

2. Булат А.Ф., Усаченко В.Б., Амелин В.А. Геомеханическое обоснование технологии возведения анкерной стяжной крепи в камерных выработках.// *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 1988.- №2.- С. 91-94.
3. Стоев И.С. Технология сооружения вертикальных стволов / *Экспресс-информация* / ЦНИЭИуголь, ЦБНТИ Минуглепрома СССР. – М.: 1979. – 48 с
4. Инструкция по расчету и применению облегченных видов крепей с анкерами в вертикальных стволах. – Харьков. ВНИИОМШС, 1990. – 75 с.
5. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 76 с.
6. Н.С. Булычев. Механика подземных сооружений. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994.-382 с

**УДК 622.063.23**

Канд. техн. наук. И.Г. Сахно  
(ДонНТУ)

## **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СОСТАВОВ**

Запропоновано новий підхід до аналізу механізму руйнування гірських порід за допомогою невибухових руйнуючих складів, на підставі якого виконаний теоретичний розрахунок параметрів невибухового руйнування, що базується на енергетичному критерії руйнування А. Гриффітса.

## **FOUNDATION OF PARAMETERS OF DESTRUCTION MOUNTAIN BREEDS BY INEXPLOSIVE DESTROYING COMPOSITIONS**

A new approach to the analysis of the mechanism of rock destruction by destroying non-explosive formulations on the basis of which made the theoretical calculation of parameters of non-explosive destruction, based on energy failure criteria A. Griffiths.

В последнее время все большее внимание ученых и практиков заслуживают технологии, основанные на использовании невзрывчатых разрушающих составов (НРС), применение которых достаточно хорошо апробировано в промышленном строительстве при разрушении несущих конструкций ликвидируемых зданий и сооружений. Перспективность более широкого внедрения НРС в горную практику отмечается отечественными и зарубежными учеными. К основным направлениям невзрывного разрушения относят разрушение негабаритов, добычу блочного камня, к которому предъявляются высокие требования по трещиноватости и размерам [1], добычу поделочного камня и камнесамоцветного сырья [2], оконтуривание сопряжений подземных выработок, ремонт вертикальных стволов [3, 4], проведение горных выработок [5, 6], подрывку, восстановление эксплуатационного состояния выработок в сложных горно-геологических условиях [7] и др.

Практическое применение указанных направлений в значительной степени сдерживается отсутствием единой расчетной методики, учитывающей особенности квазистатического разрушения горных пород шпуровым способом.

Существующие методики определения параметров буровых работ при разрушении горных пород с помощью НРС [8, 9, 10], как правило, основываются на решении задачи Лямэ для толстостенного цилиндра, при этом основным параметром является расстояние между шпурами. Рассматривается осесиммет-

ричная задача нагружения упругого цилиндра, имеющего наружный радиус  $R_r$ , давлением  $P_p$ , приложенным по его внутренней полости радиусом  $R_p$ . Учет граничных условий и использование обобщенного закона Гука позволяют получить зависимость радиальных  $\sigma_r$  и тангенциальных  $\sigma_\theta$  напряжений от величины  $R$ :

$$\sigma_{r(\theta)} = \frac{P_p R_p^2}{R_r^2 - R_p^2} \left( 1 \pm \frac{R_r^2}{R^2} \right) \quad (1)$$

Принимаю ту или иную теорию прочности сравнивают полученные напряжения с критическими для данного материала, откуда и определяют расстояние между шпурами  $a$ . Например при принятии первой теории прочности

$$a = 2 \sqrt{\frac{P_p R_p^2}{|\sigma_p|}}$$

где  $|\sigma_p|$  - предел прочности материала на одноосное растяжение, МПа.

Такой подход дает заниженные в 2 - 4 раза, по сравнению с данными практики, значения минимально необходимого расстояния между шпурами.

Это объясняется широко известным фактом, что теоретическая прочность твердых тел, рассчитанная по той или иной атомистической модели, превосходит реальную прочность [11, 12].

Авторы работы [3] предлагают подход к расчету параметров невзрывного разрушения, основанный на кинетической теории прочности, предполагая аналогию процесса с действием взрывчатых веществ.

Разрушение в этом случае представляет собой необратимый кинетический процесс накопления внутренней повреждаемости материала, ускоряемый температурой. Кинетическая теория прочности подчеркивает необходимость учета влияния теплового движения (флуктуации тепловой энергии) на процессы деформирования и разрушения, особенно в их начальной стадии. По кинетической теории прочности процесс разрушения при нагрузках ниже критической не может происходить при отсутствии теплового движения атомов и молекул, которое является фактором, принципиально обуславливающим разрыв материала при нагрузках, меньших критической. Такой подход, на наш взгляд, более обоснован для случаев расчета параметров разрушения при многоцикловой нагрузке (усталостной прочности), при взрывном воздействии.

Поскольку температура разрушаемого объекта при воздействии невзрывчатыми разрушающими материалами повышается незначительно (не достигает 400-600К), а время приложения разрушающей нагрузки относительно небольшое, решение задачи о разрушении горных пород при помощи невзрывчатых

разрушающих веществ на наш взгляд наиболее корректно проводить используя энергетический критерий.

Основоположником энергетической теории разрушения является А. Гриффитс, который впервые объяснил несоответствие между теоретической прочностью межатомных связей и экспериментальной прочностью наличием мелких трещин в однородном материале, которые приводят к большой концентрации напряжений в упругом состоянии. Гриффитс ввел понятие поверхностной энергии разрушения, пропорциональной площади вновь образовавшихся поверхностей, и решал вопрос о распространении трещины, составляя уравнения энергетического баланса. Появившиеся в 1921 и 1924 гг. работы Гриффитса по теории трещин считаются основополагающими в области теоретических исследований механики разрушения. Развитием энергетического подхода Гриффитса являются работы Р. Ирвина, Е. Орована, Д. Райса, Я.Б. Фридмана, Г.И. Баренбланта, Д.С. Дагдейла, А.А. Уэллса, В.З. Партона, А. Эванса, Г.П., Черепанова, Леонова, В.В. Панасюка и др.

В настоящее время Теория Гриффитса-Ирвина является основой для всех расчетов на трещиностойкость в инженерном деле, она достаточно удовлетворительно согласуется с данными практики в условиях квазистатического нагружения.

Рассмотрим элементарный объем шпура круглого сечения радиусом  $r_0$  и часть вмещающего его массива, ограниченного параллельными плоскостями, ориентированными нормально к оси шпура, с расстоянием между плоскостями равным  $\Delta h$  (рис. 1).

Допустим, что в результате саморасширения НРС в объеме шпура  $\Delta V$

$$\Delta V = \pi r_0^2 \Delta h$$

непосредственно перед разрушением реализуется некоторое квазигидростатическое давление равное давлению саморасширения  $P(t)$  через некоторое время  $t$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P(t) \quad (2)$$

Полагая, что материал затвердевшего НРС изотропен и обладает модулем упругости  $E_{НРС}$ , запишем энергию упругой деформации элемента объема в виде:

$$U = \frac{1}{2E_{НРС}} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu_{НРС} (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)) \cdot \Delta V$$

где  $E_{НРС}$  - модуль упругости НРС, МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные напряжения, МПа;

$\mu_{НРС}$  - коэффициент Пуассона НРС.

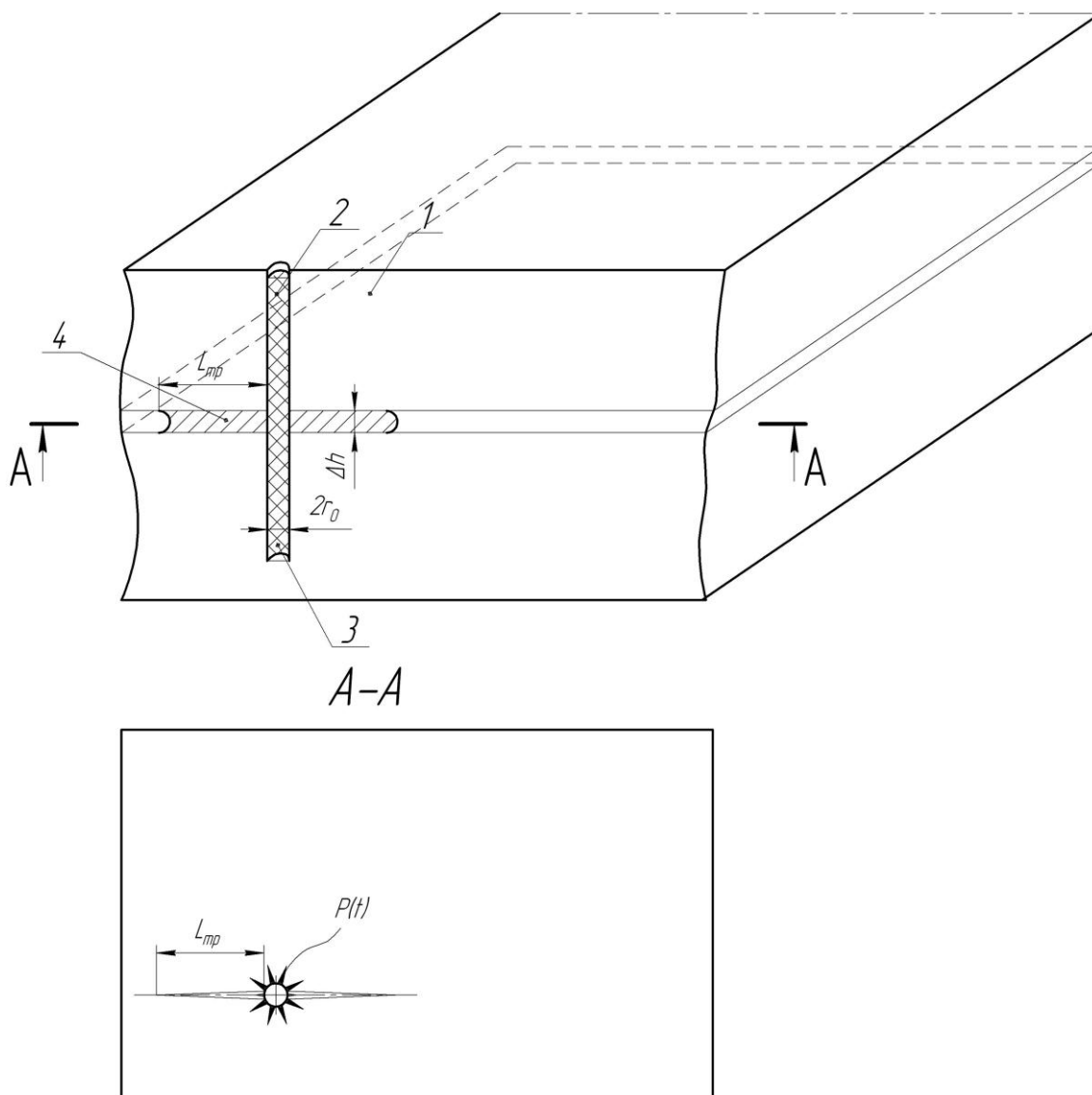


Рис. 1 – Шпур с НРС и условные обозначения, принятые в расчетах

Полагая, что на рассматриваемый объем извне не действуют никакие силы, а также с учетом (2)

$$U = \frac{3P(t)^2}{2E_{\text{HPC}}} (1 - 2\mu_{\text{HPC}}) \cdot \Delta V \quad (3)$$

$$U = \frac{3P(t)^2}{2E_{\text{HPC}}} (1 - 2\mu_{\text{HPC}}) \cdot \pi r_0^2 \Delta h \quad (4)$$

Следуя энергетическому критерию Гриффитса, полагаем, что в результате распространения трещин в двух противоположных направлениях от оси шпура, напряженное состояние в элементе объема НРС  $\Delta V$  полностью снимается и энергия расходуется на образование свободной поверхности:

$$\Delta S = 4\gamma_p \Delta h L_{mp} \quad (5)$$

где  $\gamma_p$  - поверхностная энергия породы, Дж/м<sup>2</sup>;

$L_{mp}$  - длина трещины, м.

Тогда, уравнение энергетического баланса (4), с учетом выражения (5) можно записать в виде:

$$\frac{3P(t)^2}{2E_{НРС}} (1 - 2\mu_{НРС}) \cdot \pi r_0^2 \Delta h = 4\gamma_p \Delta h L_{mp}$$

Откуда можем получить выражение для длины трещины

$$L_{mp} = \frac{P(t)^2 \cdot \pi \cdot r_0^2}{2E_{НРС} \cdot \gamma_p} (1 - 2\mu_{НРС}) \quad (6)$$

Обычно в инженерных расчетах трещиностойкость твердых тел характеризуется не поверхностной энергией, а коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$ .

Поскольку в нашем случае рост трещины будет вызван растягивающими напряжениями в направлении ортогональном оси трещины, имеют место трещины нормального разрыва. В этом случае коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  можно выразить через модуль упругости и поверхностную энергию:

$$K_I = \sqrt{2E_M \gamma_p} \quad (7)$$

где  $E_M$  - модуль упругости породы, МПа.

Подстановка (7) в (6) приводит к выражению для длины трещины, записанному в виде

$$L_{mp} = \frac{P(t)^2 \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{E_{НРС} \cdot K_I^2} (1 - 2\mu_{НРС})$$

В приведенной зависимости значения  $E_{НРС}$ ,  $\mu_{НРС}$ ,  $P(t)$  определяются экспериментально для конкретно применяемого типа НРС. Значения  $E_M$ ,  $K_I$  характеризуют свойства разрушаемого объекта, при этом  $E_M$  является константой материала, и может определяться экспериментально. Коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  определяется по ГОСТ 29167-91 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», который является нормативным документом, где рассмотрены методы определения характеристик трещиностойкости на лабораторных образцах.

Постановка задачи, при решении по теории Гриффитса исходит из соображений, что в материале имеются микротрещины, рост которых приводит к разрушению материала. Однако ввиду того, что нагружение пород шпуровым зарядом НРС происходит не по всему объему, а локально по стенкам шпура, возможен вариант, когда часть породного массива непосредственно вмещающего шпур является ненарушенной, т.е. представлена квазисплошной средой. Эти соображения объясняют случаи не разрушения объектов с одинаковыми параметрами буровых работ в одних и тех же условиях с разрушенными объектами.

Для исключения этого недостатка предлагается рассматривать процесс разрушения пород при помощи НРС в два этапа, что и имеет место в природе. Сначала, в результате высвобождения накопленной потенциальной энергии НРС, происходит скачкообразный рост начальной трещины, которая в дальнейшем постепенно развивается за счет расширения НРС в шпуре. Правомерность такого подхода подтверждается визуальными наблюдениями за процессом разрушения негабаритных блоков гранита при помощи НРС, проведенными автором, а также специально проведенными экспериментами по квазистатическому разрушению блоков из полимеризованной эпоксидной смолы.

При таком подходе параметры буровых работ необходимо рассчитывать таким образом, чтобы ближайший к открытой поверхности шпур с НРС сработывал в квазисплошном массиве, а последующие шпуры продолжали разрушение за счет поддержания роста магистральной трещины. Порядок заливки шпуров должен быть соответствующим.

Таким образом, с целью определения параметров буровых работ для первого шпура - инициирующего образование и рост начальных трещин, используем методы механики сплошной среды.

Для получения корректного решения на наш взгляд следует рассматривать задачу о нагружении упругого полупространства давлением  $P_p$  в цилиндрической полости радиуса  $R_p$ , расположенной на расстоянии  $\omega$  от открытой поверхности (рис. 2).

Решение в строгой постановке сводится к отысканию бигармонической функции в двухсвязной области, удовлетворяющей условиям на внутренней и внешней поверхностях. Такое решение связано со значительными математическими трудностями, которые не позволяют учесть многие геометрические и физические факторы реальных условий разрушения.

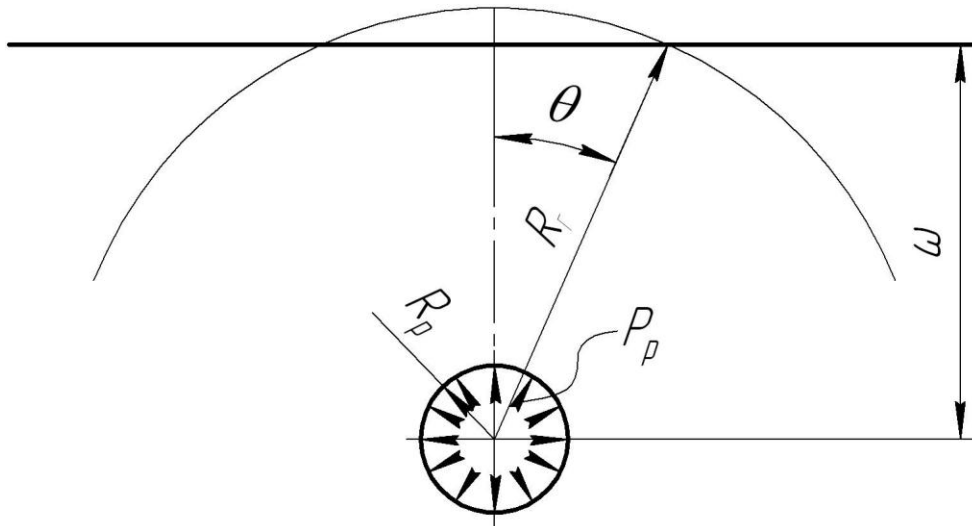


Рис. 2 – Схема нагружения упругого полупространства квазистатическим внутришпуровым давлением

Поэтому примем следующее допущение: величину наружного радиуса эквивалентного упругого цилиндра  $R_r$  будем определять в зависимости от угла  $\theta$  выражением

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \frac{\omega}{\cos \theta} \cdot n p u \cdot 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \cdot u \cdot n p u \cdot \frac{3\pi}{2} \quad (0 \leq 2\pi; \\ R_r &= \infty \cdot n p u \cdot \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Замена радиуса цилиндрической поверхности  $R_r$  вышеприведенным условием делает решение задачи нестрогим. Условие несколько искажает действительную картину распределения напряжений, что выражается в искусственном повороте площадок главных напряжений по отношению к их фактическому положению, т.е. при этом в качестве главных рассматриваются те же площадки, что и при решении осесимметричной задачи о нагружении цилиндра.

Это допущение позволяет значительно упростить расчет, учесть влияние открытой поверхности произвольной конфигурации.

Формула (1) при условии (8) дает возможность получить зависимость распределения компонентов тензора напряжений в массиве горных пород с учетом влияния открытой поверхности:

$$\sigma_{r(\theta)} = \frac{P_p R_p^2 \cos^2 \theta}{\omega^2 - R_p^2 \cos^2 \theta} \left( 1 \pm \frac{\omega^2}{R^2 \cos^2 \theta} \right) \quad (9)$$

Прочность горных пород на растяжение значительно меньше их прочности на сжатие, поэтому контуры зоны развития трещин под квазистатическим действием давления НРС будут определяться условием  $\sigma_\theta = \sigma_{расм}$ . Подставив в уравнение (9)  $\sigma_{расм}$  и решив его относительно  $R$ , получим

$$R^* = R_p \omega \frac{\sqrt{P_p}}{\sqrt{\sigma_{расм} \omega^2 - R_p^2 (\omega_{расм} - P_p) \cos^2 \theta}}$$

где  $R^*$  - расстояние до внешней границы зоны развития трещин, м.

Проведенные экспериментальные работы позволили определить, что для создания магистральной трещины по строчке шпуров под углом 90 градусов к открытой поверхности, расстояние от нее до ближайшего шпура должно быть равно

$$\omega = R_{кр} \cos \theta,$$

при этом угол  $\theta$  должен находиться в диапазоне  $0 \leq \theta \leq \frac{\varphi}{2}$ ,

где  $R_{кр}$  - предельный радиус эквивалентного упругого цилиндра  $R_r$ , м;

$\varphi$  - угол внутреннего трения породы, град.

В случае если  $\omega > R_{кр}$ , разрушение не происходит, а если  $\theta > \frac{\varphi}{2}$ , происходит образование откольной воронки.

Как отмечалось выше, предложенная методика позволяет учесть влияние открытой поверхности произвольной конфигурации на распределение напряжений в зоне квазистатического действия НРС.

Задаваясь функцией, описывающей линию открытой поверхности на плоскости, и получив из ее решения зависимость  $R_r = f(\theta)$ , преобразуем уравнение напряжений к виду

$$\sigma_{r\theta} = \frac{P_p R_p^2}{f^2(\theta) - R_p^2} \left[ 1 \pm \frac{f^2(\theta)}{R^2} \right]$$

откуда можно найти радиус зоны развития трещин при квазистатическом действии НРС.

При наличии давления на внешней границе параметры напряженного состояния определяются по формулам:



$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{P_p R_p^2 - P_r R_r^2}{R_r^2 - R_p^2} - \frac{(P_p - P_r R_p^2 R_r^2)}{R^2 (R_r^2 - R_p^2)}; \\ \sigma_\theta &= \frac{P_p R_p^2 - P_r R_r^2}{R_r^2 - R_p^2} + \frac{(P_p - P_r) R_p^2 R_r^2}{R^2 (R_r^2 - R_p^2)}. \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, расчет параметров разрушения предлагается производить в два этапа. На первом определяется расстояние от ближайшего шпура с НРС до открытой поверхности, на втором рассчитывается расстояние между остальными шпурами с позиций последовательного развития магистральной трещины между шпурами.

Проведенные исследования позволяют рассчитать параметры невзрывного разрушения горных пород шпуровым способом в условиях широкого спектра горно-геологических и горно-технических условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пшеничная Е. Г. Обоснование рациональных параметров технологии добычи гранитных блоков с применением невзрывчатых разрушающих средств: Автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.22, 25.00.20 / Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2004, 20 с.
2. Найданов К.Ц. Разработка шадящих технологий добычи ювелирного и поделочного самоцветного сырья (на примере Восточной Сибири): Автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.22/ГОУ ВПО «Читинский гос. ун-т». – Чита, 2007, – 21 с.
3. Шевцов М.Р., Калякин С.О., Купенко І.В., Шкуматов О.М., Рубльова О.І. Стан технології та обґрунтування умов руйнування суцільного середовища гірських порід і будівельних конструкцій / Проблеми гірського тиску. Донецьк: ДонНТУ, 2009, №17- С. 226-249.
4. Коровников В.И., Стариков Г.П., Морев А.М., Коврига Н.Н. Фазовое состояние саморасширяющегося водного раствора и его разрушающее воздействие на шахтные образцы пород // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ, 1988. – С. 81-93.
5. Шкуматов О.М., Галоян В.А. Комбінована технологія розробки прохідницького вибою криволінійно-уступної форми / Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: «Гірничо-геологічна». – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вип.10. – С. 70-73.
6. Заявка на патент на винахід №а 2011 02300, МПК(2011.01) E21D 9/00 Спосіб проведення гірничих виробок / І.Г. Сахно, М.М. Касьян, (Україна), пріорітет 11.07.2011 р. Бюл. №13.
7. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О., Володьков А.А. Лабораторные испытания патрона невзрывчатого разрушающего вещества Проблемы гірничої технології: матеріали регіональної науково-практичної конференції, КП ДонНТУ, Донецьк: Цифрова типографія, 2010 С. 39-43.
8. Патент РФ № 2141563, МПК 6 E21C37/00 Спосіб раскальвания каменных материалов невзрывчатыми разрушающими составами Азаркович А.Е., Эткин М.Б. Оpubл. 20.11.1999 р.
9. Руководство по применению смеси известковой для горных и буровых работ СИГБ при разрушении прочных хрупких материалов.-М.: ВНИИСТРОМ, 1997.
10. Долударева Я.С. - Обоснование рациональных параметров и кострукций шпуровых зарядов для снижения разупрочнения горных пород при направленном расколе Дисс... канд. техн. наук: 05.15.09.– Кременчук, 2010.– 180 с.
11. Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике, М., Наука, 1990, 240 с.
12. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. , 1988. - 712 с.