– от мощности детонации ВВ N_D :

$$I_u = \exp\left[58,3 - \frac{346623,92}{N_D} - 4,52 \ln(N_D)\right], \text{ В·мс, (3)}$$

$$N_D = d_3^2 \cdot \rho_{ВВ} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot Q_v^{1,5}, \text{ кДж/с;}$$

– от числа молей ингибитора в 1 кг ВВ N_u :

$$I_u = \frac{15,03153}{1 + 22925,061 \exp(-2,792 N_u)}, \text{ В·мс, (4)}$$

где Q_v – удельная теплота взрыва ВВ, кДж/кг;

$\Sigma N = N_{ПВ} + N_u$, моль/кг; ε – относительное содержание ингибитора в ВВ;

$N_{ПВ}$ – число газообразных молей продуктов взрыва, моль/кг;

$\rho_{ВВ}, \rho_u$ – плотности ВВ и ингибитора, кг/м³;

d – диаметр заряда, м.

Таблица 1. - Результаты исследования ЭМИ при взрыве открытых зарядов ВВ

№ пп	Взрывчатое вещество	Диаметр, мм и плотность, г/см ³ заряда	Удельная теплота взрыва, Q_v , кДж/кг	Число молей продуктов взрыва, моль/кг		Удельное содержание конденсир. фазы, ε , кг/кг	Температура взрыва, $T_{\text{вз}}^0$, К	Амплитуда ЭМИ, A , В	Общее время ЭМИ, τ , мс	Импульс излучения, I_u , В·мс
				газообразных, N_r	конденсированных, N_u					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Аммонит № 6ЖВ	Ø 32	4344,3	39,881	-	0,0	2554,8	0,498	1,69	0,842
2.	Аммонит ПЖВ-20	Ø 36	3369,4	32,05	3,419	0,2	2181,0	1,202	1,44	1,731
3.	Метаниты в предохранительных оболочках зарядов (58,8% ВВ, 41,2% оболочка): № 4 - ядро* - заряд № 5, 6 заряд	Ø 36 Ø 36	3184,34	31,37	3,111	0,2	-	-	-	-
1872,4			18,444	7,352	0,5485	2124,0	7,88	2,22	17,34	
2554,45			23,45	5,523	0,412	2555,0	7,65	2,15	16,45	
4.	Предохранительный динамит Д-3	$\rho = 1,45$ Ø 32	3105,0	27,02	3,7534	0,28	2241,5	26,8	0,42	11,256
5.	Угленит Э-6	$\rho = 1,2$ Ø 36	2616,97	24,666	6,661	0,39	1829,2	8,9	1,36	11,57
6.	62% аммондинамит	$\rho = 1,45$ Ø 32	5365,3	37,055	-	0,0	3211,2	0,244	1,32	0,27
7.	Скальный аммонал № 1	$\rho = 1,5$ Ø 36	5373,33	37,457	0,937	0,0956	3072,6	1,32	1,4	1,85
8.	Предохранительный скальный № 10	$\rho = 1,35$ Ø 32	3754,0	31,618	2,681	0,2	2480,4	1,05	1,86	1,953
9.	Предохранительный скальный № 11	$\rho = 1,35$ Ø 32	3395,4	29,813	3,3512	0,25	2321,0	3,54	1,85	6,55
10.	Детонит 10А	$\rho = 1,1$ Ø 32	5072,3	37,324	0,9745	0,0994	2864,8	0,77	1,92	1,48
11.	ТНТ	$\rho = 1,0$ Ø 32	3097,6	41,92	6,537 (графит)	0,078	2336,0	0,17	1,04	0,177
12.	Гексоген	$\rho = 1,1$ Ø 32	5563,2	37,113	3,045 (графит)	0,0365	3760,0	0,29	0,95	0,276

*расчет параметров ВВ, находящегося в ядре предохранительного заряда.

Коэффициент корреляции парного взаимодействия для исследуемых факторов получен для зависимостей: (1) - $r = 0,759$, (2) - $r = 0,864$, (3) - $r = 0,873$, (4) - $r = 0,949$.

Таким образом, наибольшее влияние на импульс излучения при взрыве заряда ВВ оказывает число молей ингибитора в составе ПВВ. Меньшее влияние оказывают давление взрыва и мощность детонации ВВ. Характерным является то, что именно эти три фактора определяют величину предельного заряда ВВ в МВС, то есть его предохранительные свойства. Это указывает на определенную связь между импульсом излучения при взрыве ПВВ и его уровнем предохранительных свойств.

Однако если проанализировать зависимости (2), (3) и (4), показанные на рис. 1, то видно, что они имеют характерный максимум излучения. Эти экстремальные области ЭМИ образуют только ПВВ, в составе которых достаточно большое содержание соли-ингибитора. Поэтому можно сделать вывод, что наибольшие импульсы излучения при взрыве заряда дают ВВ, содержащие в продуктах взрыва соли-ингибиторы. Это указывает на то, что при взрыве кристаллы соли-ингибитора возбуждаются и излучают больший импульс электромагнитного излучения, чем ионизированные газообразные продукты взрыва ВВ. Тогда возникает вопрос: как долго кристаллы соли-ингибитора находятся в возбужденном состоянии, способном излучать ЭМИ? Измерения сигналов ЭМИ при взрыве показали, что время нарастания сигнала составляет в среднем $0,3 \dots 0,6$ мс, а время затухания сигнала гораздо больше – примерно в $2 \dots 2,5$ раза. Это позволяет определить период времени, когда ингибитор при взрыве ПВВ находится в возбужденном состоянии. Действительно известно, что газообразные продукты взрыва ВВ имеют максимальный радиус расширения порядка $12 \dots 13$ радиусов заряда ВВ - r_3 , а параметры во фронте воздушной ударной волны, способные термически ионизировать газ,

сохраняются на расстоянии до $20 r_3$. Тогда время возможного действия ЭМИ, создаваемого продуктами взрыва ВВ и ударной волной, можно определить в среднем по формуле:

$$t_u = \frac{(13 \dots 20) \cdot r_3}{W_n}, \text{ мс,}$$

где W_n – средняя скорость расширения продуктов детонации при взрыве заряда ВВ в воздухе, $W_n \approx D/2$ (D – скорость детонации ВВ).

В опытах были использованы различные ВВ в зарядах массой $0,2$ кг. Если принять среднюю скорость расширения потока продуктов взрыва ВВ и ударной волны в воздухе до предельных значений $13 \dots 20 r_3$ равной $W_n \sim 1500$ м/с, то получим время $0,3 \dots 0,5$ мс, то есть величину, очень близкую к значению времени нарастания сигнала ЭМИ, полученному в эксперименте. Это указывает на то, что первая фаза сигнала связана с расширением продуктов взрыва ВВ и ударной волны. Вторая же фаза сигнала ЭМИ может быть связана с тем, что твердые частицы обгоняют холодные газообразные продукты взрыва и попадают в еще нагретый ударной волной воздух. Следовательно, если это частицы ВВ или горючих компонентов его состава, то возможны вторичные реакции (образование при взрыве ВВ «вторичного пламени») в воздухе, которые также способны вызывать ЭМИ. Однако, если это частицы соли-ингибитора, то в какие-либо химические реакции с воздухом они вступить не могут, тем более их инициировать. В этом случае вторая фаза излучения может быть связана только с определенным возбуждением при детонации ВВ кристаллической решетки соли-ингибитора. Поэтому ВВ разделили на две группы: ВВ, в составе которых имеется соль-ингибитор и ВВ, в которых она отсутствует. Далее

для каждого ВВ в соответствующей группе опреде-

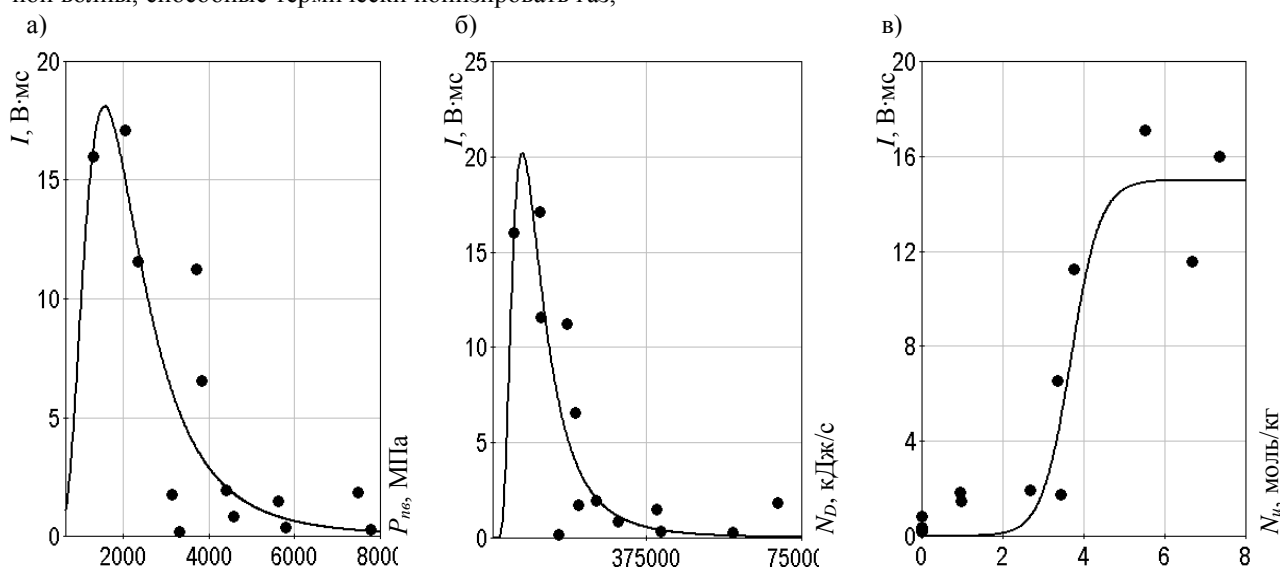


Рис. 1. Зависимости электромагнитного излучения продуктов детонации (ПД): а – от давления ПД; б – от мощности детонации ВВ; в – от числа молей соли-ингибитора в ПД

Таблица 2. - Результаты исследований возбужденного состояния ингибитора при взрыве ВВ

$\Delta\tau$ у ВВ с ингибитором, мс					$\Delta\tau$ у ВВ без ингибитора, мс							
ПЖВ-20	Д-3	Э-6	ск. № 10	ск. № 11	метаниты			№ 6ЖВ	62% аммон-динамит	скаль-ный № 1	гексо-ген	
					№ 4	№ 5	№ 6					
0,625	0,3	0,98	1,05	0,5	1,78	1,88	1,81	0,59	0,18	-0,7	0,425	
среднее 0,691					1,825			среднее 0,398				

лили, на сколько вторая фаза сигнала ЭМИ больше первой. Оказалось (табл. 2), что по сравнению с первой фазой в среднем продолжительность второй фазы сигнала больше для ПВВ на 0,691 мс ($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$), для ПВВ в предохранительных оболочках – на 1,825 мс, для не предохранительных ВВ без ингибитора в продуктах взрыва – всего на 0,398 мс. Таким образом, получилось, что возбужденное состояние соли-ингибитора сохраняется в среднем еще 0,691 – 0,398 \approx 0,3 мс после расширения продуктов взрыва у открытых зарядов ПВВ, а у зарядов в предохранительных оболочках примерно 1,4 мс. В этот период времени сигнал ЭМИ у данных ПВВ определяется только за счет возбужденного состояния кристалла соли. В то же время, вследствие колебаний кристаллической решетки способность соли-ингибитора рекомбинировать радикалы на поверхности кристалла при взрыве ВВ отсутствует. Поэтому ингибирование МВС при взрыве открытых зарядов ПВВ становится возможным только через определенный промежуток времени (0,3...1,4 мс), определяемый временем релаксации смещений атомов в решетке

кристаллов и затухания поверхностных волн.

Выводы.

1. При взрыве открытых зарядов ВВ возникает импульс ЭМИ, который имеет сложную природу и связан с многими факторами.

2. Для зарядов ВВ установили эмпирические зависимости импульса ЭМИ от энергии взрыва ВВ на одни моль продуктов взрыва, давления продуктов взрыва ВВ, мощности детонации ВВ и числа молей соли-ингибитора в продуктах взрыва на 1 кг ПВВ.

3. Показали, что сигнал ЭМИ при взрыве заряда ПВВ имеет две характерные фазы: первая связана с расширением газообразных продуктов взрыва ВВ и ударной волны, а вторая – с возбужденным состоянием кристаллов соли-ингибитора.

4. Определили период возбужденного состояния кристаллов соли-ингибитора после расширения продуктов взрыва ВВ и ударной волны, который может быть от 0,3 до 1,4 мс, в зависимости от типа заряда ПВВ. В этот период времени ингибитор не может рекомбинировать радикалы на поверхности кристалла соли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolsky H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives / Kolsky H. // Nature, 1954. – Vol. – 73. - № 4393. – P 73-77.
2. Боронин А.П. Экспериментальное изучение электромагнитного поля в ближней зоне при взрыве конденсированных ВВ / [Боронин А.П., Вельмин В.А., Медведев Ю.А., Степанов Б.М.] / ПМТФ, 1968. - № 6. – С. 99-103.
3. Горшунов Л.М. Электромагнитные возмущения при взрывах / Л.М. Горшунов, Г.П. Кононенко, Е.И. Сиротинин // ЖЭТФ, 1967. – Т.53. – Вып. 3 (9). – С. 818-821.
4. Зенин В.И. Электромагнитное излучение при взрыве промышленных ВВ / В.И. Зенин, В.Н. Миц // В сб.: «Взрывное дело» № 52/9. М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 115-130.
5. Корнфельд М.И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении / Корнфельд М.И. // УФН, 1975. – Т.116. – № 2. – С. 327-340.
6. Хитиашвили Н.Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галлоидных кристаллах и горных породах / Хитиашвили Н.Г. // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1984. - № 9. – С. 13-19.
7. Тупик А.А. Электромагнитная эмиссия при разрушении металлов / Тупик А.А., Валуев Н.П. // ЖТФ, 1980. – Т.6. – № 2. – С. 82-85.
8. Чаркина О.В. Электромагнитное излучение подвижных дислокационных сегментов в ионном кристалле / Чаркина О.В., Чишко К.А. // Физика твердого тела, 2001. – Т. 43. – Вып. 10. – С. 1821-1827.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРОДУКТІВ ДЕТОНАЦІ ЗАПОБІЖНИХ ВР

Калякін С.О., к.т.н., доц.

Донецький національний технічний університет

83000, м. Донецьк, вул. Артема, б. 58

E-mail: yglenit@gmail.com

У роботі розкрито природа виникнення електромагнітного випромінювання (ЕМВ) продуктів вибуху запобіжних ВР. Показаний зв'язок величини імпульсу сигналу ЕМВ з факторами, що характеризують вибух заряду ВР. Встановлений період часу збудженого стану солі-інгібітору після розширення продуктів вибуху ВР та ударної хвилі, який характеризує явище дезрекомбінаційного ефекту.

Ключові слова: запобіжна ВР, електромагнітне випромінювання, збуджений стан кристалу, соль-інгібітор.

RESEARCHING OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF DETONATION PRODUCTS OF PERMISSIBLE EXPLOSIVES

Kalyakin S.A., Cand. Sci. (Tech.), Assoc.Prof.

Donetsk National Technical University

Artema Str., 58, Donetsk, 83000

E-mail: yglenit@gmail.com

In this work the nature of initiation of electromagnetic radiation of explosion products of permissible explosives is opened. The dependence of signal's impulse size and factors which characterizes explosion of explosive's charge is shown. The period of time of excited state of salt-inhibitor which characterizes the phenomenon of dezrecombination effect after enlargement of products of preventive explosions explosion is adjusted.

Key words: permissible explosives, electromagnetic radiation, excited state of the crystal, salt-inhibitor.