DOI 10.18454/PMI.2016.4.532

Горное дело

УДК 622.235

ПОВЫШЕНИЕ СОХРАННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ МОНОЛИТА ОТ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ ПАТРОНОВ

Г.П.ПАРАМОНОВ[1], В.Н.КОВАЛЕВСКИЙ[1], ПЕТЕР МОЗЕР[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Россия*
[2] *Горный университет, г.Леобен, Австрия*

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния скорости горения на импульс давления в зарядной камере и разрушающие напряжения при отколе. Представлены результаты сравнительных расчетов на основе уравнений автокаталитических реакций скоростей горения и оттока продуктов сгорания системы: хлорат натрия – полиэтилен (пропилен) в виде трубочек. Получены зависимости скорости горения от концентрации составляющих газогенерирующей смеси, плотности состава, дисперсности компонентов, размеров корпуса патрона. На основе экспериментальных и расчетных данных рассмотрены условия перехода горения во взрыв для составов на основе хлората натрия и углеводородов для слоевой и порошковой системы. Установлена взаимосвязь технологических параметров добычных работ (расстояние между шпурами, диаметр шпура, глубина заложения патрона) с удельным расходом патронов по линии отбойки блока при срабатывании газогенераторов.

***Ключевые слова*:** карьер, блочный камень, газогенератор, хлорат натрия, углеводороды, скорость горения, шпур, давление, полиэтилен.

***Как цитировать эту статью*:** Парамонов Г.П. Повышение сохранности минерального сырья при отделении монолита от массива горных пород с использованием газогенераторных патронов / Г.П.Парамонов, В.Н.Ковалевский, Петер Мозер // Записки Горного института. 2016. Т.220. С.532-537. DOI 10.18454/PMI.2016.4.532

Введение. Основными условиями эффективного отделения блочного камня от массива горных пород является сохранение его монолитности, обеспечение ровной поверхности блоков с наименьшими неровностями на гранях. При этом необходимо обеспечить минимальную нарушенность разрабатываемого массива от образования в нем наведенной трещиноватости, *что* может повлиять на качество последующих отделяемых блоков [7].

Существует достаточно большое количество способов отделения блоков от массива горных пород, например, применение низкобризантных ВВ, невзрывчатых разрушающих смесей, газогенерирующих составов и др. Выбор определенного способа зависит от свойств породы, трещиноватости и блочности массива. В последнее время при добыче блочного камня на карьерах строительных материалов находят все большее применение газогенераторные патроны.

Настоящая работа является продолжением целого комплекса работ, посвященных разработке газогенераторов (ГГ) на основе хлората натрия и углеводородов [3, 5, 6]. Принцип действия газогенераторных патронов основан на процессе горения газогенерирующей смеси в дефлаграционном (недетонационном) режиме, с выделением большого объема газов, которые создают усилия, необходимые для откола монолита по линиям концентрации напряжений (по линии шпуров). Компоненты состава газогенераторов (окислитель – хлорат натрия и горючее – углеводороды) сами по себе применяются для различных технических целей и являются невзрывоопасными. На открытой поверхности они не срабатывают даже при инициировании взрывчатым веществом, для их функционирования необходимо замкнутое пространство. Конструктивно газогенераторы могут представлять две системы: порошковую (порошковая смесь окислителя и горючего) и слоевую (порошок окислителя и горючее в виде полиэтиленовых трубок).

В работе [1] представлены результаты исследований влияния на развитие трещиноватости гранита при отделении блоков от массива газогенераторами давления шпуровыми (ГДШ). ГДШ представляют собой порошковую систему. В процессе испытаний анализировалась наведенная трещиноватость вблизи от заряда ГДШ на образцах плит, полученных после откола. Анализ результатов показал, что наибольшая длина трещин составляет 14 радиусов шпура. Это приводит к снижению качества готовых изделий и сохранности минерального сырья.

Исследование и обсуждение результатов. Для стабилизации свойств и повышения сохранности минерального сырья при отделении монолита от массива горных пород с применения газогенераторов (различных по конструкции систем) необходимо исследовать влияние скорости горения, свойств и составляющих компонент газогенерирующего состава на динамические характеристики этих ГГ.

DOI 10.18454/PMI.2016.4.532

Ранее нами в работе [4] показано хорошее соответствие результатов расчета по уравнениям автокаталитических реакций давления в бомбе с экспериментальными данными для испытываемых составов (коэффициент корреляции не ниже 0,98). Считая, что конечное давление в бомбе определяется массой газообразных продуктов сгорания заряда (начальная концентрация [A], концентрация «затравки» [B]), запишем модифицированное уравнение реакции в виде

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1-\alpha)(\alpha+\beta), \quad (1)$$

где α – полнота процесса сгорания (отношение давления при полном сгорании смеси к текущему давлению); k – константа скорости реакции; β – доля автокатализатора в общей массе, $\beta = [B]/[A]$.

Решение этого уравнения имеет вид

$$\alpha(t) = \frac{\beta e^{(\beta+1)kt} - 1}{1 + \beta e^{(\beta+1)kt}}. \quad (2)$$

Применение уравнения (2) к описанию процесса горения полиэтилена в виде порошка или дизельного топлива показывает, что коэффициент корреляции находится не ниже 0,98. Для композиции хлората натрия и полиэтилена в виде трубочек (слоевая система) данное уравнение требует учета неадиабатичности процесса (длительность горения слоевой системы более чем на порядок превосходит составы на основе углеводородов в виде порошка или дизельного топлива). Для слоевой системы используем уравнение, учитывающее тепловые потери:

$$\alpha(t) = \frac{\beta e^{(\beta+1)k_1 t} - 1}{1 + \beta e^{(\beta+1)k_1 t}}, \quad (3)$$

где t – время.

При этом

$$k_1 = \left(\frac{a}{T_0} + bt\right)^{-1}, \quad (4)$$

где T_0 – начальная температура горения; a и b – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Применение такой схемы учета потерь дает возможность описать процесс с корреляцией не ниже 0,98. Использование уравнений (2), (3) при известных параметрах заряда (диаметр и высота) и бомбы (объем бомбы и ее приведенная высота) позволило определить такие параметры процесса, как изменение линейной скорости горения в бомбе, скорость оттока продуктов сгорания от горящей поверхности, и сравнить ее со скоростью звука в продуктах сгорания. Скорость оттока характеризует устойчивость процесса горения смеси, и ее можно рассматривать как один из критериев перехода дефлаграции в детонацию: чем выше скорость оттока, тем меньше возможность перехода во взрыв и наоборот. Исследование процесса перехода дефлаграции в детонацию имеет важное значение при выборе конструкции ГГ и, как следствие, обеспечивает сохранность минерального сырья. Основные характеристики исследуемого процесса и сравнительные параметры составов представлены в табл.1. Испытания смеси выполнялись в манометрической бомбе объемом 300 см^3, масса воспламенительного состава в ГГ составляла 1,5 г. Все испытания проводились в текстолитовых стаканчиках с внутренним диаметром 38 мм, высотой ~100 мм.

Были проанализированы расчетные данные по максимальным значениям линейной (u) и массовой (g) скоростям горения, скорости оттока продуктов сгорания (W) от поверхности горения, времени достижения максимального значения для линейной (τ_u) и массовой скорости оттока продуктов горения (τ_W), максимальные значения темпов роста давления в бомбе ($dp/d\tau$) и соответствующее этому моменту значение времени (τ_p), удельная работоспособность продуктов сгорания (RT).

Из представленных в табл.1 данных видно, что увеличение массы воспламенительной смеси до 3 г приводит к росту скорости оттока продуктов сгорания, значения которой достигают критических: 940 и 1960 м/с для порошковой системы. Эти результаты можно объяснить переходом горения в низкоскоростную детонацию, что подтверждается разрушением корпуса заряда. Анализ результатов сме-

DOI 10.18454/PMI.2016.4.532

сей на основе хлората натрия и жидкого углеводорода (дизельного топлива) показывает, что скоростные параметры превосходят таковые для слоевой системы, но уступают порошковой, особенно при использовании воспламенителя с большей массой. Для сравнения в табл.1 приведены данные эксперимента с черным порохом. Как видно из табл.1, все рассмотренные динамические параметры черного пороха уступают системе на основе дизельного топлива и хлората натрия, составу на основе порошка полиэтилена и хлората натрия.

Таблица 1

Сравнение параметров смесей

u, м/с	g, кг/с	τ_u, с	W, м/с	τ_W, с	$dp/d\tau$, Па/с	τ_p, с	RT, кДж/кг
Слоевая система							
2,79	1,74	–	12,9	0,055	$7{,}4\cdot10^{8}$	0,016	599,5
0,32	0,55	0,09	15,2	0,05	$8{,}45\cdot10^{8}$	0,022	573,5
0,39	0,67	0,08	36,8	0,004	$1{,}26\cdot10^{9}$	0,075	599,5
0,67	0,79	0,04	38,3	0,0035	$1{,}32\cdot10^{9}$	0,08	599,5
Порошковая система							
16,62	28,02	0,0074	442	0,0060	$5{,}13\cdot10^{10}$	0,0073	646,5
22,6	38,1	0,0074	570	0,0061	$7{,}56\cdot10^{10}$	0,0075	646,5
27,05	46,03	0,0064	721	0,0064	$8{,}2\cdot10^{10}$	0,0075	646,5
30,62	52,10	0,003	940*	0,002	$9{,}6\cdot10^{10}$	0,003	686,5
63,87	108,7	0,0014	1960*	0,0009	$1{,}93\cdot10^{11}$	0,0014	686,5
Хлорат натрия (окислитель) + дизельное топливо (горючее)							
18,0	30,55	0,007	555	0,007	$5{,}69\cdot10^{10}$	0,008	537,6
Черный порох							
7,88	8,76	0,04	319	0,08	$6{,}2\cdot10^{10}$	0,007	390,6

* Инициирование составов осуществлялось от воспламенителя массой 3 г.

Из анализа представленных данных с точки зрения возможности перехода горения во взрыв (основной критерий – это скорость оттока) можно отметить, что наиболее удаленной от этого является слоевая система. Напротив, как при расчетах, так и при экспериментах система на основе порошка полиэтилена и хлората натрия показала возможность перехода во взрыв. Что касается систем с использованием в качестве горючего дизельного топлива, то, вероятно, увеличение массы горючего и мощности воспламенителя может создать условия перехода горения во взрыв.

Представленные результатами показали, что скорость оттока от поверхности горения может служить одним из критериев возможности перехода горения во взрыв.

С другой стороны [2], соотношение между скоростями притока продуктов сгорания и их расхода является общепринятым критерием для оценки устойчивости горения. Если приход газов (определяемый скоростью горения) меньше скорости расхода (истечения продуктов сгорания при критических газодинамических условиях), то процесс горения не переходит в детонацию и наоборот. Применим эти критерии к рассмотренным экспериментам и расчетам.

Зная линейную скорость горения, плотность заряда и поверхность горения, определяем скорость притока. Считаем процесс горения торцевым, продукты горения подчиняются уравнению идеальных газов.

Следует подчеркнуть, что, во-первых, рассматривается процесс истечения продуктов сгорания в замкнутый объем и, во-вторых, процесс горения рассматриваемых составов на основе хлората натрия имеет явно выраженный автокаталитический характер, а не простую степенную зависимость. Это означает, что максимальная скорость горения достигается не при максимальном давлении в бомбе, а при другом, определяемом по уравнениям (2) и (3), т.е. в точке перегиба кривой прихода.

Из представленных на рис.1 данных следует, что слоевая система горит устойчиво и нельзя предположить возможность перехода горения во взрыв. Анализ процесса горения порошковой системы представлен на рис.2. Здесь кривая прихода идет выше кривой расхода, чем в слоевой системе (см. рис.1), т.е. с большей скоростью и массой тепловыделения, поэтому для этой системы возможен переход горения в детонацию. Несомненный интерес с точки зрения модели устойчивости горения

DOI 10.18454/PMI.2016.4.532

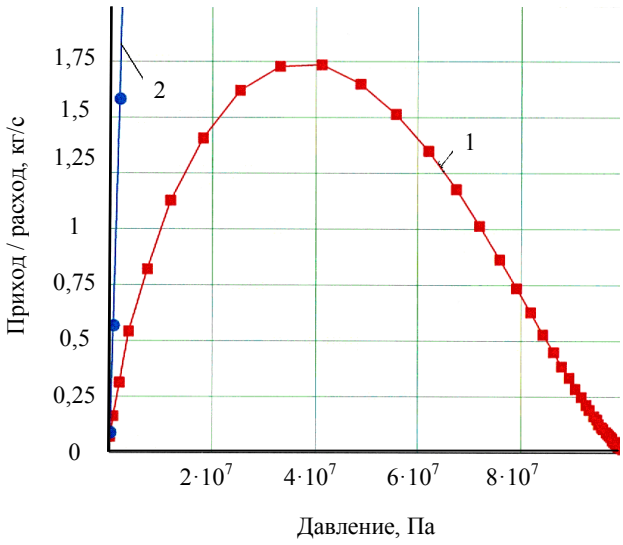


Рис.1. Зависимости массовой скорости горения – прихода (1) и расхода (2) продуктов сгорания от давления в бомбе для слоевой системы

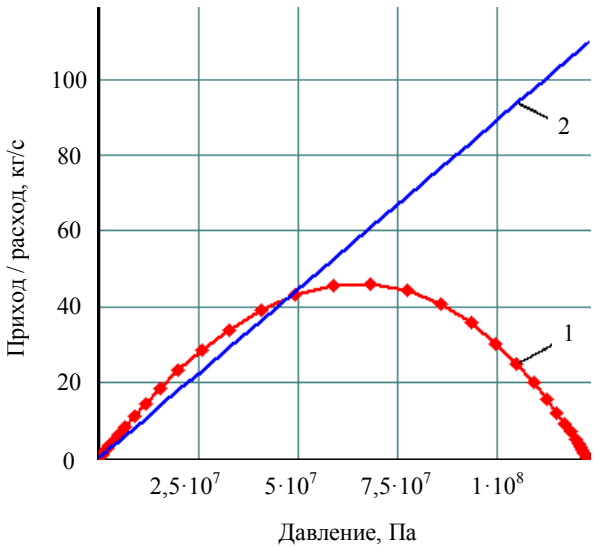


Рис.2. Зависимости массовой скорости горения – прихода (1) и расхода (2) продуктов сгорания от давления в бомбе для системы на основе хлората натрия и порошка полиэтилена

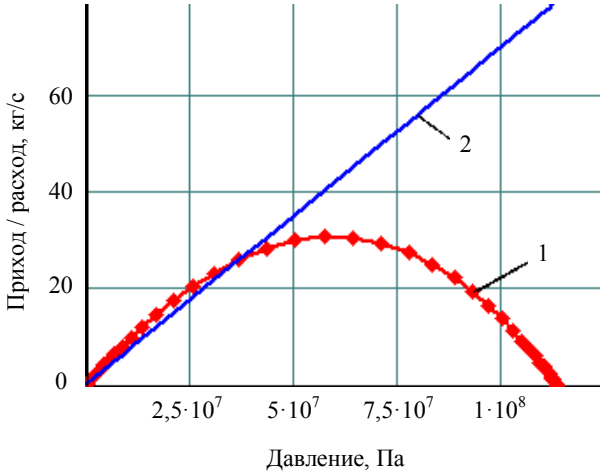


Рис.3. Зависимости массовой скорости – прихода (1) и расхода (2) продуктов сгорания от давления в бомбе для состава на основе хлората натрия и дизельного топлива

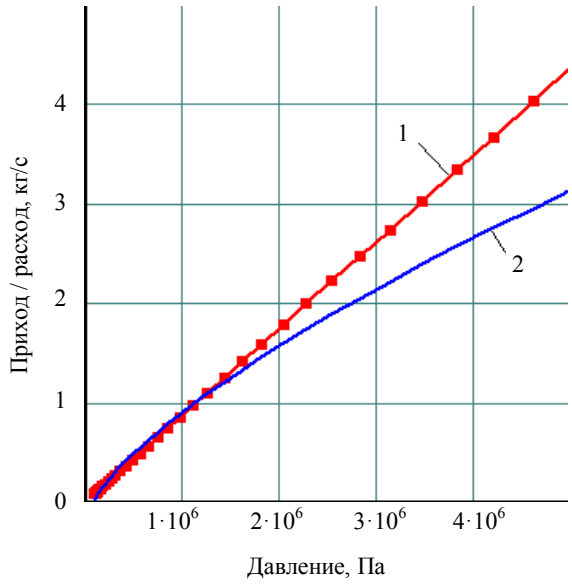


Рис.4. Зависимости массовой скорости горения – прихода (1) и расхода (2) продуктов сгорания от давления в бомбе для системы на основе черного пороха в замкнутом объеме

представляют данные для системы на основе хлората натрия и дизельного топлива, поскольку она удобна в изготовлении и относительно дешева (рис.3).

Анализ представленных зависимостей показывает, что обе кривые на начальном участке, до давления в бомбе примерно $3 \cdot 10^7$ Па, практически совпадают, но поскольку приход преобладает над расходом, то данный состав можно отнести к низкобризантным взрывчатым системам.

Для сравнения полученных теоретических и экспериментальных результатов исследуемых систем приведем зависимости массовой скорости горения прихода и расхода продуктов сгорания от давления для черного пороха, который применяется для отделений блоков монолита от массива горных пород (рис.4).

Как видно из результатов расчета, массовая скорость горения прихода продуктов сгорания превышает массовую скорость расхода продуктов сгорания, что, при определенных условиях, переведет рассматриваемую систему в режим низкоскоростного взрывчатого превращения. Как следствие, применение дымного пороха может привести к образованию значительной зоны наведенной трещиноватости и снижению качества отбиваемых камнеблоков.

DOI 10.18454/PMI.2016.4.532

а *б*

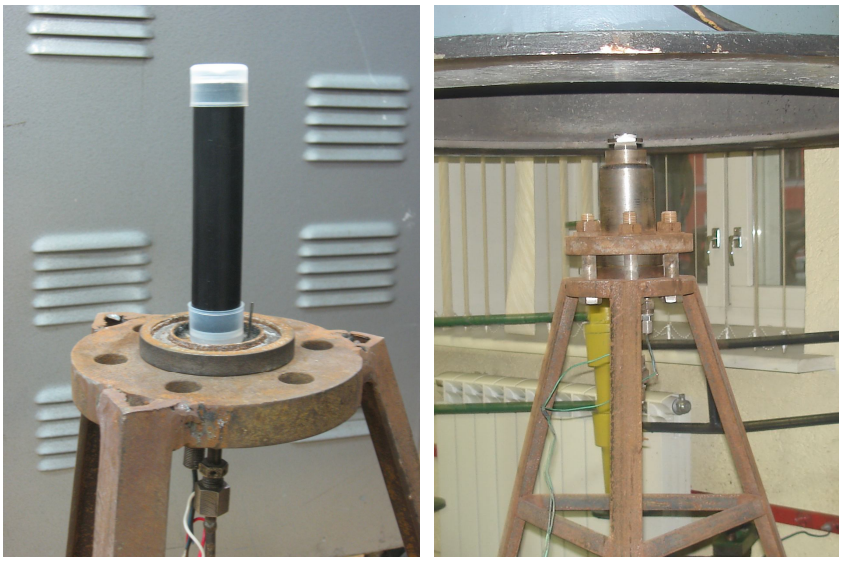


Рис.5. Патрон газогенерирующего состава, подготовленный к испытаниям (*а*) и размещенный в бомбе постоянного объема (*б*)



Рис.6. Последовательность дробления валунов газогенераторами при строительстве нефтяного терминала

а *б*



Рис.7. Применение газогенераторов на карьерах строительных материалов: *а* – для отделения гранитного блока от массива горных пород на карьере «Терваярви», объем блока 72 м^3; *б* – для создания магистральной трещины отделения монолита в щадящем режиме

Таким образом, используя оба метода по определению устойчивости процесса горения: как по сравнению скорости оттока от горящей поверхности со скоростью звука в продуктах сгорания, так и путем сравнения скоростей прихода (скорости горения) и расхода, – можно более надежно оценить устойчивость процесса горения и возможность его перехода в детонацию (взрыв).

Как показывают экспериментальные исследования и расчеты, энергия заряда вещества газогенератора в значительной степени зависит от вида горючего в составе окислителя (порошковая и слоевая система). Технологически это означает необходимость обоснованного выбора трубок (полиэтиленовые или пропиленовые) и их толщины для слоевых систем. С этой целью были проведены экспериментальные исследования в бомбе постоянного объема. Параметры трубок оценивались коэффициентом избытка окислителя (рис.5).

Обработка экспериментальных данных позволила, во-первых, определить диапазон устойчивого процесса горения для слоевой системы, во-вторых, получить регрессионные зависимости линейной скорости горения от коэффициента избытка окислителя и определить максимальные значения линейных скоростей горения, в-третьих, оценить влияние толщины пленки при фиксированном диаметре трубки на скорость горения.

Для проверки стабильности работы газогенераторов слоевой системы были проведены промышленные испытания по дроблению валунов (рис.6) и добыче строительных материалов на карьерах (рис.7).

На основе теоретических расчетов и опытно-промышленных испытаний определены параметры расположения шпуровых патронов газогенераторов

DOI *10.18454/PMI.2016.4.532*

для отделения гранитных блоков от массива горных пород и удельный расход газогенерирующего состава (табл.2).

Таблица 2

Экспериментальные значения удельного расхода заряда газогенератора для отбойки гранита в зависимости от расстояния между шпурами различной глубины, кг/м^3

Глубина шпура, м	Расстояние между шпурами, м								
	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7
1	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,15
1,25	0,07	0,08	0,1	0,1	0,12	0,13	0,15	0,16	0,18
1,5	0,09	0,1	0,12	0,13	0,15	0,16	0,18	0,19	0,22
1,75	0,1	0,12	0,136	0,15	0,17	0,19	0,21	0,22	0,26
2	0,12	0,14	0,16	0,18	0,19	0,21	0,23	0,25	0,29
2,25	0,13	0,15	0,17	0,2	0,22	0,24	0,26	0,29	0,33
2,5	0,15	0,17	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29	0,32	0,37
2,75	0,16	0,19	0,21	0,24	0,27	0,3	0,32	0,35	0,4
3	0,17	0,2	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,44
3,25	0,19	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,38	0,41	0,488
3,5	0,2	0,24	0,27	0,31	0,34	0,38	0,41	0,45	0,5

Примечание. Диаметр шпуров 32 мм.

Выводы

1. Результаты экспериментальных исследований и расчетов по двум критериям показали, что горение слоевой системы осуществляется только в дефлаграционном режиме. Переход горения во взрыв маловероятен и практически исключен.

2. Порошковая система состава газогенератора относится к низкобризантным представителям класса ВВ и является взрывоопасной.

3. Состав на основе дизельного топлива и хлората натрия также можно отнести к классу ВВ, но значительно менее мощному.

4. Установлена взаимосвязь технологических параметров добычных работ (расстояние между шпурами, диаметр и глубина шпура) по линии отбойки блока с удельным расходом газогенераторов при их срабатывании.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бычков Г.В.* Результаты исследования разрушающего действия зарядов ГДШ при отделении монолитов и блоков от массива на месторождениях гранита / Г.В.Бычков, Р.В.Кокунин, С.В.Казаков // Добыча, обработка и применение природного камня: Сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова», 2008. С.67-76.

2. *Гельфанд Б.Е.* Фугасное действие взрывов / Б.Е.Гельфанд, М.В.Синельников. СПб: Астерин, 2007. 252 с.

3. *Парамонов Г.П.* Опыт применения новых невзрывчатых материалов при добыче блочного камня и щадящего разрушения природных объектов / Г.П.Парамонов, Ю.В.Виноградов, О.Н.Кирсанов // Записки Горного института. 2006. Т.168. С.239-242.

4. *Парамонов Г.П.* Некоторые особенности кинетики автокаталитической реакции горения и воспламенения хлората натрия с полиэтиленом в манометрической бомбе / Г.П.Парамонов, В.Н.Ковалевский, О.Н.Кирсанов // Взрывное дело. 2009. Вып. № 102/59. С.40-46.

5. Патент 2560369 РФ. МПК C06B29/08. Состав для разрушения природных и искусственных объектов / Г.П.Парамонов, О.Н.Кирсанов, А.В.Конев. Опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.

6. Патент 2477791 РФ. МПК B21C37/00. Газогенератор для направленного разрушения горных пород / Г.П.Парамонов, В.Н.Ковалевский, О.Н.Кирсанов. Опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.

7. *Синельников О.Б.* Добыча облицовочного камня. М.: Изд-во Российской академии сельскохозяйственных наук, 2005. 245 с.

***Авторы*: Г.П.Парамонов,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *paramonov@spmi.ru*, **В.Н.Ковалевский,** *канд.техн. наук*, *доцент*, *vladimir_kovalevskiy@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*), **Петер Мозер,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *peter.moser@unileoben.ac.at* (*Горный университет*, *г.Леобен*, *Австрия*).

Статья принята к публикации 13.04.2016.