

УДК 622.235

## СОЗДАНИЕ НОВОГО КЛАССА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

*А. А. Вовк, докт. техн. наук, В. И. Плужник, канд. техн. наук (Институт гидромеханики НАН Украины)*

*Розглянуто вибухові речовини змінної щільності, які пройшли промислову перевірку під час вибухів у ґрунтах та скельних породах на гірничодобувних підприємствах України та країн СНД.*

*The explosives of the variable density that have been passed industrial test during explosions in soils and rocks in the mining enterprises of Ukraine and the CIS countries are considered.*

Разрушение горных пород является важнейшим технологическим процессом, и поиски путей его оптимизации занимают важное место в развитии горнодобывающей и строительной промышленности.

Основной задачей при взрывных работах является получение взрывчатых вещества (ВВ), которые бы отвечали возрастающим экологическим и технологическим требованиям и позволяли обеспечить высокий уровень механизации и безопасности взрывных работ. Разрушение горных пород представляет собой сложный процесс, и для выполнения предъявляемых требований необходимо стремиться к соблюдению определенных параметров нагружения путем регулирования как силовой ( $P$ ), так и временной ( $t$ ) составляющей взрывного импульса, имея в виду две особенности: ограниченные энергетические возможности заряда ВВ и инерционность процесса разрушения.

Одним из новых направлений исследований по созданию ВВ с регулируемыми параметрами взрывного импульса еще на стадии приготовления является предложенный Ф. Н. Галаджием способ регулирования энергетических и детонационных характеристик ВВ местного приготовления изменением плотности – так называемых пенообразных рецептур [5–10].

Изменяя плотность ВВ, можно управлять взрывчатыми свойствами ВВ, влияя в первую очередь на величину начального давления (рис. 1).

ВВ пониженной плотности можно получать способом аэрации путем химического вспенивания массы ВВ, в частности за счет применения N,N-динитрозопентаметилтен-тетрамина, который при смешивании с раствором аммиачной селитры (АС) и дизельного топлива (ДТ) выделяет газ. При этом плотность ВВ уменьшается до 50 % от первоначальной. Наиболее перспективным методом регулирования плотности ВВ является изменение их пенообразующей способности путем подбора соответствующих поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Пена образуется в результате интенсивного совместного диспергирования АС, ПАВ, воды и воздуха. Суть механизма образования пузырька пены

заключается в том, что на межфазной поверхности газ–пластичная среда формируется адсорбционный слой. Этот процесс является сложным вследствие влияния различных физико-химических, структурно-механических и других факторов.

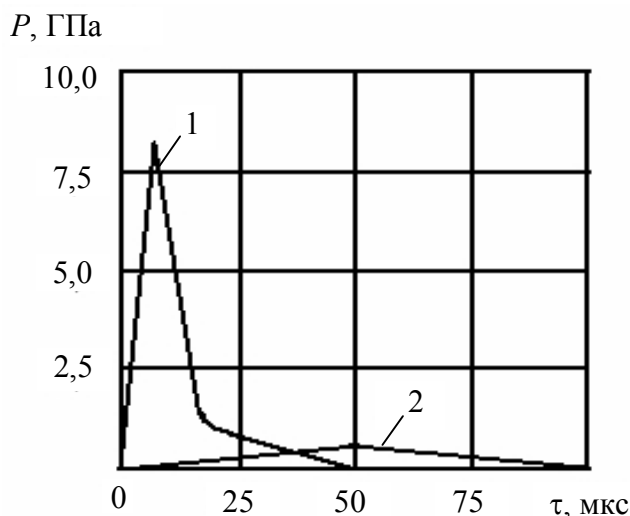


Рис. 1. Импульс взрыва на границе ВВ–порода: 1 – аммонит; 2 – малоплотное ВВ

Одной из основных проблем в области вспенивания пластичной системы является устойчивость (живучесть), то есть время существования пены, ее дисперсного состава, способность препятствовать истечению жидкости (синерезису) и дисперсность, которая определяется распределением пузырьков по размерам или средними размерами пузырьков.

Для получения устойчивой пены дисперсная фаза должна содержать пенообразователь (ПАВ), способный адсорбироваться на межфазной поверхности. Адсорбция его вызывает изменение межмолекулярного взаимодействия в адсорбционных слоях, что выражается изменением (понижением) поверхностного натяжения системы. Эта связь определяется термодинамическим уравнением Гиббса [2].

Для установления общих закономерностей изменения поверхностной активности и адсорбционных параметров ПАВ на поверхности раздела раствор–воздух нами были исследованы поверхностные свойства растворов гомологического ряда алкилоламов жирных кислот с длиной углеводородного радикала  $C_6$ ,  $C_7$ ,  $C_8$ ,  $C_9$ , а также ПАВ, имеющих одинаковую углеводородную цепочку, но различные функциональные группы – додецилсульфат натрия, додецилсульфат натрия и диалкилоламид лауриновой кислоты. По результатам этих исследований установлено, что указанные соединения являются достаточно эффективными ПАВ. Поверхностное натяжение закономерно падает при переходе от моноалкилоламида каприновой кислоты к моноалкилоламиду пеларгоновой кислоты. Для исследованных ПАВ изотермы адсорбции подчиняются уравнению Ленгмюра [2, 4]. Путем приведения его к уравнению вида прямой графически были определены величины адсорбции, значения которых колеблются в пределах  $(35,3...5,9) \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>2</sup> (рис. 2).

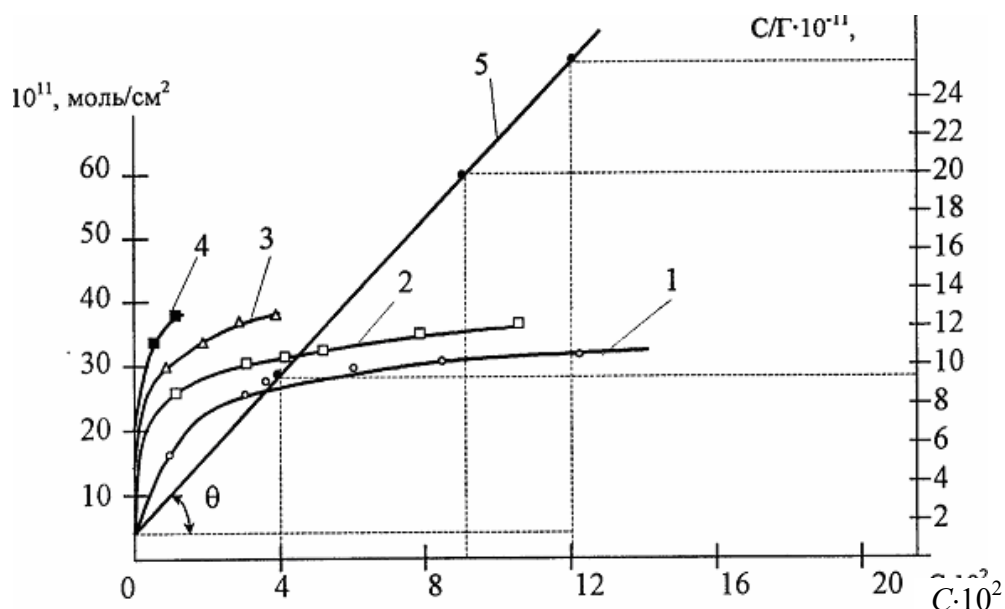


Рис 2. Изотермы адсорбции на границе раствор–воздух и алкилоламидов жирных кислот: 1 –  $C_6$ ; 2 –  $C_7$ ; 3 –  $C_8$ ; 4 –  $C_9$ ; 5 – величина адсорбции по уравнению Ленгмюра для алкилоламида каприновой кислоты [2, 4]

Установлено, что в адсорбционных слоях, так же как и во всем объеме системы, действуют силы сцепления между углеводородными цепями и силы отталкивания между заряженными полярными группами в случае ионогенных ПАВ. Неионогенное ПАВ (диалкилоламид лауриновой кислоты) обладает наибольшей поверхностной активностью, так как молекула менее гидрофильна, чем ион.

Образующийся мономолекулярный слой может быть в различном агрегатном состоянии – газообразном или конденсированном, в зависимости от структуры молекул или ионов, концентрации ПАВ, температуры и присутствия различных органических и неорганических добавок.

При удлинении углеводородной цепи ПАВ возрастает боковая когезия между молекулами газообразных пленок за счет сил притяжения гидрофобных цепей, причем у гомологов ПАВ, содержащих более 14 углеродных атомов, когезия увеличивается настолько, что становится возможным образование конденсированной поверхностной пленки.

Определенной стабильности пен можно достичь более плотной упаковкой молекул ПАВ, чтобы в адсорбционном слое не было свободной воды, а только связанная. Однако повышением концентрации вещества в объеме создать такой насыщенный адсорбционный слой невозможно, так как адсорбированные поверхностно-активные ионы ПАВ будут создавать барьер, препятствующий дальнейшему проникновению ионов на поверхность. Поэтому для выяснения возможности образования комплексов между двумя ПАВ были изучены бинарные смеси растворов додецилсульфата натрия (DDCNa), моноалкилоламидов (МАО) жирных кислот снятием ИК-спектров ОН миристиновой, лауриновой, каприновой кислот [2, 4].

Изложенные выше физико-химические предпосылки позволили создать вспененные водонаполненные ВВ на основе АС и бинарных смесей ПАВ. Изменяя пенообразующую способность составов, можно регулировать их плотность в широких пределах – от 0,15 до 0,80 г/см<sup>3</sup> и соответственно изменять взрывчатые свойства для получения заданного эффекта.

При подборе рецептур для проведения исследований и последующего применения, помимо получения минимально необходимых детонационных характеристик (скорость детонации, чувствительность, удельная энергия и т.п.), ставилась задача изучить способы достижения требуемой пенообразующей способности и максимально возможной стойкости пены.

Малоплотные смеси разрабатывались в двух направлениях, в зависимости от технологических требований и способов приготовления: сыпучие (безводные) и гелеобразные.

**Создание рецептур безводных ВВ переменной плотности.** Сыпучие взрывчатые композиции регулируемой плотности создавались на основе мелкоизмельченной АС, порошкообразного ПАВ и топливной добавки, в частности угольного порошка, ДТ и т.п. Плотность такого ВВ регулировалась изменением тонкости помола и соотношением добавок.

В результате лабораторных опытов были подобраны рецептуры трех взрывчатых составов плотностью 0,75...0,82 кг/см<sup>3</sup>, состоящих из АС, ДТ, сульфанола (СФ) и угольной пыли (УП). Критический диаметр таких ВВ в жесткой оболочке составлял 35...50 мм, открытого заряда – порядка 70...90 мм при инициировании боевиком массой 10...20 г ТНТ.

В табл. 1 приведены компонентный состав и характеристики указанных трех составов в сравнении со стандартным ANFO.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что исходя из импульсной концепции передачи энергии продуктов детонации окружающему массиву, разработанные составы имеют определенные преимущества по сравнению с контрольным образцом.

Таблица 1. Компонентный состав и характеристики безводных рецептур

№ образца	Состав ВВ, %				Характеристика			
	АС	ДТ	СФ	УП	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с	Длительность головной части импульса, ×10 <sup>6</sup> , с	Давление продуктов детонации, ×10 <sup>6</sup> , Па
1	93	4	3	–	820	2100	40...50	3,2...3,6
2	91	3	2	4	800	1900	45...55	2,7...2,9
3	88	2	2	8	750	1600	50...60	1,9...2,2
Контрольный								
	94,5	5,5	–	–	990	2700	25...30	5...5,5

В частности, длительность головной части импульса возрастает от 1,6...1,8 раза у предлагаемых образцов № 1 и 2 до двух раз у образца № 3. Поэтому,

несмотря на меньшее давление продуктов детонации у предлагаемых образцов, импульс взрыва у образца № 1 в 1,24...1,32 раза, образца № 2 в 1,21...1,19 раза и у образца № 3 в 1,03...1,05 раза больше, чем у контрольного.

**Создание рецептур гелеобразных ВВ переменной плотности.** Эти ВВ создавались на основе принципа газонасыщения путем добавления различных пенообразователей на основе ПАВ, которые благодаря наличию гидрофильной и гидрофобной группы в молекуле могут иметь сродство как к АС, так и к воздуху, прочно удерживая его в дисперсной системе.

В результате проведенных поисковых исследований с целью подбора добавок и изучения их влияния на вспенивание АС установлено, что таким свойством обладают только те из ПАВ, которые имеют развитый углеводородный радикал с числом атомов углерода  $C_{10}-C_{18}$  и сложные функциональные группы с атомными группировками. Из числа других добавок рекомендованы топливные элементы (ДТ или алюминиевый порошок) и вода (2 и 4 %).

Вследствие отсутствия явных преимуществ ВВ с такой добавкой, а также из-за того, что при недостаточной пенообразующей способности возможность регулирования плотности ограничена, в дальнейшем всесторонним исследованиям подвергались лишь гелеобразные составы из АС.

Были испытаны также компонентные составы исследуемых образцов с добавками ДС-РАС, КП, воды, аэрола, сульфанола. Результаты экспериментов показаны в виде графиков на рис. 3 и в табл. 2.

Разработанные пенообразные ВВ прошли разносторонние промышленные испытания на ряде горнодобывающих предприятий Украины и Польши.

Помимо разработки пенообразных ВВ, в Отделении геодинамики взрыва были проведены исследования по подбору энергетических добавок для усиления электрогидравлического импульса, способных работать в диапазоне энергетического потенциала источника электрических импульсов 0,3...1 кДж. Испытаниям подвергались составы из АС, сенсibilизированной 2...3 %-ным раствором пироксилина и 5...10 % алюминиевого порошка.

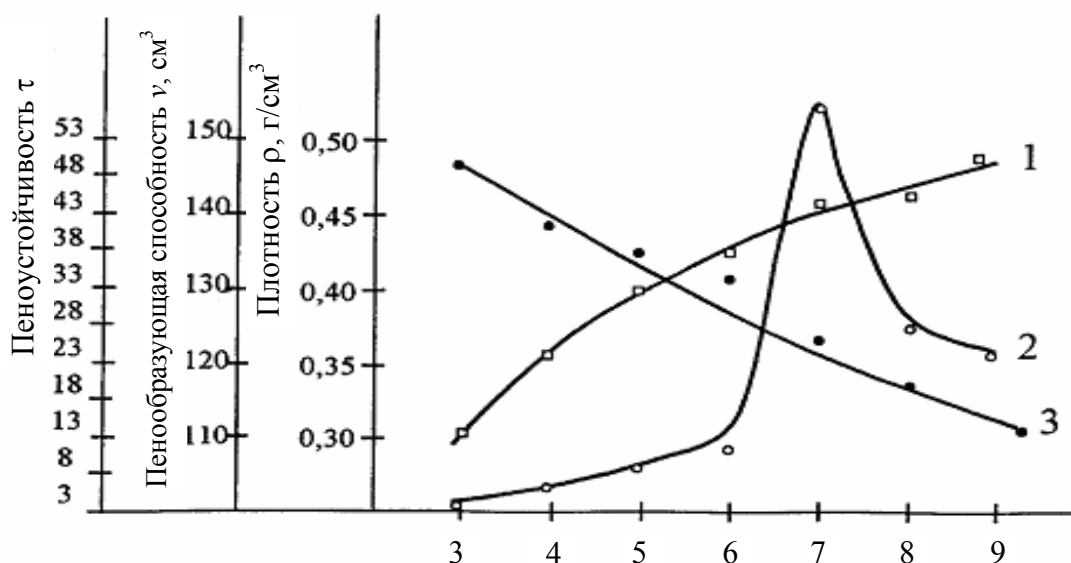


Рис. 3. Зависимость плотности (1), пенообразующей способности (2), пеноустойчивости (3) от содержания воды в системе: ДС-РАС, КП, вода, АС

Таблица 2. Результаты испытаний составов пенообразных ВВ с добавками аэрола и сульфанола

Компонентный состав образцов				Физико-механические характеристики			
АС	H <sub>2</sub> O	Аэрол	СФ	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пенообразующая способность, см <sup>3</sup>	Кратность пены	Пеноустойчивость, час
85	7	6	2	0,32	140	2,8	5,0
85	7	5	3	0,23	190	3,8	4,2
85	7	8	–	0,43	153	3,0	1,83
84	8	–	8	0,72	80	1,6	8
85	7	2	6	0,48	127	2,54	2,5

Второй состав в виде аэрированной композиции включал АС в качестве основы, 5...10 % алюминиевой пудры, 10...25 % воды, 1,5 % желатина в качестве загустителя. Для аэрации смеси применялся пенообразователь ПО-1 или сульфанола НП-1 в количестве 1...2 %. Значения скорости детонации в промежуточном детонаторе в зависимости от содержания алюминия и энергии емкостного накопителя ( $E$ ) приводятся в табл. 3. Эти данные свидетельствуют о том, что исследуемые составы достаточно стабильно детонировали при энергии электроинициатора в 1 кДж. Инициирование зарядов с меньшей энергией приводит либо к отказам (особенно аэрированных составов), либо к детонации в низкоскоростном режиме.

Таблица 3. Параметры детонации промежуточного детонатора

Содержание алюминия, %	Энергия накопителя $E$ , кДж	Скорость детонации, км/с, для составов	
		сыпучего	аэрированного
20	0,3	отказ	отказ
	0,4	1,8...2,2	1,7...2,0
	1,0	2,3...2,8	2,2...2,7
10	0,3	1,6...2,0	Отказ
	0,4	2,0...2,6	Отказ
	1,0	2,6...2,9	2,4...2,7
5	0,3	Отказ	Отказ
	0,4	2,1...2,6	Отказ
	1,0	2,3...2,9	2,0...2,6
Контрольный электродетонатор)	5,0	2,5...2,9	2,5...2,9

Некоторые безопасные в обращении бестропиловые малоплотные составы сыпучей консистенции (I и II составов) (табл. 4) и вспененные ПАВ составов, содержащих 2 % воды (III и IV позиции), были испытаны в производственных условиях гранитных карьеров при различных параметрах инициирования – от

1 до 10 кДж. Главными детонационными характеристиками, которые подлежали определению, были скорость детонации и бризантность в стальном кольце внутренним диаметром 40 мм; в качестве основного технологического параметра была принята глубина трещин в породе в зоне шпура в мм.

Инициирование осуществлялось проволочным мостиком из нихрома, константана длиной 10...15 мм и толщиной 0,15...0,25 мм.

Таблица 4. Рецептуры исследуемых составов

№ рецептуры	Состав малоплотных взрывчатых смесей, %						
	АС измельченная	ДТ	Сульфанол	Алюминий	КЧНР	РАС	Вода
I	94	4	2	–	–	–	–
II	92	4	2	2	–	–	–
III	90	–	–	–	4	4	2
IV	90	–	–	2	4	2	2

В табл. 5 приведены результаты этой серии экспериментов.

Таблица 5. Результаты опытно-промышленных испытаний

Состав	Энергия иницирующего импульса, кДж	Скорость детонации, км/с	Бризантность заряда в стальном кольце, мм	Глубина навешенных трещин, мм
I	1	1,9...2,0	7...8	1
	5	2,5...2,8	10...11	2...3
	10	2,9...3,2	10...14	6...8
II	1	1,9...2,1	10...12	2...3
	5	2,6...2,7	13...14	3...4
	10	2,8...3,2	14...15	7...5
III	1	1,6...1,8	6...8	0,5
	5	2,4...2,6	9...11	1...2
	10	2,7...3,1	12...13	3...5
IV	1	1,8...2,0	8...9	1...2
	5	2,5...2,7	10...12	2...3
	10	2,6...3,2	13...14	5...8

Дальнейшим этапом была разработка структурированных вспененных систем фиксированной структуры. Это связано с тем, что живучесть пенообразных составов не всегда удовлетворяет требованиям, вследствие чего составы преждевременно уменьшаются в объеме до завершения процесса заряжания.

Как и ранее, исследованию подвергались вспененные системы в виде АС, вспенивающего агента и тонких твердых включений. В качестве структуроформирующего вспенивающего агента в системе исследован пенообразователь

с активной частью – натриевыми солями нефтяных сульфокислот в количестве 5...6 от объема образца.

Твердые добавки тонкого помола играют роль энергетической добавки и упрочнителя пленочного каркаса, а также являются загустителем пленочной жидкости с дальнейшим ее структурированием. Полное загущение обеспечивается добавкой водорастворимых смол, в частности КФБ и отвердителя, способствующих отверждению пленки. Оптимальное содержание КФБ равно 1...15 %, его отвердителя – 0,3...0,7 % от объема всех градиентов. Класс пенообразных ВВ с фиксированным объемом во времени является весьма перспективным, однако для нахождения оптимальных рецептов требуются дальнейшие исследования в лабораторных и промышленных условиях.

Рассмотрим еще один из методов регулирования параметров взрывного импульса, предложенных Ф. М. Галаджием. Он направлен на оптимизацию процесса разрушения горной породы через установление обратной связи в системе заряд–разрушаемая среда. Метод основан на концепции о необходимости создания в зарядных полостях благоприятных условий для рационального использования процесса расширения газов взрыва формированием нескольких импульсов, поддерживающих высокий суммарный потенциал до завершения разрушения массива в заданных пределах.

Поскольку процесс разрушения пород осуществляется не мгновенно, а с определенной задержкой времени, обусловленной их физико-механическими свойствами, вполне очевидно, что достаточно высокое давление во взрывной полости должно поддерживаться на протяжении всего времени, необходимого для разрушения и отброса взорванной массы. Идеальным режимом взрывчатого разложения заряда ВВ в зарядной полости можно было бы считать такой режим, при котором время завершения полноты реакции соответствовало бы физико-механическим свойствам разрушаемого массива. Другими словами, режим детонации и завершения взрывного разложения должен быть селективным, связанным с условиями протекания взрыва, а именно: в более прочных и вязких, трудно разрушаемых породах, процесс взрывчатого разложения по времени должен быть продлен до тех пор, пока давление газов не преодолет сопротивления массива. В более податливых породах, разрушение которых потребует меньшего суммарного значения фугасных и бризантных форм работы, период взрывчатого разложения заряда должен быть, соответственно, меньшим.

Сущность рекомендуемого метода управления параметрами взрыва состоит в том, что в зарядах специальной конструкции осуществлена селективная детонация энергетических слоев, состоящих из взрывчатых компонентов, скорость взрывчатого разложения каждого из них будет характерная, свойственная только данному слою. Последовательность расположения энергослоев с учетом скорости их взрывчатого разложения определяется технологическими задачами, для которых предназначен заряд. Принципиальная схема и общий вид импульсов взрыва двухслойного заряда приведены на рис. 4.



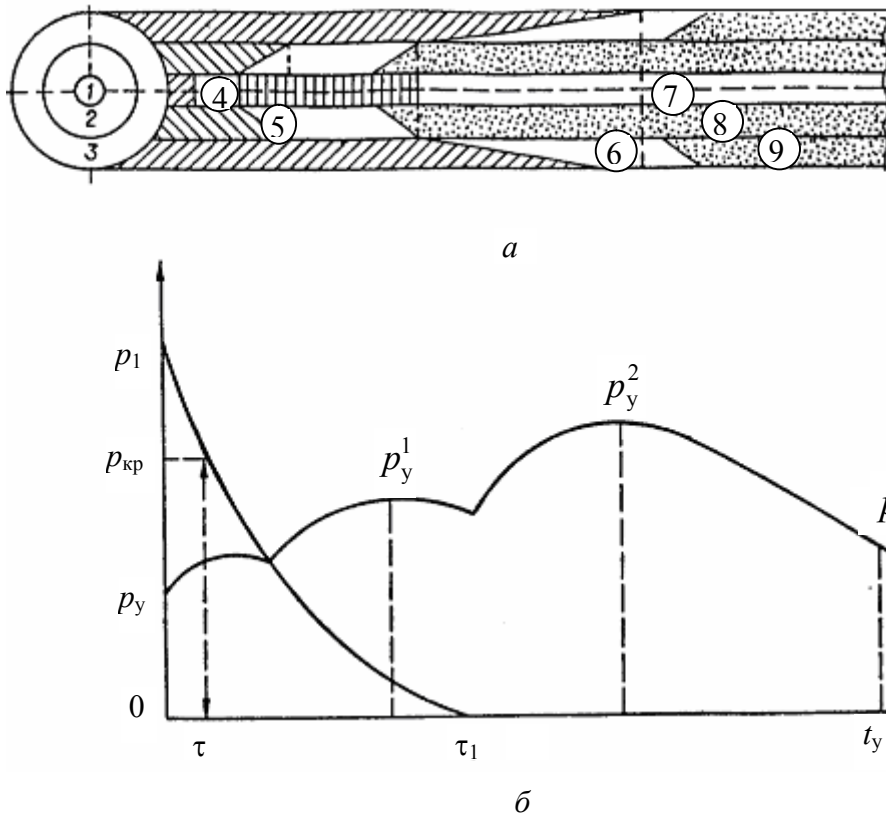


Рис. 4. Принципиальная схема двухслойного заряда (а) и общий вид импульсов взрыва этого заряда (б): 1 – осевой заряд бризантного ВВ; 2 и 3 – исходный состав 1-го и 2-го энергослоя; 4, 5, 6 – зона химической реакции соответственно ВВ, 1-го и 2-го энергослоев; 7, 8 и 9 – продукты взрыва соответственно ВВ и энергослоев;  $0p_1\tau$  – головная часть импульса ВВ-1 (бризантные формы работы);  $0p_1t_1$  – полный импульс ВВ-1 (фугасные формы работы);  $0p_1 - p_y^1 - p_y^2 - p_y^n - t_y$  – полный импульс взрыва системы с энергослоями  $E_{ВВ} + E_1 + E_2 = \sum E_n$ ;  $p_1$  – давление в головной части импульса;  $p_{кр}$  – критическое давление, при котором наступает разрушение породы;  $p_y$  – давление управляемого импульса;  $p_y^1, p_y^2 \dots p_y^n$  – давление импульса при вступлении в реакцию соответственно 1-го, 2-го и  $n$ -го энергослоя

### Выводы

1. В Отделении геодинамики взрыва на основе новых подходов при рассмотрении проблемы разрушения горных пород взрывом был разработан и реализован новый класс промышленных ВВ – переменной плотности различной консистенции, что позволило оптимизировать параметры взрывного импульса и решить ряд специфических технологических задач первичного и вторичного взрывания.

Особенностью предлагаемых рецептов явилось введение в их состав бинарных ПАВ, способствующих стабилизации взрывчатых свойств за счет резкого повышения удерживающей способности топлива аммиачной селитрой. Это обусловлено дифильностью молекул ПАВ, имеющих в своем составе гидрофильные и гидрофобные группы.

2. Разработаны взрывчатые составы для повышения энергетических параметров электрогидровзрыва и безводного электроразряда для инициирования малоплотных зарядов.

3. Разработаны конструкции селективных зарядов с управляемыми параметрами взрывного импульса в зависимости от свойств разрушаемых пород.

В разработке рецептур малоплотных ВВ и их промышленных испытаниях принимали участие инж. Юденкова В. П., канд. техн. наук Олек Е., инж. Григорьев А. Н., канд. техн. наук Лысюк С. Д., инж. Сычевская Н. В.

1. *Вовк А. А., Поплавский В. А.* Проблема разработки месторождений в сложных горно-геологических условиях. – К.: Знание. – 1981. – 24 с.

2. *Вовк А. А., Кравец В. Г., Кудря Т. П.* Создание простейших взрывчатых составов местного приготовления с регулируемой плотностью. Препринт ИГФ им. С. И. Субботина АН УССР. – К.: 1988. – 42 с.

3. *Вовк О. А., Олек Е.* Повышение эффективности и безопасности при разработке штучных камней // Разработка рудных месторождений: Сб. научн. тр. КТУ. – Кривой Рог: КТУ. – 2000. – № 72. – С. 131–136.

4. *Олек J.* Doskonalenie receptur materiałow wybuchowych w celu podwyższenia efektywności użycia i ochrony środowiska // Budownictwo Górnicze i Tunelowe. – 2000. – № 3. – S. 1–5.

5. *Лысюк С. Д.* Оцінка ефективності спінених вибухових систем // Вісник НТУУ «КПІ». – Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2000. – Вип. 3. – С. 62–69.

6. *Лысюк С. Д.* Вспененные аммиачно-селитренные системы для разрушения негабаритных кусков породы // Уголь Украины. – 2000. – № 2–3. – С. 36–39.

7. *Лысюк С. Д.* Устойчивость пенных структур на основе аммиачной селитры разной дисперсности // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: Арт-Пресс. – 1997. – С. 92–95.

8. *А. с. СССР № 1089908, МКИ<sup>4</sup> С06В 31/40.* Взрывчатый состав // Плужник В. И., Кудря Т. П., Вовк А. А.

9. *А. с. СССР № 1166465, МКИ<sup>4</sup> С06В 31/28.* Взрывчатый состав // Плужник В. И., Пивоварова Т. Н., Вовк А. А.; Заявл. 28.04.84.

10. *А. с. СССР № 1064611, МКИ<sup>4</sup> С06В 31/28.* Промышленное взрывчатое вещество // Плужник В. И., Кудря Т. П., Вовк А. А.; Заявл. 8.06.82.

11. *Вовк О. О., Плужник В. І та інші.* Пульсуюча і спінова детонація вибухових речовин // Вісник АН УРСР. – № 4. – 1997. – С. 18–23.

12. *Григорьев А. Н. и др.* Применение малоплотных взрывчатых составов для разрушения негабаритов на карьерах // Промышленные взрывчатые вещества и средства инициирования: Сб. матер. 1-й Украинской конференции. – Шостка, 1995. – С. 67–69.

13. *А. с. СССР № 925162.* Взрывной патрон для отбойки горных пород и составы взрывчатых веществ // Галаджий Ф. М., Сычевская Н. В., Вовк А. А., Плужник В. И и др.; Заявл. 4.01.82.