

Оценка радиуса камуфлетной полости при взрыве сферического заряда тэна в горных породах

Д.т.н., профессор В.А. Боровиков, к.т.н., доцент В.К. Сластенко, аспирант И.А. Кадол

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике гражданского строительства наметилась тенденция роста количества и объёма резервуаров для подземных нефтегазохранилищ и емкостей для захоронения токсичных промышленных отходов. Такие емкости образуются камуфлетными взрывами, в том числе с использованием ядерных зарядов.

В связи с этим чрезвычайно актуальна оценка радиуса камуфлетной полости, как в пластичных, так и в скальных горных породах, сооружаемых камуфлетными взрывами с широким диапазоном изменений объёмной концентрации энергии в зарядной камере.

Кроме того, результаты подобных исследований представляют большой интерес при установке камуфлетных свай, включая трубосвай, которые используются при сооружении высокопрочных оснований и фундаментов.

В данной статье приводятся результаты измерений радиуса камуфлетной полости при взрыве заряда тэна плотностью $\rho_0=1,6 \text{ г/см}^3$, массой 1 и 2г в модельных средах и горных породах в широком диапазоне изменения их акустической жёсткости $\rho_n C_p$ (ρ_n - плотность горной породы, г/см^3 , C_p - скорость распространения продольной волны, м/с). Работа проводилась с целью определения влияния физико-механических свойств горных пород на размер радиуса камуфлетной полости и давления продуктов взрыва в ней.

На современном этапе развития науки и техники внимание к использованию энергии взрыва в горном деле и строительстве не только не снижается, а напротив – постоянно растёт. Это объясняется тем, что в объёме взрывчатого вещества (ВВ) заключена значительная потенциальная энергия, превышающая 3600 кДж/кг . Причём мощность взрыва может регулироваться в широком диапазоне значений, обеспечивая заданную степень разрушения от гладкого раскола при контурном взрывании и щадящей отбойке кристаллосодержащих пород до интенсивного дробления.

Актуальность оценки радиуса камуфлетной полости следует из того, что эффективность действия взрыва в горных породах оценивается конечным размером радиуса камуфлетной полости. В случае хрупкого разрушения горных пород согласно [1] зоны дробления и трещинообразования могут быть определены через величину радиуса камуфлетной полости $R_{к.п.}$ по зависимости вида:

$$\bar{r} = \frac{r}{R_{к.п.}}, \quad (1)$$

где \bar{r} - относительная величина зоны дробления и трещинообразования;

r - текущий размер зоны дробления и трещинообразования, м ;

$R_{к.п.}$ - радиус камуфлетной полости, м .

В свою очередь, при взрыве заряда в грунтах в работе [2] радиус камуфлетной полости рекомендуется определять по эмпирической формуле вида:

$$R_{к.п.} = (0,4 \div 0,5) \sqrt[3]{G}, \quad (2)$$

где G - масса заряда ВВ, выраженная через тротиловый эквивалент, кг .

Профессор Г.И. Покровский [3] для грунтов и горных пород рекомендовал формулу аналогичного вида:

$$R_{к.п.} = (0,1 \div 0,4) \sqrt[3]{G} \quad (3)$$

Причём меньшее значение коэффициента рекомендуется для скальных горных пород. Подобная формула для оценки радиуса камуфлетной полости в скальных горных породах приведена в монографии Ф.А. Баума [4], а именно:

$$R_{к.п.} = \psi \sqrt[3]{G}, \quad (4)$$

где $\psi=(0,10 \div 0,13)$ — численный коэффициент.

При известной массе ВВ радиус заряда определяется по формуле:

$$R_{0з} = \sqrt[3]{\frac{3G}{4\pi\rho_0}} \quad (5)$$

Эта формула является частным случаем энергетической формулы:

$$R_{0з} = \sqrt[3]{\frac{3GE}{4\pi\rho_0}}, \quad (6)$$

где E - энергия используемого ВВ, *ккал/кг*.

Для эталонного заряда тротила плотностью $\rho_0=1600 \text{ кг/м}^3$ формула, согласно Ю.С. Яковлеву [5], примет вид:

$$R_{0з} = 0,053\sqrt[3]{G}, \text{ м} \quad (7)$$

Если преобразовать формулу (4), перейдя к оценке радиуса камуфлетной полости через радиус заряда в тротиловом эквиваленте, то формула примет вид:

$$R_{к.п.} = (2 \div 2,6)R_{0з} \quad (8)$$

Моделируя взрыв в хрупких средах на блоках из тиосульфата натрия и каменной соли, В.Н. Родионов с сотрудниками [1] получил значение радиуса камуфлетной полости, близкое к приведённому выше (см. рис. 3 в [1]). Однако, исходя из физико-механических свойств этих материалов, они, согласно классификации профессора А.Н. Ханукаева [6] могут быть отнесены к породам средней акустической жёсткости с $\rho_n C_p = (1,7 \div 4,3) \cdot 10^3 \text{ г/см}^3 \cdot \text{м/с}$. А поскольку акустическая жёсткость скальных горных пород – мрамора, гранита, диабазы и других — существенно выше, то и радиус камуфлетной полости в них, очевидно, должен быть значительно меньше, чем $2R_{0з}$.

В работе [1] для оценки радиуса камуфлетной полости в скальных породах получено уравнение вида:

$$\frac{4\pi R_{к.п.}^{\max} \rho_n C_p^2}{3E} = 38 \left(\frac{\rho_n C_p^2}{250\sigma_{сж}} \right)^{2/3}, \quad (9)$$

где E - энергия взрыва;

ρC_p^2 - ударная сжимаемость породы;

$\sigma_{сж}$ — предельное значение прочности горной породы на сжатие.

Выше приведённое уравнение решается относительно радиуса камуфлетной полости, т.е.:

$$R_{к.п.}^{\max} = \frac{9,5E}{\rho_n C_p^2} \left(\frac{\rho_n C_p^2}{250\sigma_{сж}} \right)^{2/3} \quad (10)$$

После несложных преобразований формула для оценки радиуса камуфлетной полости в скальных горных породах примет вид:

$$R_{к.п.}^{\max} = 0,2286E \left(\rho_n C_p^2 \sigma_{сж} \right)^{-1/3} \quad (11)$$

Приближенная оценка радиуса камуфлетной полости для скальных пород типа гранита $2,7 \text{ г/см}^3$ при скорости распространения звука $C_p = 5000 \div 5500 \text{ м/с}$ показала, что при прочности гранита на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 1700 \text{ кгз/м}^2$ значение радиуса камуфлетной полости существенно меньше значений, приведённых для тиосульфата натрия и каменной соли.

Значения прочности горной породы на сжатие характеризуется некоторой неопределённостью из-за реализации в ближней зоне взрыва сложного напряжённого состояния, сопровождающегося существенным ростом прочности. Поэтому значения радиуса камуфлетной полости оказались существенно ниже зафиксированных в опытах с тиосульфатом натрия (см. рис. 2 в [1]).

Боровиков В.А., Сластенко В.К., Кадол И.А. Оценка радиуса камуфлетной полости при взрыве сферического заряда тэна в горных породах

Следует отметить, что приведённое значение радиуса камуфлетной полости при взрыве сферического заряда тэна в граните, зафиксированное после распиловки модели, согласно [7], «практически оказалось равным радиусу зарядной камеры». Отсюда следует, что предложенные Г.И. Покровским и Ф.А. Баумом формулы (3) и (4) для определения радиуса камуфлетной полости в скальных горных породах требуют корректировки. С другой стороны, формула (11), согласно В.М. Цветкову, была ориентирована на использование ядерных взрывов, поэтому её использование для химических ВВ требует корректировки с реализацией в полости зарядной камеры температур продуктов взрыва, не способных провоцировать испарения и плавления горных пород. Получение достоверных размеров радиуса камуфлетной полости чрезвычайно актуально в связи с тем, что объём камуфлетной полости при известной адиабате продуктов взрыва адекватно определяет давление и энергию продуктов детонации в ней. Поэтому нами были продолжены эти исследования с использованием современного метода регистрации быстро протекающих процессов – метода импульсной рентгеносъёмки с высокой разрешающей способностью [6].

Методика исследования

Кинематические параметры процесса развития полости зарядной камеры в динамическом режиме регистрировались рентгенографическим методом. Используемая при этом импульсная рентгеновская установка включила в себя генераторы импульсного напряжения, рентгеновские трубки, вакуумную систему для создания и поддержания в них высокой степени разрежения, цепи задержки срабатывания рентгеновских трубок, зарядные цепи и устройства, а также другие вспомогательные узлы.

Генераторы импульсного напряжения, заряженные через выпрямительное устройство, позволяют получать импульсы с амплитудой 800kV , которые подаются на электроды рентгеновских трубок. В начальной стадии вакуумного пробоя междуэлектродного промежутка возникает весьма кратковременное ($0,15 \div 0,20\text{мкс}$) рентгеновское излучение. Благодаря наличию цепей задержки в разрядных контурах генераторов импульсного напряжения рентгеновские трубки срабатывают поочередно с микросекундными интервалами. Длительность излучения каждой трубки не более $2 \times 10^{-7}\text{с}$. Линии задержки в разрядных контурах обеспечивали запаздывание срабатывания каждой трубки относительно предыдущей на $2 \div 7\text{мкс}$. Схема измерения временных интервалов между моментами срабатывания трубок обеспечивала формирование и осциллографирование отметок, соответствующих каждой рентгеновской вспышке.

Исследуемый образец помещался в центре взрывной камеры, вокруг которой по дуге сектора в 90° находились острофокусные рентгеновские трубки (рис. 1).

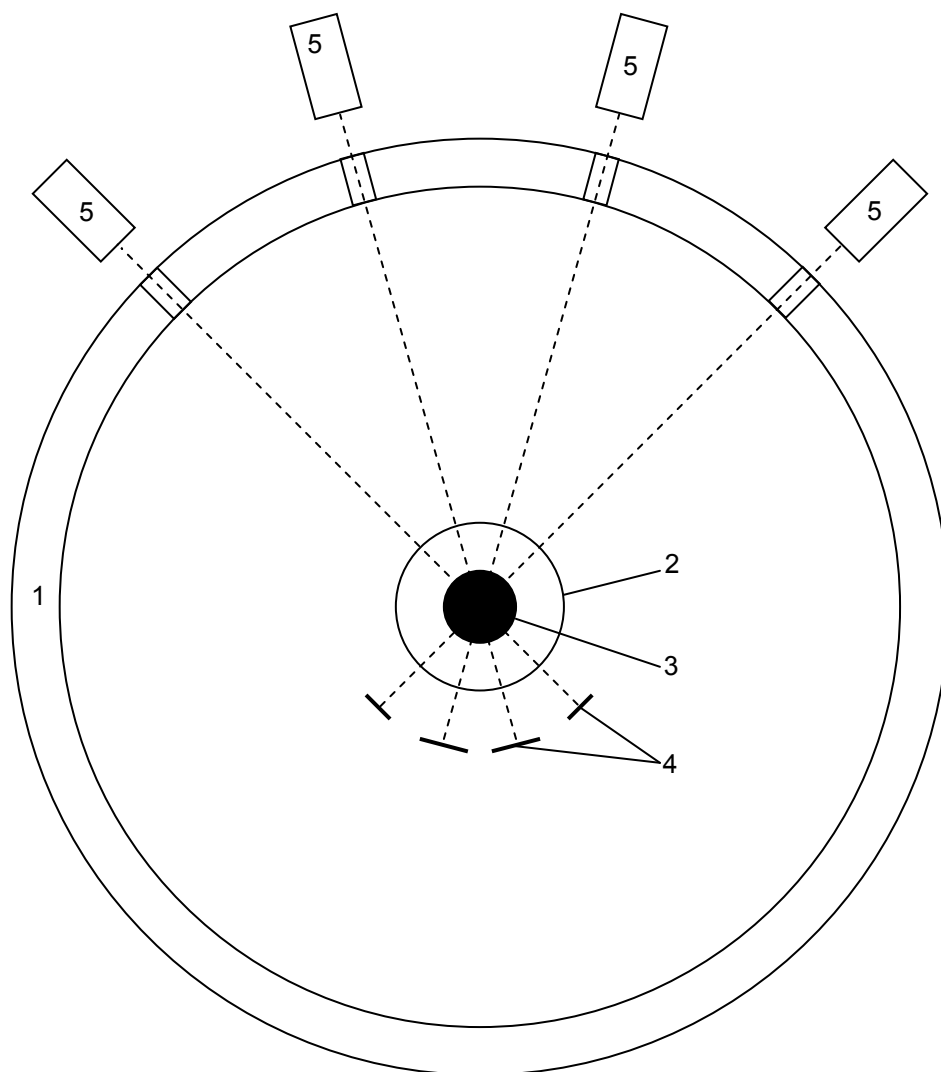


Рис. 1. Схема проведения рентгенографических опытов:

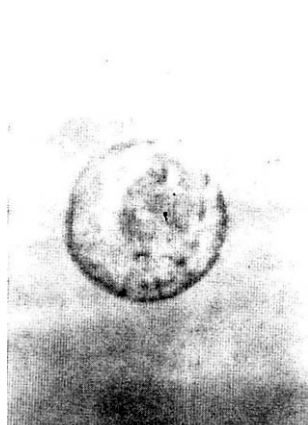
1 – стенка взрывной камеры; 2 – взрываемый образец горной породы; 3 – сферический заряд; 4 – кассеты с рентгеновской плёнкой; 5 – рентгеновские острофокусные трубки.

Экспонирование велось на рентгеноплёнки, помещённые в кассеты. Кассеты расположены во взрывной камере строго напротив взрываемого образца и рентгеновских трубок. На рис. 2 приведена типичная серия рентгенограмм при взрыве заряда тэна в модели из горючего сланца.

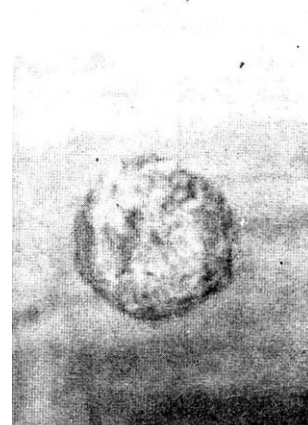
Расшифровка рентгенограммы сводилась к изменению радиуса полости на фотоотпечатках и снятию временных интервалов, соответствующих приращению радиуса. При этом учитывался коэффициент геометрического увеличения изображений, равный в условиях опыта 1,18.



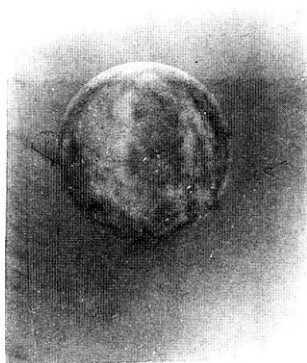
1-й кадр
 $t = 0$



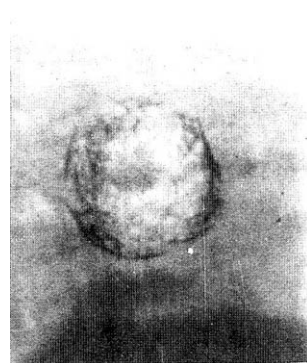
2-й кадр
 $t = 4,6 \text{ мкс}$



3-й кадр
 $t = 6,1 \text{ мкс}$



4-й кадр
 $t = 8,4 \text{ мкс}$



5-й кадр
 $t = 14,3 \text{ мкс}$

Рис. 2. Схема типичных рентгенограмм взрыва в горячем сланце: 1-й кадр статический, остальные – динамические.

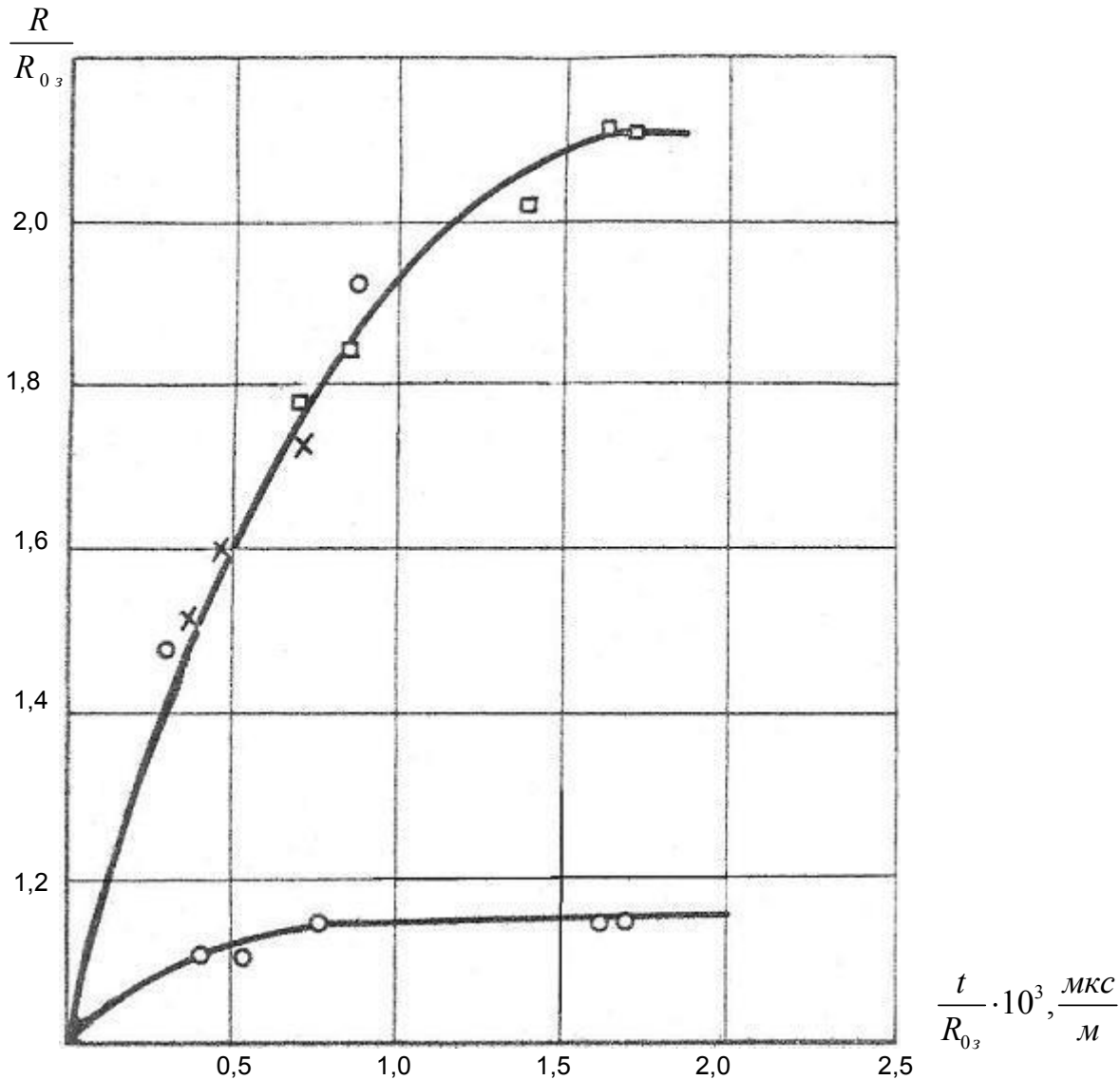
Результаты исследования

Серия типичных рентгенограмм, совмещённая с осциллограммой временного масштаба при взрыве 2-граммового заряда тэна, приведена на рис. 2. Первый кадр серии соответствует исходному статическому положению объекта и экспонируется отдельно. Временная развёртка процесса на последующих кадрах определялась из осциллограмм, где Δt_1 — время между моментом выхода детонационной волны на границу раздела и моментом экспонирования первого динамического кадра; $\Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ — интервалы времени между динамическими кадрами; $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \Delta S_4$ — величины смещений стенки полости на соответствующий момент времени, снимаемые с рентгенограмм.

Скорость перемещения стенки полости определялась как средняя скорость на рассматриваемом участке:

$$V_1 = \frac{\Delta S_1}{\Delta t_1} \quad (12)$$

На основе полученных результатов построен совмещённый график изменения радиуса каверны во времени (рис. 3).



**Рис. 3. Графики увеличения радиуса полости во времени для горных пород:
1 – горючего сланца; 2 – мрамора.**

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных измерений параметров камуфлетных полостей в горных породах с существенно различающейся акустической жёсткостью при взрыве заряда тэна массой 1 и 2г, плотностью $1,5г/см^3$ и соответствующих радиусах заряда $R_{0з} = 5,7 \div 6,7мм$.

Анализ результатов показал, что развитие котловой полости в горючем сланце и каменной соли при взрыве заряда массой 2г протекает примерно за $14_{мкс}$, а для заряда 1г — за несколько меньший промежуток времени. Причём в первую половину этого периода происходит основное расширение каверны, и за это время скорость перемещения стенки полости падает наиболее интенсивно. Максимальный радиус каверны в опытах достигал величины $2,4R_{0з}$ для горючего сланца и $2,2R_{0з}$ для каменной соли, относящихся к горным породам средней акустической жёсткости, в то время как для гранита и мрамора, относящихся к породам высокой акустической жёсткости, радиус камуфлетной полости находился в диапазоне $1,05 \div 1,15R_{0з}$.

Таблица 1

Модельные среды и горные породы	Плотность $\rho_n, \text{кг/м}^3$	Скорость продольной волны $C_p, \text{м/с}$	Радиус полости $R_{к.п.}, \text{мм}$	Относительный размер радиуса полости, $R_{к.п.}$
Горючий сланец	130	2000	13,8	2,40
Каменная соль	215	4370	11,5	2,20
Гранит	268	5000	6,0	1,05
Мрамор	270	6000	6,5	1,15

Большее значение радиуса камуфлетной полости в каменной соли по сравнению с горючим сланцем, отличающимся несколько меньшей акустической жёсткостью, объясняется эффектом плавления каменной соли в условиях взрыва химических ВВ, зафиксированным на её поверхности.

Достоверные данные измерения радиуса камуфлетной полости позволяют рассчитать объём камуфлетной полости при взрыве заряда тэна. Воспользовавшись полученными результатами и приведённой в работе [1] адиабатой гексогена, мы произвели приближённую оценку давления продуктов взрыва в камуфлетной полости при взрыве сферического заряда тэна в породах и средах средней и высокой акустической жёсткости. Произведённая в первом приближении оценка давления продуктов взрыва, соответствующая объёму камуфлетной полости при взрыве в породах средней акустической жёсткости, оказалось на уровне 1000 атм , в то время как для пород высокой акустической жёсткости она оказалась на порядок выше.

Всё вышеизложенное позволяет сформулировать следующие основные выводы:

- Экспериментально установлена относительная величина радиуса камуфлетной полости в скальных горных породах с высокой акустической жёсткостью, равная $R_{к.п.}/R_{0з} \leq 1,05 \div 1,15$, что существенно ниже значений, приводимых в литературе;
- Показано, что в полускальных горных породах средней акустической жёсткости величина радиуса камуфлетной полости существенно выше, а именно $R_{к.п.}/R_{0з} = 2,2 \div 2,4$;
- Рекомендуемые в литературе эмпирические формулы для оценки радиуса камуфлетной полости в грунтах не вызывают возражений, но требуют корректировки с учётом акустической жёсткости горных пород, которая существенно зависит от их пористости и водонасыщенности.

Полученные результаты позволяют сделать адекватную оценку давления в полости зарядной камеры и аккумулируемой в ней энергии продуктов детонации. Эти данные могут быть положены в основу концепции эффективного управления бризантным и фугасным действием взрыва.

Литература

1. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Исследование развития полости при камуфлетном взрыве. Сб. «Взрывное дело» 64/21, М., «Недра» 1968.
2. Ловля С.А. и др. «Взрывное дело». М., «Недра», 1966.
3. Покровский Г.И. Взрыв. М., «Недра» 1967.
4. Баум Ф.А. и др. Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
5. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва «СудпроМГИз», 1961.
6. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. М., «Госгортехиздат», 1962.
7. Юревич Г.Г., Трофимов В.Д. Горная геомеханика глубинных взрывов. М., «Недра», 1980.