

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДАХ ВВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Наведені результати досліджень дії вибуху заряду ВВ різної конструкції під час руйнування твердих середовищ. Встановлені характер і форма розвитку детонаційних процесів і чисельні значення швидкості детонації у цих зарядах. Оцінена їх ефективність під час руйнування твердих середовищ.

## RESEARCH OF DETONATION PROCESSES IN EXTENDED CHARGES EXPLOSIVES OF THE VARIABLE SECTION

Results over of researches of action of explosion of charge of explosives of different construction are brought at destruction of hard environments. It is set that, at of development of detonation processes changes of the form and character to the front of her changes substantially, numeral values of speed of detonation are set in these charges. Their efficiency is appraised at destruction of hard environments.

**Введение.** Эффективность действия взрыва зарядов ВВ в горных породах определяется их способностью производить полезную работу по дроблению и перемещению горной массы. Для эффективного управления действием взрыва важным является выбор конструкции заряда. Под конструкцией заряда обычно понимают совокупность таких геометрических и технологических параметров как форма заряда и зарядной камеры, месторасположение точки инициирования, комбинации применяемых ВВ, длина заряда, соотношение частей заряда, заполненных ВВ и забойкой. По геометрическому принципу удлиненные заряды разделяются на две основные группы: заряды с постоянным и переменным сечением по их высоте [1].

**Анализ состояния проблемы.** Существует три способа формирования удлиненных зарядов ВВ переменного сечения, а именно: создание в пробуренных скважинах механическим или термическим способами расширенных участков диаметром, большим диаметра первичной скважины, второй способ – это размещение в пробуренных скважинах ВВ в полиэтиленовых оболочках (рукавах) переменного сечения [1, 2] и третий – формирование внутри зарядов ВВ полостей переменного сечения, заполненных воздухом, инертным или горючим материалом [3, 4]. При этом создаются заряды с явно выраженными максимумами и минимумами энергетического потенциала. При взрыве таких зарядов возрастает роль растягивающих напряжений в разрушении горных пород, энергоемкость разрушения горных пород, которыми на два порядка ниже, чем сжимающими. Поэтому обоснование и разработка способов формирования удлиненных зарядов переменного сечения, оценка эффективности работы предлагаемых конструкций зарядов, являются актуальными.

**Цель работы** – исследование детонационных процессов в удлиненных цилиндрических зарядах переменного сечения для обоснования их рациональных параметров.

**Методика и результаты исследований.** Для изучения особенностей развития детонационных процессов в удлиненных цилиндрических зарядах сплошной конструкции и переменного сечения по его высоте были проведены исследования в полигонных условиях. Программой-методикой предполагалось проведение трех серий экспериментов:

– исследование на моделях из оптически прозрачных материалов развитие детонационных процессов в зарядах переменного сечения с регистрацией скоростной кинокамерой СФР-2М;

– исследование влияния формы свободной поверхности заряда ВВ и контакта «ВВ–разрушаемая среда» на режимы формирования детонационной волны в зарядах промышленных ВВ различных конструкций;

– исследование скорости детонации в зарядах различных конструкций с использованием ионизационных датчиков.

**1. Экспериментальные исследования детонационных процессов на оптически прозрачных моделях.** Для качественного изучения характера формирования и развития детонационных процессов по колонке заряда ВВ переменного сечения нами подготовлены объемные модели из органического стекла размером 100x100x100 мм, который выбран исходя из параметров поля зрения камеры СФР-2М. В подготовленных к исследованиям моделях в центре одной из граней сверлили шпур длиной 65 мм и диаметром 6 мм. Выбор такого диаметра объясняется тем, что использование штатных смесевых ВВ, применяемых в промышленных условиях, не обеспечат стабильность детонации зарядов в экспериментальных взрывах из-за больших значений критического диаметра. Поэтому в качестве ВВ использовали смесевые заряды на основе тэна, имеющего малый критический диаметр (2-4 мм) при котором стабильно развивается процесс детонации ВВ.

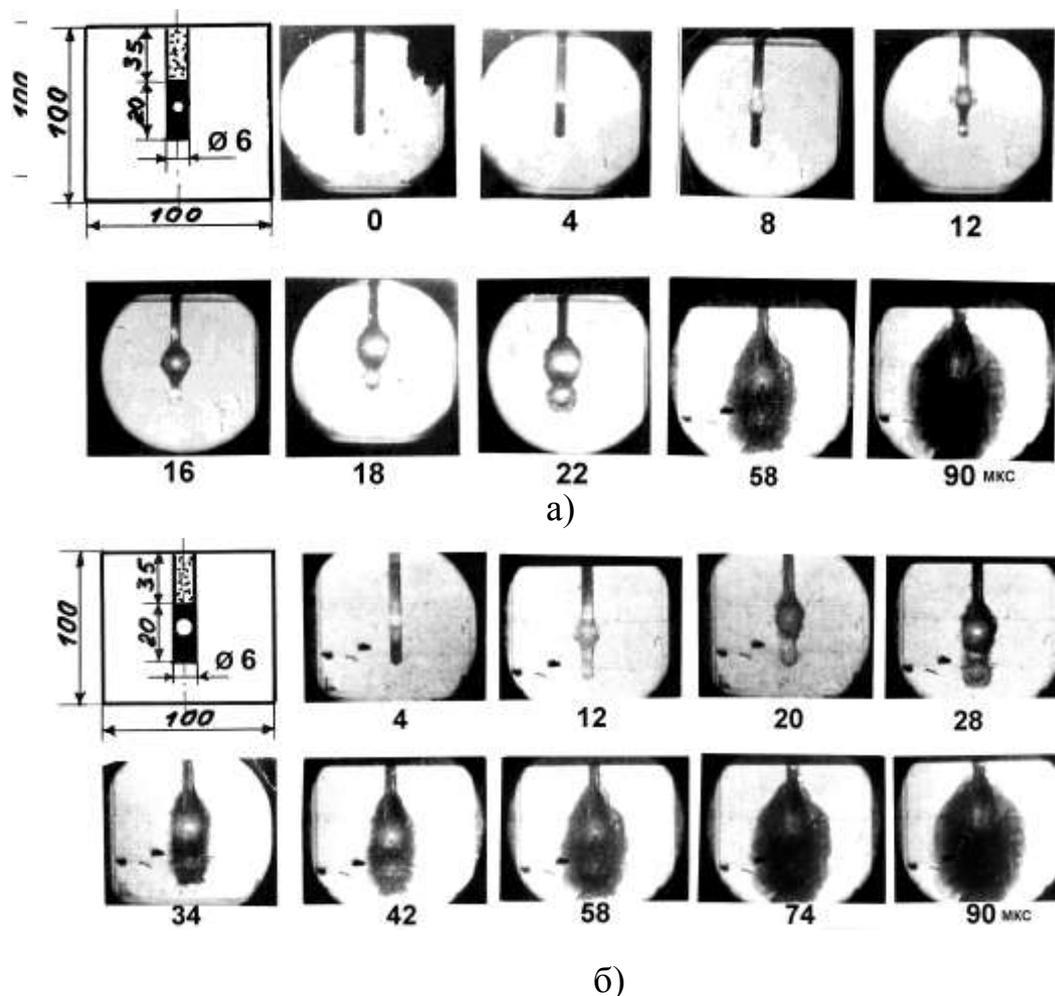
При формировании колонки удлиненного цилиндрического заряда в модели с изменяющимися геометрическими параметрами, к базовому ВВ – тэну, нами добавлялись различные массовые доли твердого ракетного топлива (ТРТ). По данным экспериментальных замеров скорости детонации этих смесей рассчитывались их характеристики, оценивающие их воздействие на разрушаемую среду, и определялось рациональное соотношение смесевых зарядов (ТРТ+тэн) по устойчивости детонации. Согласно результатам исследований выбрано рациональное соотношение смеси равное 80% тэна + 20% ТРТ [5] со следующими параметрами: скорость детонации  $D = 4900$  м/с, расчетное давление на стенки зарядной полости  $P_c = 2,81$  ГПа, теплота взрыва  $Q = 4910$  кДж/кг, акустический импеданс ВВ  $\rho_{ВВ} D = 0,46 \cdot 10^7$  кг/м<sup>2</sup>с, плотность ВВ  $\rho_{ВВ} = 935$  кг/м<sup>3</sup>. Масса смесевых зарядов во всех экспериментах составляла 200 мг, а длина его – 20-22 мм. Инициирование зарядов производили при помощи нихромового мостика с навеской азида свинца массой 10 мг.

Экспериментальные исследования проводились во взрывной камере по исследованию взрывного разрушения твердых сред (ГНИГРИ, г.Кривой Рог) с использованием метода скоростной фоторегистрации процесса в режиме лупы времени на специальном стенде, который состоит из: фоторегистрирующей установки СФР-2М, импульсной лампы ИСШ-300, системы линз, фокусирую-

щих световой поток, пульта управления, взрывной камеры, батареи накопительных конденсаторов и электронного прибора для синхронизации взрыва заряда ВВ в модели со вспышкой импульсной лампы. Характер формирования детонационных процессов по колонке заряда переменного сечения в модели фиксировали на фотопленку чувствительностью 400-800 ед.

В пробуренных зарядных полостях моделей формировались заряды переменного сечения – со сферической полостью в центре заряда диаметром  $0,5d_{шп.}$  и  $(0,92-0,95)d_{шп.}$ , где,  $d_{шп.}$  – диаметр шпура. Устье зарядной полости герметизировали забойкой из кварцевого песка диаметром фракции 0,25 мм. Длина забойки в шпуре находилась в пределах 6-10 диаметров заряда.

По результатам киносъемки процесса разрушения моделей изготовлены кинограммы, которые представлены на рис. 1а и 1б.



а) со сферической полостью диаметром  $0,5d_{шп.}$  и б) –  $(0,92-0,95)d_{шп.}$   
 Рис. 1 – Кинограмма процесса разрушения модели взрыванием смесового заряда (тэн +ТРТ) переменного сечения массой 200 мг.

Как видно из рисунков, для всех серий экспериментов, на первых кадрах регистрации процесса, в интервале 0-8 мкс, после подачи инициирующего импульса на поверхности заряда формируется фронт детонационной волны (светящееся поле на кадрах кинограммы), который двигается по колонке заряда ВВ в торец шпура. Достигнув сферической полости на внутренней торцевой поверхности в центре ее под действием газообразных продуктов формируется очень мощный газовый поток из сходящихся в фокусе (по оси заряда), в центре сферической полости, соударяющихся газовых струй (12 мкс). Этот поток создает мощный инициирующий импульс, переходящий в кумулятивную струю, превышающий скорость детонации смесового заряда ВВ в 1,5-2,0 раза с высоким давлением в потоке более  $\approx 10^3$  МПа (16-22 мкс). Сформированный газовый поток, находящийся под большим давлением начинает расширяться и оказывать воздействие на стенки шпура, формируя сферическую полость, которая в дальнейшем переходит в эллиптическую (рис 1а 22 мкс и 1б-12-20 мкс). В местах расположения кумулятивных сферических полостей, в массиве среды, концентрируется неоднородное и нестационарное поле напряжений, значительно превышающие предел прочности среды, что способствует разупрочнению и последующему ее разрушению.

Дальнейшие кадры кинограммы показывают перемещение сформированного газового потока в торец шпура с последующим их воздействием на среду по всей колонке заряда. Также из кадров кинограммы видно нарастание сети трещин и увеличение объема зарядной полости в 2,5-3,0 раза ко времени 90 мкс.

Анализ взрывов смесового заряда ВВ переменного сечения со сферической полостью диаметром  $(0,92-0,95)d_{\text{шп}}$  показывает, что размещение сферической полости в заряде при непосредственном контакте со стенками зарядной полости ведет к уменьшению степени ее воздействия на разрушаемую среду, то есть изменению радиуса трещинообразования (рис.1, б, кадр 20 мкс) в направлении перпендикулярном от оси заряда в глубь разрушаемой среды и мощности формируемого газового потока разделенной сферической полостью между активной и неактивной частью цилиндрического заряда ВВ без их постоянного контакта между собой. Иной эффект зафиксирован в предыдущей серии экспериментов, в котором сферическая полость располагалась без нарушения контакта активной и неактивной части заряда, что способствовало стабильному протеканию процесса детонации с последующим его усилением в направлении к торцевой части шпура.

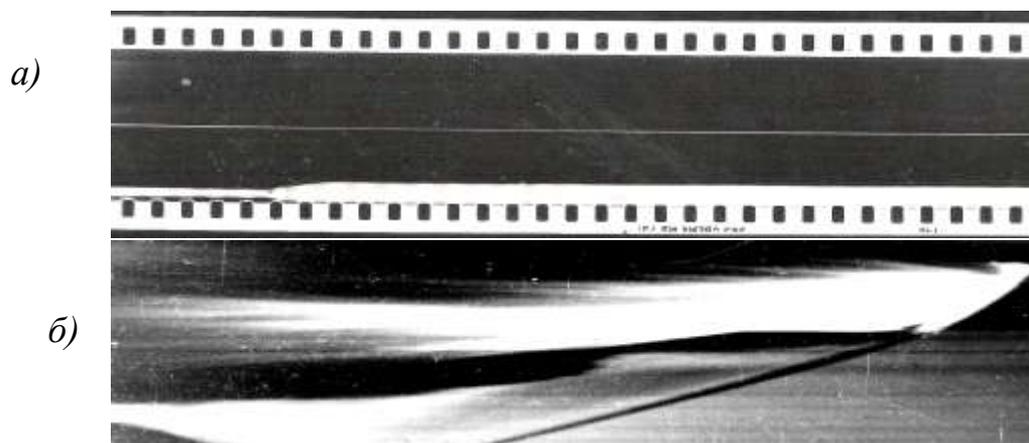
Таким образом, выполненными исследованиями установлено, что при использовании в зарядах ВВ переменного сечения сферических полостей диаметром равным  $0,5d_{\text{шп}}$  обеспечивается устойчивость детонации и изменение механизма воздействия на разрушаемую среду формированием в центре ее мощного газового потока кумулятивного действия снижающий вероятность возникновения канального эффекта. Эти результаты дают возможность обосновать параметры конструкций шпуровых зарядов, позволяющие повысить эффективность отбойки горных пород за счет снижения удельного расхода ВВ, увеличения КИШ, КПД взрыва и безопасности ведения взрывных работ.

2. Исследование влияния формы свободной поверхности заряда ВВ и контакта «ВВ–разрушаемая среда» на режимы формирования детонационной волны в зарядах промышленных ВВ различных конструкций. Исследованиями, выполненными в ИГТМ НАН Украины установлено, что при изменении поверхности контакта ВВ с разрушаемой средой и наличие различной формы свободной поверхности контакта ВВ изменяется и характер волнового поля в нем. Так если между ВВ и разрушаемым материалом имеется свободная поверхность, либо специально созданная форма контакта ВВ, то условия выхода фронта детонационной волны и взрывных газов на разрушаемую среду будут зависеть от граничных условий между ВВ и средой.

Для оценки влияния формы свободной поверхности ВВ и контакта ее с разрушаемой средой на волновое поле, возникающее в твердой среде, нами проведена серия экспериментальных исследований на моделях из органического стекла и цилиндрических зарядах различных конструкций, помещаемые в прозрачную полиэтиленовую или стеклянную оболочку. В исследованиях использовали порошкообразное ВВ – тэн и аммонит №6ЖВ, гранулированное ВВ – тротил, граммонит 79/21. Регистрация взрывных процессов осуществлялась сверхскоростной фоторегистрирующей установкой СФР-2М и ВФУ-1М. Эксперименты проводились в промышленных условиях на полигоне карьера Еленовского комбината строительных материалов (ЕКСМ г. Енакиево Донецкой области).

На подготовленной плоской модели из органического стекла размером 150x200x40 мм закрепляли стеклянный цилиндр диаметром 5 мм, в который размещали порошкообразный тэн массой 500 мг и плотностью 1,3 кг/м<sup>3</sup>. Между моделью и зарядом создавали зазор шириной 1,0 мм. Для качественной съемки процесса использовали дополнительный источник света, установленный на горизонтальной площадке с обратной стороны от лицевой поверхности модели. Инициирование осуществляли детонатором с устья от торца колонки заряда, а съемку вели с противоположной стороны по линии вдоль диаметра торца заряда в режиме фоторегистратора. По фоторегистрограммам определялась скорость разлета продуктов взрыва (ПВ) с замером тангенса угла наклона развертки ее свечения, фиксировалась форма и направление распространения фронта детонационной волны. На рис. 2 а представлена типичная фоторегистрограмма взрыва заряда тэна в модели оргстекла с зазором в разрушаемой среде, а на рис. 2б форма и развитие процесса детонации в порошкообразном тэне.

Так как ударная адиабата плексигласа известна:  $D_{y\delta} = 2,71 + 1,574v_{y\delta}$ , то скорость детонации ВВ  $D_{ВВ}$  и  $v_{y\delta}$  скорость ударной волны можем определить по фоторегистрограммам. Давление на фронте детонационной волны  $P$ , массовая скорость  $v_0$  и показатель политропы  $n$  рассчитываются по известным соотношениям [6]:



а) – с зазором в плексигласе; б) – форма и развитие процесса детонации;  
 Рис.2 – Фоторегистрограмма взрыва заряда порошкообразного тэна.

Давление на фронте детонационной волны:

$$P = \rho_{y\delta} D_{y\delta} v_{y\delta} \quad (1)$$

Массовая скорость, 
$$v_{\delta} = \frac{1}{2} v_{y\delta} \left( 1 + \frac{\rho_{y\delta} D_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{ВВ}} D_{y\delta}} \right), \quad (2)$$

Показатель политропы 
$$n = \frac{D}{v_{\delta}} - 1 \quad (3)$$

где –  $\rho_{\text{ВВ}}$  и  $\rho_{y\delta}$  – плотность ВВ и ударной волны ;  $v_{\delta}$  и  $v_{y\delta}$  – массовая скорость и скорость ударной волны;  $D_{\text{ВВ}}$  и  $D_{y\delta}$  – скорость детонации ВВ и скорость детонации в ударной волне;  $n$  – показатель политропы.

Расчетные значения давления детонации, вычисленные по формуле  $D_n = \frac{\rho_0 D^2}{n+1}$  хорошо согласуются с экспериментальными. Результаты расчетных и экспериментальных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные данные детонационных характеристик для тэна

Плотность ВВ, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость детонации, D, км/с	Скорость ударной волны, $v_{y\delta}$ , км/с	Показатель политропы $n$	Давление на фронте детонационной волны (расчет.), $P_{\text{рас}}$ , ГПа	Давление на фронте детонационной волны (экспер.), $P_{\text{экс}}$ , ГПа
950	5,55	0,5	0,5	18,0	16,5

Анализ представленных фоторегистрограмм показал, что волновые процессы на поверхности твердой среды и при ее разрушении формируются раньше, чем фронт детонации подойдет к поверхности ВВ. Фронт детонации имеет значи-

тельную кривизну, а ударная волна, возникающая на границе промежуточных сред – «зазор-разрушаемая среда» на 12 мкс опережает приход детонации на границе «ВВ-зазор». Вероятно имеет место процесс связанный с формированием на поверхности контакта с разрушаемой средой высокотемпературных плазм.

Ранее выполненными исследованиями установлено [6], что свободная поверхность ВВ является генератором плазмы, которая опережает фронт детонационной волны. Следовательно, роль плазм в разрушении пород крупнодисперсными промышленными ВВ очень велика, поскольку плазмы первыми контактируют с разрушаемой поверхностью твердой среды и влияют на форму взрывного импульса в химических процессах, происходящих в продуктах взрыва. Поэтому очень важно было оценить роль поверхности при контакте ВВ с промежуточной средой на пространственные изменения фронта детонационной волны и внешней плазмы.

Для решения поставленных задач были проведены несколько серий экспериментальных взрывов зарядов ВВ постоянного и переменного сечения с использованием сухого гранулированного тротила (ТНТ).

Исследуемые заряды ВВ формировали в прозрачных цилиндрических оболочках – стеклянных или полиэтиленовых трубах диаметром 150 мм и длиной 1,5 м. В зарядах сплошной конструкции тротилом заполняли всю колонку цилиндра, а в зарядах с промежуточной средой в противоположном торце размещали буровой штыб диаметром фракции 2-4 мм. При формировании заряда ВВ переменного сечения на расстоянии 1,0- 1,1 м от торца устанавливали сферическую вставку диаметром  $0,5d_{зад.}$ , где  $d_{зар}$  – диаметр заряда. Подготовленные заряды размещали на горизонтальной площадке в поле зрения прибора ВФУ-1М, позволяющая фиксировать процессы, происходящие вдоль диаметра поверхности заряда, а инициатор – в противоположном конце заряда. Исследованиями предусмотрено варьирование формы торца заряда: плоский торец, плоскость торца ВВ которого, перпендикулярна съёмки; плоская, но с углом наклона 15 и 80° по направлению к торцевой поверхности; плоская с торцевым размещением промежуточной среды, сферической полости и типа ВВ – граммонит 79/21, ТНТ, аммонит №6ЖВ .

Типичные фоторегистрограммы экспериментальных взрывов по изучению фронта детонационной волны от взрыва заряда, например, сухого тротила, в зависимости от формы и угла наклона торца заряда приведены на рис.3, а, б, в.

При среднем показателе политропы для промышленных ВВ равном 1 формула для расчета давления в детонационной волне имеет вид

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{n + 1}, \quad (4)$$

тогда при показателе политропы  $n=3$  имеем



а) поверхность торца заряда ВВ перпендикулярна направлению съемки; б) поверхность торца заряда ВВ наклонена к направлению съемки под углом  $15^{\circ}$ ; в) –  $80^{\circ}$  соответственно

Рис. 3 – Фоторегистрограмма выхода детонации на поверхность заряда сухого тротила

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{4} \quad (5)$$

Расчетные и замеренные значения давления на фронте детонационной волны для различных типов ВВ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные показатели детонационных характеристик промышленных ВВ

Тип ВВ	Плотность ВВ, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость детонации, D, км/с	Давление на фронте детонационной волны (расчет.), $P_{рас}$ , ГПа	Давление на фронте детонационной волны (экспер.), $P_{эксп}$ , ГПа
ТНТ	800	5,01	5,3	3,8
Граммонит 79/21	850	3,6	2,9	2,1
Аммонит №6ЖВ	1200	4,2	4,6	3,2

Анализ экспериментальных взрывов показывает, что в зарядах ВВ, у которых торцевая поверхность наклонена к направлению съемки, зафиксировано опережение свечения более удаленного участка ВВ на  $5-10 \cdot 10^{-6}$  с. Фоторазвертка напоминает форму иглы.

При больших углах наклона форма свечения (рис. 3в), сопровождающего выход детонации на поверхность заряда, не повторяет форму поверхности ВВ при малых углах наклона (рис. 3а). При этом форма свечения близка к форме поверхности ВВ.

Для изучения особенностей формы и геометрических параметров формирования фронта детонационной волны в цилиндрическом заряде при встрече ее с

промежуточной средой – буровой штыб и сферическая поверхность была выполнена серия экспериментальных исследований, фоторегистрограмма которых приведена на рис. 4а, 4б.



а) буровой штыб; б) сферическая поверхность

Рис.4 – Фоторегистрограмма встречи детонационных волн в заряде сухого тротила с промежуточной средой

Из рис. 4а видно, что область встречи детонационной волны с промежуточной средой фронт ее имеет несколько не традиционную конфигурацию. Так, на расстоянии 2-5 см от плоскости встречи детонационной волны с промежуточной средой ее свечение уменьшается и происходит разделение фронта на два потока. Очевидно этот эффект сопровождается внутренней плазмой, сформированной впереди фронта детонационной волны. Плазмы, опережающие фронт детонационной волны при встрече с промежуточной средой приводят к некоторому замедлению процесса с последующим разбрасыванием фронта на несколько плазм и проявлению неполноты детонации ВВ. Это приводит к снижению или отсутствию свечения, а следовательно и ухудшению разрушающего действия взрыва при встрече с промежуточной средой. Совсем иная картина просматривается при встрече детонационной волны со сферической полостью (рис.4б). После контакта с поверхностью полости сформированный плазменный поток, опережая детонационную волну, с возросшей скоростью перемещается по колонке заряда в торцевую ее часть. В области контакта ВВ и сферической полости с поверхностью разрушаемой среды активизируются плазменные процессы. Причем в зависимости от формы фронта и контакта ВВ с промежуточной средой – сферической полостью зафиксированы плазменные процессы, играющем важную роль в разрушающем действии детонационной волны, но и на устойчивость детонационного процесса (канальный эффект).

Таким образом, нами установлено, что при взрыве реальных скважинных зарядов сухих гранулированных и порошкообразных ВВ зафиксировано формирование впереди детонационной волны плазменных процессов. Сформированные в зарядах сплошной конструкции импульсы с высоким пиковым давлением и малой длительности не обеспечивают эффективность разрушения, чем взрывные импульсы такой же величины с меньшим пиковым давлением, но большей длительностью. Снижение пикового давления может быть реализовано при выходе

плазм на контакт с промежуточной средой – сферической вставкой, имеющую воздушную полость, в зарядах переменного сечения. Наличие в воздушной полости большого числа мельчайших пузырьков воздуха при высокой температуре, давлении и ионизации частиц воздуха в области плазм достаточно для обеспечения адиабатического сжатия пузырьков воздуха, их микровзрывание, размещенных между ВВ и разрушаемой средой. Следовательно, размещение сферических полостей с воздухом в зарядах ВВ позволит преобразовать форму взрывного импульса, снижая величину пикового давления и увеличивая его действие. Результаты выполненных исследований по изучению детонационных процессов в зарядах переменного сечения позволили обосновать механизм действия взрыва этих зарядов на разрушаемую среду, приоритет которых защищен патентами Украины [3,4].

**3. Исследование скорости детонации в зарядах различных конструкций с использованием ионизационных датчиков.** Скорость детонации является важнейшим параметром взрыва, определяющим его мощность, бризантное действие и давление, оказываемое на стенки зарядной камеры.

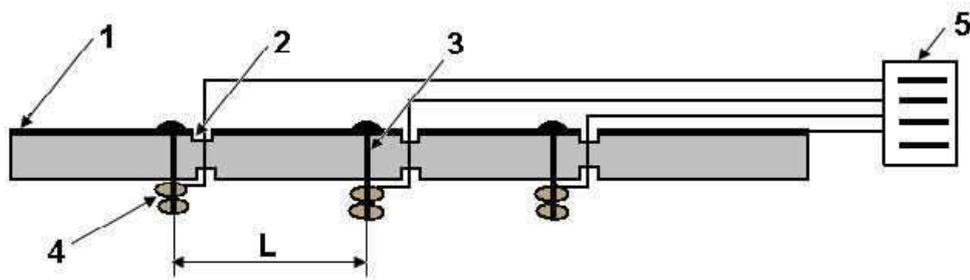
Учитывая, что освоение глубоких горизонтов по добыче и переработке полезных ископаемых связано с усложнением горно-геологических условий – обводненность, повышение крепости пород, напряженность горного массива выдвинуло требования к совершенствованию способов отбойки горных пород и применению высокоэффективных взрывчатых составов в конструкциях зарядов. Поэтому, для рекомендаций к промышленному использованию разработанных в ИГТМ НАН Украины новых конструкций зарядов кумулятивного действия были проведены в полигонных условиях сравнительные экспериментальные исследования по устойчивости детонации в зарядах ВВ сплошной конструкции и переменного сечения.

Для проведения двух серий экспериментов по замеру скорости детонации в удлиненных цилиндрических зарядах были подготовлены цилиндрические полости диаметром 16 мм и длиной 210-230 мм. Для формирования колонки удлиненного цилиндрического заряда в качестве ВВ использовали смесь тэн + твердое ракетное топливо (ТРТ) при их рациональном соотношении – 80% тэна + 20% ТРТ [5]. Масса одновременно взрываемого смесевых зарядов составляла 16-20 г. Инициировали заряды боевиком, состоящего из цилиндрического патрона диаметром 3-4 мм, начиненный чистым тэном массой 100мг и инициатора – никромового мостика с навеской азида свинца массой 10 мг. Подача иницирующего импульса к инициатору осуществлялось взрывным прибором ВПК-1 [7], разработанным в ИГТМ НАН Украины совместно с ГВУЗ «Национальный горный университет».

В современных исследованиях промышленных ВВ и конструкций зарядов, в которых они размещены, наибольшее распространение для измерения скорости детонации получили ионизационные датчики.

Достоинствами таких датчиков являются простота конструкции, стабильность срабатывания и надежность работы в агрессивной среде водонаполненной смеси. Однако при испытании водосодержащих и водонаполненных ВВ требуется дополнительная их герметизация.

На рис.5 приведена конструкция датчиков для испытания зарядов взрывчатых веществ с большим удельным электрическим сопротивлением.

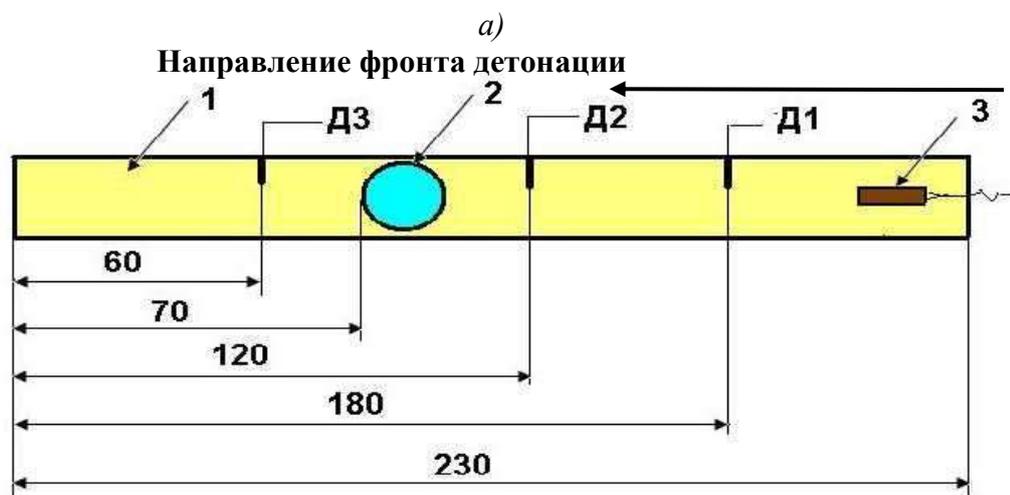
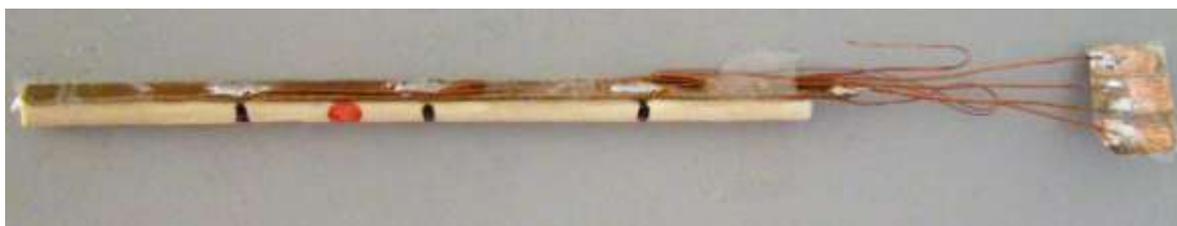


1 – центральный электрод; 2 – прорезь; 3 – медный стержень;  
4 – спиральные витки из медного провода; 5 – разъем.

Рис. 5 – Датчик для испытаний зарядов сухих неэлектропроводных ВВ.

В основу датчика для создания цельного крепежного основания – пластины использован фольгированный текстолит шириной 10 мм и длиной 230мм с размещением на ней центрального электрода **1**. В пластине по длине базы измерения  $L$  выполняют прорези **2** длиной до 5 мм и глубиной 3-4 мм в количестве трех. Рядом с прорезью **2** на расстоянии 5 мм по центру пластины формируют отверстие диаметром 1 мм, в которое устанавливают стержень **3** из медного проводника марки ПЭВ-2 диаметром 0,75 мм, обратный конец которого распаивают с центральным электродом **1**. На закрепленном отводе – стержне **3** центрального электрода **1** наматывают в виде спирали витки **4** из эмалированного медного провода марки ПЭВ-2 диаметром 0,4 мм. Проводники **4** изгибая, укладывают в прорези **2**, а затем прокладывают вдоль пластины и скрепляют клейкой лентой. Выводы проводников **4** от каждого ионизационного датчика и центрального электрода **1** распаивают на соответствующих контактах разъема **5**.

На цилиндрическую поверхность подготовленного для испытаний заряда крепят систему ионизационных датчиков путем прокалывания поверхностью датчика оболочки заряда и закрепление ее клейкой лентой. Схема и внешний вид заряда с датчиками для замера скорости детонации представлен на рис. 6 а, бб.



а) внешний вид заряда с ионизационными датчиками; б) схема заряда с ионизационными датчиками: 1 – заряд ВВ; 2 – сферическая полость; 3 – патрон-боевик с капсулом-детонатором; Д1, Д2, Д3 – ионизационные датчики.

Рис. 6 – Схема и внешний вид заряда ВВ с ионизационными датчиками для замера скорости детонации.

В экспериментах скорость детонации в исследуемых конструкциях зарядов определяли на двух участках по длине заряда (рис. 6). Длина участка базы замера была постоянной и составляла 60 мм.

Для регистрации электрических сигналов ионизационного датчика используют специализированные регистраторы временных интервалов. Применяемые до настоящего времени регистраторы для фиксации моментов прихода импульсов от ионизационного датчика не обеспечивают точность замеров из-за следующих основных недостатков: узкий диапазон рабочих температур (+5...+40 °С), громоздкость, необходимость использования мощного аккумулятора, снижающие оперативность его применения, проблематичность использования прибора при низких и высоких температурах.

Учитывая приведенные недостатки такого регистратора и исходя из необходимости иметь для испытания ВВ компактный, легкий, точный, с широким температурным диапазоном работы и автономным питанием в отделе механики взрыва горных пород ИГТМ НАН Украины разработан новый прибор – измеритель временных интервалов – ИВИ-1. Измеритель временных интервалов ИВИ-1 предназначен для измерения последовательных временных интервалов

при исследованиях детонационных характеристик зарядов взрывчатых веществ и средств взрывания. Внешний вид измерителя временных интервалов с датчиками приведен на рис.7.



Рис.7 – Измеритель временных интервалов ИВИ-1 и выносной кабелем с датчиками.

Принцип действия прибора основан на измерении длительности временных интервалов между моментами последовательного замыкания ионизационных датчиков, расположенных на определенных базах в направлении движения фронта детонации.

Время распространения фронта детонации (рис.6) от одного ионизационного датчика к другому  $\tau$  связано с базой измерения  $\Delta L$  зависимостью

$$v = \frac{\Delta L}{\tau},$$

где  $v$  – скорость распространения фронта детонационной волны на участке  $\Delta L$ .

Подготовленные к экспериментам заряды с датчиками подключают к измерителю и производят тестирование прибора включением электропитания. При появлении напряжения на выходе стабилизатора начинает работать кварцевый автогенератор, генерирующий импульсы с частотой 1 МГц. Указанные импульсы подаются на входы двоичных счетчиков 1,2,3 и делитель частоты.

После инициирования заряда сформированный фронт детонационной волны ионизационными продуктами взрыва замыкает сначала пусковой датчик, а затем последовательно следующие за ним остальные ионизационные датчики, что способствует на входном устройстве последовательному генерированию коротких импульсов, нормированных по амплитуде и длительности, с интервалами, равными интервалам между моментами замыкания датчиков.

Для считывания результатов измерения кнопкой, на торцевой панели прибора включается формирователь адреса базы измерения. При каждом однократном нажатии кнопки изменяется на единицу номер базы измерения в левом крайнем разряде индикатора. Одновременно данные с соответствующего счетчика через мультиплексор и дешифратор передаются на индикатор в виде длительности интервала в микросекундах в двух правых разрядах индикатора.

Таким образом, при взрывании заряда ВВ в направлении движения фронта детонации измеритель временных интервалов фиксирует моменты замыкания датчиков и определяет интервалы времени между ними.

По длительности интервала времени  $\tau_i$  вычисляются результаты измерения скорости детонации на каждой базе по формуле

$$v_i = \frac{L_i}{\tau_i},$$

где  $v_i$  – средняя скорость детонации на базе  $L_i$ . Число баз измерения – 2.

Результаты замеров скорости детонации для двух исследуемых зарядов сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные замеров скорости детонации в зарядах ВВ различных конструкций

Конструкция заряда	Номер базы измерения	База измерения, см	Измеренный интервал, мкс	Скорость детонации ВВ, м/с	Средняя скорость детонации, м/с
Удлиненный цилиндрический заряд сплошной конструкции	1	6	12,4	4838	4970
	2	6	11,9	5042	
Удлиненный цилиндрический заряд переменного сечения	1	6	12,5	4762	6435
	2	6	7,4	8108	

Анализ таблицы показывает, что при совершенно идентичных условиях проведения эксперимента: диаметр заряда, масса ВВ, плотность и состав смесового ВВ, длина колонки заряда не оказывает существенного влияния на скорость детонации по всей колонке заряда при соприкосновении фронта с первой базой измерения для двух конструкций зарядов. Существенного изменения параметров детонации для заряда сплошной конструкции при прохождении второй базы измерения также не зафиксировано. Только произошел небольшой разгон ее и выход на устойчивый режим для этого смесового ВВ (5042 м/с). Характер развития детонации в заряде переменного сечения изменился при встрече фронта со сферической полостью. Произошло фокусирование плазменных потоков (газовых струй), что способствовало формированию мощного иницирующего импульса позволивший увеличить скорость детонации 1,5-1,8 раза. При прохождении фронта второй базы измерения значения скорости детонации достигла 8108 м/с. Следовательно, использование предложенной конструкции заряда при разрушении крепких напряженных пород позволит повысить эффективность взрывных работ, стабильность детонации по колонке заряда и снизить вероятность возникновения «канального эффекта».

**Выводы.** 1. Предложенные методики экспериментальных исследований детонационных процессов в зарядах ВВ различных конструкций позволяют с достаточной точностью изучить процесс распространения детонации по колонке удлиненных зарядов.

2. Установлено, что в зарядах ВВ переменного сечения при использовании

сферических полостей диаметром равным  $0,5d_{\text{штп}}$  обеспечивается устойчивость детонации и изменение механизма воздействия на разрушаемую среду за счет формирования в центре ее мощного газового потока кумулятивного действия снижающий вероятность возникновения канального эффекта.

3. Экспериментально установлено, что снижение пикового давления на массив достигается выходом плазм на контакт с промежуточной средой – сферической вставкой, имеющую воздушную полость, в зарядах переменного сечения. Наличие в воздушной полости большого числа мельчайших пузырьков воздуха при высокой температуре, давлении и ионизации частиц воздуха в области плазм ведет к адиабатическому сжатию пузырьков воздуха, их микровзрыванию, размещенных в полости между ВВ и разрушаемой средой. Размещение сферических полостей с воздухом в зарядах ВВ позволит преобразовать форму взрывного импульса, снизив величину пикового давления при нагружении на разрушаемый массив и увеличив эффективность его действия при разрушении горных пород.

4. Для обеспечения надежности и стабильности детонации, а также эффективности разрушения горных пород необходимо в скважинных зарядах располагать сферические полости в местах залегания пород крупноблочного строения и высокой крепости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Ефремов, Э.И. Способы взрывной отбойки горных пород удлиненными зарядами переменного сечения / Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, К.С. Ищенко //Науково- виробничий збірник Кременчуцького державного політехнічного університету «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Випуск № 1/2008 (1). – С.7-11.

2.Ефремов, Э.И. Влияние конструкции заряда и уровня обводненности горных пород на интенсивность их дробления / Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, Е.В. Николенко //Науково- виробничий збірник Кременчуцького державного політехнічного університету «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Випуск № 1/2008 (2). – С.7-13.

3.Пат. 79805 Україна, МПК<sup>7</sup> F42D 3/04.Спосіб формування свердловинного заряду вибухової речовини / Булат А.Ф., Іщенко К.С., Осінній В.Я; заявник і власник патенту Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України – № а 2005 01166; замовл.09.02.05; надрук. 25.07.07., Бюл. №11.

4.Пат.№ 86138 Україна, МПК 9 E 21 F 15/00, E 21 D 21/00.Спосіб формування свердловинного заряду кумулятивної дії для вибухового руйнування гірських порід /Булат А.Ф., Іщенко К.С., Джос В.П., Осінній В.Я., Коновал В.М., Іщенко О.К.; заявник і власник патенту Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України – № а 2007 08501; замовл. 24.07.07; надр.25.03.09., Бюл.№6.

5. Ефремов Э.И Оценка эффективности действия смесевых зарядов ВВ с энергоактивными добавками/ Э.И. Ефремов, В.М. Комир, В.А. Никифорова// Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: НГАУ. – 1999. – № 8. – С.77-80.

6.Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах /М.А. Кук. – М.: Недра,1980. – 453 с.

7. Пат. №59776 Україна, МПК F 42 D 3/04 (2006.01). Вибуховий прилад конденсаторний (ВПК-1)/ К. С. Іщенко, О. К. Іщенко; заявник і власник патенту Національний гірничий університет. – № 201014552; заявл. 06.12. 10; надр. 25.05. 11. – Бюл. № 10.

## СТРУКТУРНІ ТРАСФОРМАЦІЇ ВУГІЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ В ПРОЦЕСІ ГАЗОГЕНЕРАЦІЇ

Показаны механизмы структурных трансформаций угольного вещества, связанные с генерацией метана и газодинамическими явлениями. Преобразования энергетически обоснованы, активированы механохимическими реакциями и проходят в угольном веществе по радикально-цепному механизму. Процессы релаксации накопленного энергетического потенциала определяют направление и кинетику структурных превращений вещества.

## STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF COAL MATTER IN THE PROCESS GENERATIONS OF GAS

The mechanisms of structural transformations of coal matter are shown, connected with the generation of methane and gas dynamics phenomenon. Transformations power are grounded and activated by the mechano-chemical reactions and passed in the coal matter on a radical-chain mechanism. The processes of relaxation of the accumulated power potential determine direction and kinetics of structural transformations of matter.

Метан вугільних родовищ залишається для України водночас і великою проблемою і великою надією. Багаторічні зусилля багатьох дослідників суттєво розширили наші уявлення про вугілля та вугільні гази, але не дали повноцінного рішення цієї важливої енергетичної, економічної, екологічної, соціальної проблеми. Від так треба змінювати підхід до об'єкту досліджень. Як що буде відомо як утворюються вугільні гази постане можливість впливати на процеси в газонасиченому вугільному масиві. Ця робота базується на припущенні, що метан генетично пов'язаний з органічною речовиною вугілля. При такому підході проблема, значною мірою, зводиться до вивчення механізмів та умов при яких тверда вугільна речовина генерує флюїди.

**Метою** досліджень є визначення механізмів за якими відбуваються структурні перетворення у вугільній речовині пов'язані з поточною генерацією метану та газодинамічними явищами.

**Аналіз проблеми.** Метаморфізм вугілля загально визнаний факт. Перетворення впевнено фіксуються при зміні термодинамічних умов в масиві. Тобто углефікація це закономірна реакція молекулярної структури речовини на зміну зовнішніх умов. Особливості углефікаційних перетворень впевнено простежуються по окремих вугільних пластах (рис.1). Пласт  $l_4$  відпрацьовується чи відпрацьовувався у багатьох геолого-промислових районах Донбасу і представлений усіма марками кам'яного вугілля та антрацитами. Умови накопичення фітомаси були практично однакові на всій площі, отже, органічна речовина в первинному стані була дуже близькою по елементному і хімічному складу, зараз ця ж речовина знаходиться на різних стадіях углефікації.