

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ (ПОДЗЕМНАЯ, ОТКРЫТАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ)

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-5-55-61

УДК 622.232

ЗАПИРАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ПЕНОГЕЛЕВОЙ ЗАБОЙКИ НАНО-СТРУКТУРИРОВАННОГО СОСТАВА

LOCKING ACTION OF A NANOSTRUCTURED FOAM STEMMING

Катанов Игорь Борисович, профессор, д-р техн. наук,
e-mail: noa-0025@yandex.ru
Igor B. Katanov, Dr. Sc. in Engineering, Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennyaya, Kemerovo, 650000,
Russian Federation

Аннотация:

Проведены лабораторные испытания наноструктурированных пеногелевых составов в качестве забоечного материала. Горный массив имитировался цементно-песчаными моделями, скважинный заряд капсулем-детонатором с эквивалентной массой ВВ и теплотой взрыва. Пенгель заполнялся в ампулы, которые используются при изготовлении забойки шпуров. Сравнение проводилось с забойкой из просеянного песка. Полученные результаты времени выброса продуктов взрыва из шпура, время разрушения моделей и анализ дробленого продукта цементно-песчаных моделей показывают, что наноструктурированный состав в качестве забойки обеспечивает повышение эффективности заряда ВВ в модели.

Ключевые слова: пеногель, наноструктурированный состав, кратность, устойчивость, забойка, скважина, взрыв.

Abstract:

Laboratory tests of nanostructured foam-gel compositions as a stemming material were carried out. The rock was imitated by cement-sand models, the borehole charge by a blasting cap with an equivalent mass of explosives and the heat of the explosion. The foam gel was filled in ampoules, which are used to make a stemming. The comparison was made with a sifted sand stemming. The obtained results of the time of ejection of explosion products from the hole, the time of destruction of the models, and the analysis of the crushed product of cement-sand models show that the nanostructured composition as a stemming provides an increase in the efficiency of the explosive charge in the model.

Key words: foam gel, nanostructured composition, multiplicity, stability, stemming, borehole, explosion.

Цель работы. Установить особенности разрушения цементно-песчаных моделей зарядами взрывчатого вещества с забойкой из наноструктурированных составов с заданной кратностью.

Объектом для исследований является наноструктурированный пеногелевый состав, предназначенный для забойки взрывных скважин. Основное назначение пеногелевой забойки наноструктурированного состава – повышение

эффективности действия заряда взрывчатого вещества, которое заключается в увеличении времени задержки продуктов взрыва скважинного твердого заряда в сравнении с используемой традиционно твердой забойкой из буровой мелочи или песка. Известные пеногелевые забойки [1] характеризуются недостаточной устойчивостью, поэтому при длительном (более 8 часов) нахождении в скважине их эффективность снижается. Наноструктурированные составы

пеногелей кратностью от 8 до 15 обладают повышенной устойчивостью [2]. Оценить их эффективность в лабораторных условиях можно путем моделирования взрывов на цементно-песчаных моделях.

Цементно-песчаная модель по прочностным свойствам должна имитировать горный массив.

Масштаб моделирования выбран на основании соотношения, связывающего диаграммы прочности модели σ_m и природы σ_n [3, 4]:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_n} = M_{\sigma_{сж}} = M_\gamma M_l, \quad (1)$$

где $M_{\sigma_{сж}}$ – масштаб временного сопротивления на одноосное сжатие; M_γ – масштаб плотности; M_l – линейный масштаб.

Для получения модели горного массива используется цементно-песчаная смесь портландцемента марки 400 по ГОСТ 10178-85 [5], водопроводная вода и песок по ГОСТ 8736-2014 [6] в заданном соотношении. В результате получается эквивалентный материал с прочностной характеристикой $[\sigma_{сжн}] = 60 \text{ МПа}$ в масштабе моделирования $M_l = 1:30$. При моделировании разрушения взрывом зарядов ВВ

одним из условий подобия считается энергия заряда ВВ. Поэтому для моделирования процесса необходимо установить вес заряда ВВ в модели из соотношения [7]:

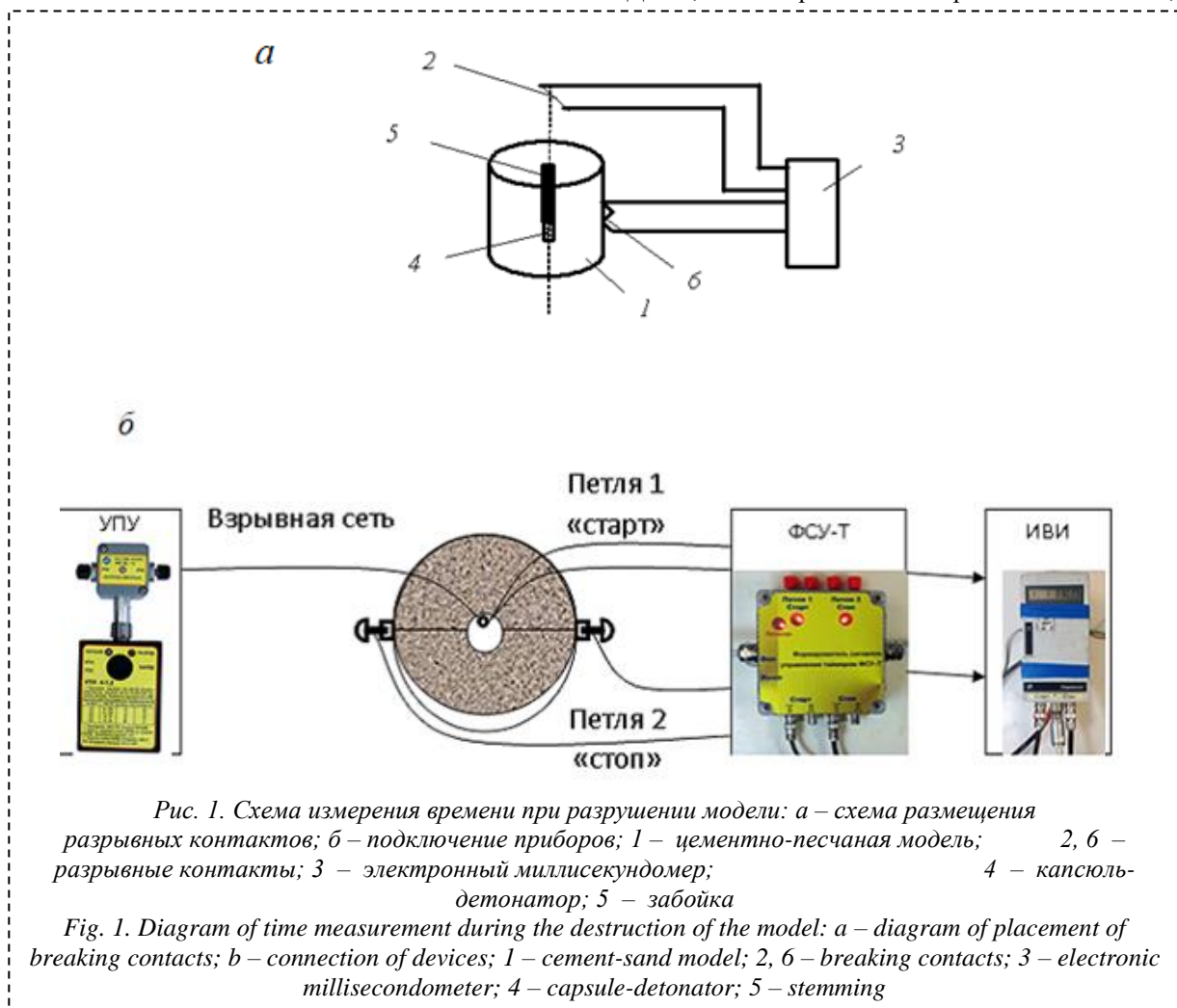
$$P_m Q_m M_p = P_n Q_n, \quad (2)$$

где Q_m, Q_n – соответственно теплота взрыва ВВ в цементно-песчаной модели и в горном массиве, Дж/кг; P_m, P_n – соответственно вес заряда взрывчатого вещества в модели и в натуре, кг.

Моделирование горного массива вскрышных пород в выбранном масштабе заключается в подготовке цементно-песчаных моделей в виде цилиндров l диаметром 220 мм, высотой 220 мм и осевым расположением шпура 2 диаметром 32 мм и глубиной 180 мм. Длина забойки в модели принимается равной 125 мм. Масса модели составляет 16 кг.

Форма модели в виде цилиндра принята из соображений того, что зона дробления породы вокруг скважинного заряда тоже имеет форму, близкую к цилиндру.

При проведении экспериментов использовался заряд ВВ в эквиваленте к гранулитам с теплотой взрыва, равной 3,845 кДж/кг, т. е. простейшим промышленным ВВ,



которые в настоящее время наиболее часто применяются при проведении взрывной подготовки горной массы к выемке на угольных разрезах Кузбасса. В качестве источника разрушающего импульса применяется капсуль-детонатор ЭД-КЗ-ПКМ с характеристиками: масса ВВ (гексоген) равна 1,3 г, теплота взрыва 5,45 МДж/кг и скорость детонации 8640 м/с.

Для приготовления песчаной забойки использован сухой песок, который при подготовке к экспериментам просеивался через сито диаметром 1 мм.

Пеногелевая забойка приготавливалась непосредственно перед экспериментом из растворов пеногелеобразующих веществ. Наноструктурированный состав, включающий: водные растворы жидкого стекла 10-15% масс; пенообразователя ПО-1НСВ 3-5% масс; ортофосфорной кислоты 5-8% масс; хлорида железа 0,1-0,3 % масс и 0,05-0,15 % масс наноструктурирующей добавки наносил-30 готовился с учетом показателей устойчивости и кратности [2, 8].

На лабораторной установке для приготовления пеногеля растворы смешивались с одновременной подачей сжатого воздуха. Из пеногенератора пеногель поступал в полиэтиленовые ампулы, установленные непосредственно в шпур с электродетонатором. Поскольку ампула имеет клапан, то, наполненная пеногелем, она плотно прилегает к стенкам шпура в модели.

Для определения временных параметров выброса забойки 5 и разрушения модели 1 использовался миллисекундомер 3 (рис. 1).

С этой целью на расстоянии 100 мм от модели 1 по ее вертикальной оси устанавливался разрывной контакт 2 электронного миллисекундомера 3. Миллисекундомер 3 включался в момент взрыва детонатора за счет разрыва петли 1 «старт», а останавливался в момент разрыва контакта 2 петли 2 «стоп» материалом забойки 5, выбрасываемой из шпура, или контакта 6 петли 2 «стоп» – дробленным материалом модели 1.

Схема измерения времени между срабатыванием детонатора и выбросом материала забойки с газообразными продуктами детонации, разрушение модели при моделировании горного массива вскрышных пород осуществляется следующим образом. Капсуль-детонатор подключался к пусковому устройству УПУ-4-1,2 (источнику импульса электрического тока). Петля 1 «старт» и разрывной контакт 2 подсоединялись к миллисекундомеру 3, который представляет собой ФСУ-Т (формирователь сигналов управления таймером) и таймер с экраном ИВИ.

Перед проведением взрыва проводилась проверка работоспособности измерительного оборудования без подключения измерительных

цепей. С этой целью тумблер включения ФСУ-Т необходимо перевести в положение «ВКЛ». На лицевой панели светится светодиод индикатора питания. Затем замкнуть контрольной переключательной клеммы петля 1 «старт». На лицевой панели светится светодиод индикатора петля 1 «старт». Замкнуть контрольной переключательной клеммы петля 2 «стоп». На лицевой панели светится светодиод индикатора петля 2 «стоп». После этого необходимо подключить входы измерителя временных интервалов (ИВИ) кабелями к соответствующим выходам ФСУ-Т с необходимой для ИВИ полярностью сигналов. Включить ИВИ. Для ИВИ типа «Термит» нажатием на кнопку «ВКЛ» выбрать режим измерения. Убрать контрольную переключательную клемму петля 1 «старт». Светодиод индикатора петля 1 «старт» гаснет на индикаторе ИВИ «Термита» появляются прочерки, указывающие на начало отсчета времени. Затем необходимо убрать контрольную переключательную клемму петля 2 «стоп». Светодиод индикатора петля 2 «стоп» гаснет, а на индикаторе ИВИ «Термита» появляется значение времени задержки между обрывом петли 1 «старт» и обрывом петли 2 «стоп».

К цементно-песчаной модели крепятся планки держателя петли 2 «стоп» так, чтобы провод петли 2 «стоп» проходил строго по центру шпура цементно-песчаной модели на расстоянии 100 мм от торца модели. Провод петли 2 «стоп» протягивается через отверстия в планке держателя петли. В качестве провода для петли 2 «стоп» используется эмаль провод диаметром 0,2-0,3 мм. Для исключения вероятности перепутывания взрывных и измерительных цепей провода должны иметь разную (отличительную) расцветку для всех цепей.

Тумблер включения ФСУ-Т перевести в положение «ВКЛ». На лицевой панели светится светодиод индикатора питания.

Провода петли 1 «старт» подключить к клеммам петли 1 «старт» формирователя сигналов управления таймером (ФСУ-Т). На петле 1 светится светодиод индикатора петля 1 «старт».

Провода петли 2 «стоп» подключить к клеммам петли 2 «стоп» формирователя сигналов управления таймером (ФСУ-Т). На лицевой панели светится светодиод индикатора петля 2 «стоп».

Подключить входы измерителя временных интервалов (ИВИ) кабелями к соответствующим выходам ФСУ-Т с необходимой для ИВИ полярностью сигналов.

Включить ИВИ. Для ИВИ типа «Термит» нажатием на кнопку «ВКЛ» и выбрать режим измерения.

При использовании капсуля электрической системы инициирования, соединительные провода КД подключить к взрывной сети. Взрывную сеть проверить на величину расчетного сопротивления, подключить к взрывному устройству УПУ-4-1,2 и

Таблица 1. Показатели, характеризующие работоспособность заряда ВВ с различным материалом забойки

Table 1. Indicators characterizing the efficiency of the explosive charge with different stem material

Материал	Время задержки выброса, мс	Время разрушения, мс
Просеянный песок	6,58	3,54
Пенгель	5,83	2,65

a



b



c



d



Рис. 2. Вид моделей, раздробленных взрывом детонатора
 Fig. 2. The models disintegrated by the explosion of the detonator

инициировать взрывную сеть.

При инициировании взрывной сети разрушаются петля 1 и петля 2. На лицевой панели ФСУ-Т гаснут светодиоды индикатора петля 1 «старт» и петля 2 «стоп». На индикаторе ИВИ «Термита» появляется значение времени задержки (в миллисекундах) между обрывом петли 1 «старт» и обрывом петли 2 «стоп».

Индицируемое на индикаторе ИВИ «Термита» значение определяется разницей времени между временем, за которое взрывается заряд ВВ в шпуре, и временем выброса материала забойки с газообразными продуктами (таблица 1).

Для проведения экспериментов было

подготовлено 9 моделей. В первых трех моделях размещался заряд ВВ с твердой забойкой из просеянного сухого песка. Во второй серии из трех моделей незаряженная ВВ часть шпура заполнялась пеногелем.

Одна модель была взорвана с зарядом ВВ массой 50 г. Другая модель была взорвана с зарядом ВВ массой 5 г. В остальных моделях в качестве ВВ использовался только капсуль-детонатор с массой гексогена равной 1,3 г.

Визуальный анализ дробленого материала моделей после взрыва позволил выявить некоторые закономерности. При взрывах моделей с твердой забойкой вокруг устья шпура

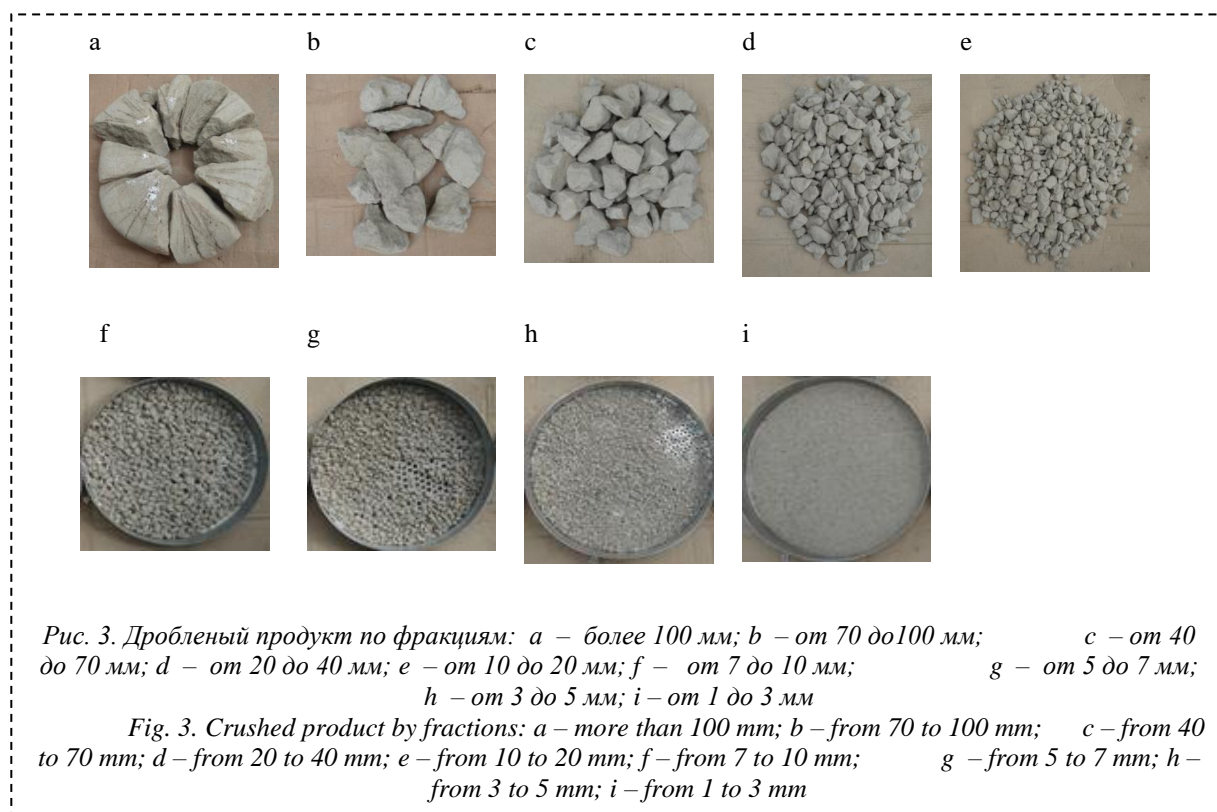


Рис. 3. Дробленый продукт по фракциям: a – более 100 мм; b – от 70 до 100 мм; c – от 40 до 70 мм; d – от 20 до 40 мм; e – от 10 до 20 мм; f – от 7 до 10 мм; g – от 5 до 7 мм; h – от 3 до 5 мм; i – от 1 до 3 мм

Fig. 3. Crushed product by fractions: a – more than 100 mm; b – from 70 to 100 mm; c – from 40 to 70 mm; d – from 20 to 40 mm; e – from 10 to 20 mm; f – from 7 to 10 mm; g – from 5 to 7 mm; h – from 3 to 5 mm; i – from 1 to 3 mm

формировались радиальные трещины поверхности (рис. 2 а, b) по которым происходило разрушение. При использовании пеногелевой забойки форма зоны дробления была разной в зависимости от ее размещения относительно детонатора.

При заполнении пеногеля до уровня детонатора, когда оставалась воздушная полость, на уровне детонатора модель разрушалась равномерно, верхняя часть модели разбивалась на сегменты, нижняя дробилась на более крупные куски (рис. 2 c).

В моделях с пеногелевой забойкой, заполняющей весь шпур вместе с детонатором дробление подошвы модели на уровне детонатора было максимальным, а верхняя часть модели дробилась на сегменты несколько больших размеров (рис. 2 d). Это обстоятельство объясняется тем, что пеногель усиливает энергию заряда. Зона дробления модели на уровне заряда увеличивается и поэтому энергии на дробление верхней части модели уже не достаточно. Из этого результата можно сделать предположение, что для более равномерного дробления необходимо либо уменьшить заряд, либо увеличить размеры модели.

При определении размеров зоны дробления ее граница определялась по характерным разрушениям. Зона разрушения на уровне забойки имела сегментообразную форму. Наиболее интенсивное дробление наблюдалось на уровне заряда.

Дробленый материал состоял из кусков различной крупности. Для оценки качества дробления материал подвергался ситовому

анализу. Наиболее крупные фрагменты раздробленной модели сортировались вручную. Куски размером > 71мм принимались как естественные отдельные в соответствии с масштабом моделирования, а более 100 мм принимались как негабарит. При использовании специальных шаблонов отбирались и сортировались фракции более 40 мм. Раздробленный взрывом материал модели, который был получен в результате эксперимента при его разрушении взрывом, был рассортирован по классам крупности. Куски, которые были менее 40 мм, сортировались при помощи сит, в том числе по крупности: <1; 1-3; 3-5; 5-10; 10-20 и >20 мм (рис. 3).

При оценке качества дробления принималось количество выхода дробленого продукта i -ой фракции и величина диаметра среднего куска этой фракции. Величину среднего диаметра куска разрушенной модели можно определить по формуле [9]:

$$d_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i P_i, \quad (3)$$

где d_{cp} – величина диаметра среднего куска, мм; x_i – среднее арифметическое границ i -ой фракции, мм; P_i – содержание i -ой фракции, доли ед.; n – число фракций, шт. Результаты, полученные при проведении экспериментов по взрывному разрушению моделей, представлены в таблице 2, анализ которой позволил установить, что фрагменты дробления, принятые за кондиционные при использовании в конструкции заряда наноструктурированной пеногелевой

Таблица 2. Результаты ситового анализа разрушенных моделей
Table 2. Results of sieve analysis of destroyed models

Забойка	Количество дробленого продукта по фракциям, г/ %								Выход материала, г	Средний диаметр
	Интервал фракции, мм									
	< 1	1–5	5–10	10–20	20–40	40–70	70–100	>100		
Песок	$\frac{5193}{35,1}$	$\frac{65}{0,4}$	$\frac{127}{0,8}$	$\frac{860}{5,4}$	$\frac{2360}{14,8}$	$\frac{1840}{11,6}$	$\frac{2909}{16,0}$	$\frac{2526}{15,9}$	15880	5,19
Пеногель	$\frac{5168}{32,6}$	$\frac{126}{0,8}$	$\frac{254}{1,6}$	$\frac{507}{3,2}$	$\frac{2786}{17,5}$	$\frac{2221}{13,9}$	$\frac{2538}{15,9}$	$\frac{2320}{14,5}$	15920	4,06

забойки, составили 85,4 %. Это на 1,3 % больше, чем аналогичные результаты, полученные с твердой забойкой. Анализ раздробленного материала позволяет установить равномерность дробления моделей. По сравнению с моделями, которые были взорваны с песчаной забойкой, при взрывании всех моделей с пеногелевой забойкой выход дробленого продукта крупных фракций (более 70 мм) уменьшился на 1,5 %, а доля выхода мелких фракций (до 1,0 мм) снижается на 2,5%. Величина диаметра среднего куска фракций при пеногелевой забойке снизилась на 13%, что

указывает на улучшение качества дробления.

Таким образом, исследования по взрывному разрушению цементно-песчаных моделей подтвердили предположение о том, что наноструктурированный состав пеногелевой забойки качественно влияет на эффективность и равномерность дробления. Окончательные выводы можно будет сделать после проведения экспериментальных промышленных взрывов в условиях разрезов по «Программе АО «УК «Кузбассразрезуголь» в 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катанов, И. Б. Обоснование рационального состава пеногелей для забойки скважин // Вестник КузГТУ. – 2018. – № 3. – С. 22-29.
2. Катанов И. Б. Анализ свойств наноструктурированных пеногелевых составов для забойки взрывных / И. Б. Катанов, А. А. Сысоев // Вестник КузГТУ. – 2020. – № 2 (138). – С. 24-31.
3. Барон, Л. И. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке / Л. И. Барон, Г. П. Личели. – М.: Недра, 1966.
4. Оксанич, И. Ф. Закономерности дробления горных пород взрывом и прогнозирование гранулометрического состава / И.Ф. Оксанич, П.С. Миронов. – М.: Недра, 1982. – 166 с.
5. ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия (с Изменениями № 1, 2).
6. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправкой).
7. Петров, Н. Г. Исследования параметров буровзрывных работ на моделях из эквивалентных материалов для условий Чиатурского месторождения марганца / Н. Г. Петров, С. П. Мальцев // Сб.: Взрывное дело № 67/24. – М.: Недра, 1969. – С. 77-82.
8. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2007. – 416 с.
9. Ташкинов, А. С. Статистические модели в процессах горного производства / А. С. Ташкинов, А. В. Бирюков, В. И. Кузнецов // – Кемерово: Кузбассвузиздат, 1996. – 228 с.

REFERENCES

1. Katanov, I. B. Substantiation of the rational composition of foams for well Drilling // Vestnik KuzSTU. – 2018. – №. 3. – P. 22-29.
2. Katanov I. B. analysis of properties of nanostructured foam-gel compositions for blasting / I. B. Katanov,

- A. A. Sysoev // Vestnik KuzGTU. – 2020. – № 2 (138). – P. 24-31.
3. Baron, L. I. Fracture of rocks by the explosive breaking / L. I. Baron, G. P. Likely. – М.: Nedra, 1966.
 4. Sergiy, I. F. principles of rock crushing by the explosion and prediction of granulometric composition / I. F. Oksanych, P. S. Mironov. – М.: Nedra, 1982. – 166 p.
 5. GOST 10178-85 Portland Cement and slag Portland cement. Technical conditions (with changes 1, 2).
 6. GOST 8736-2014 Sand for construction works. Technical conditions (with amendments).
 7. Petrov, N. G. Studies of drilling and blasting parameters on models from equivalent materials for the conditions of the Chiatura manganese deposits of / N. G. Petrov, S. P. Maltsev, // Proc.: The explosive case. № 67/24. – М.: Nedra, 1969. – P. 77-82.
 8. Gusev, A. I. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology. – М.: Fizmatlit, 2007. – 416 p.
 9. Tashkinov, A. S. Statistical models in mining processes / A. S. Tashkinov, A.V. Biryukov, V. I. Kuznetsov // – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 1996. – 228 p.

Поступило в редакцию 13.11.2020

Received 13 November 2020