

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.32.83.002

УДК 622. 235

© Р.З. Камалян, С.Р. Камалян, Н.С. Нестерова, 2022

Р.З. КАМАЛЯН

д-р техн. наук,
профессор кафедры
ИМСИТ, г. Краснодар
e-mail: kasarub@gmail.com

С.Р. КАМАЛЯН

канд. физ-мат. наук
зам. начальника отдела
Южного межрегионального управления охраны
ПАО «Газпром», г. Краснодар
e-mail: kasarub@gmail.com

Н.С. НЕСТЕРОВА

канд. техн. наук
доцент кафедры
ИМСИТ, г. Краснодар
e-mail: nnnnnn46@mail.ru

ОБ ОЦЕНКЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

В работе рассмотрены типы распределений, которые используются для описания гранулометрического состава взорванной массы горной породы.

Из многочисленных формул рассмотрены только три распределения: Пуассона, гамма и Вейбулла. Это связано с тем, что применение распределения Пуассона имеет довольно давнюю историю, гамма распределение использовалось одним из авторов при определении формы навала грунта, образующегося при взрыве на выброс, а распределение Вейбулла популярно при определении грансостава взорванной породы. Кроме того, частными случаями Вейбулла являются многие распределения.

Наряду с этими распределениями в работе рассмотрены и детерминированные схемы. При построении детерминированных схем разрушения основные параметры понимают как среднестатистические.

Значительный интерес представляет задача получения заданного среднего куска дробленой породы. Анализ показал, что величина среднего куска может быть получена полуэмпирическим или эмпирическим путем.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований, полученных в натуральных условиях. Представлена в процентном отношении крупность кусков в зависимости от параметров зарядов в различных сериях.

Эти исследования показывают, что проверка теоретических схем весьма сложна, причем согласование теоретического и эмпирического распределений с помощью некоторого критерия согласия трудно осуществимо.

Ключевые слова: ПОРОДА, ГРАНСОСТАВ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ДЕФЕКТЫ, ТРЕЩИНЫ.

Известны попытки модифицирования функций распределения, а также использования детерминированных схем таких исходных характеристик взрывного дробления породы, как трещиноватость, интенсивность действующей нагрузки, а также технологические особенности схем взрывания [1–4].

Оценки получают либо в модельной постановке, либо косвенным путем [5]. Как правило, используется визуальное рассмотрение экспериментальных кривых в выравнивающих координатах, соответствующих некоторому виду распределения [6, 7].

Выравнивание экспериментальных точек не означает, что фактическое распределение кусков по размерам совпадает с теоретическим, так как в некоторых диапазонах изменения параметров различные типы распределения трудно различимы [5]. Примером могут служить склеивания различных распределений при соответствующих значениях их параметров [5, 8].

Заметим, что практическое значение математической схемы во многом определяется удобством ее непосредственного использования, а также возможностью подтверждения предположений, сделанных при построении этой схемы и определении области применимости последней.

ЗАКОН ПУАССОНА

Попытки построения вероятностной модели осколкообразования для процесса однократного разрушения хрупкого твердого тела на основе закона Пуассона (распределения Пуассона) имеют давнюю историю [1]. Оно основано на гипотезе Гриффитса [9], согласно которой дефекты или микротрещины, ответственные за разрушение, существуют в хрупком твердом теле и до приложения разрушающего напряжения. Предполагается, что в осколкообразовании принимает участие лишь некоторая их доля, так называемые

«активированные» дефекты, распределенные как по объему, так и на вновь образующихся поверхностях разрушения и ребрах осколков. Последние два типа названы поверхностными и краевыми. Рассматривается бесконечное тело, влиянием его границ на разрушение пренебрегается. Данная схема учитывает лишь однократное разрушение, так что образование осколков вполне определяется постулированными случайными распределениями активных дефектов в образце.

Построение функции распределения осколков по размерам основано на следующих предположениях:

1. Образование осколков вызывается активизацией объёмных, поверхностных и краевых дефектов;
2. Активные дефекты трёх типов распределены независимо друг от друга;
3. Активные дефекты каждого из трех типов распределены независимо от способа приложения разрушающего напряжения.

Таким образом, существенным предположением данного подхода является исчерпаемость дефектов в ходе разрушения и исключение какого-либо влияния трещин друг на друга в процессе разрушения. В результате получена формула, определяющая вероятность того, что осколок имеет полную длину ребер, полную площадь грани и объем меньше, чем l , s и v соответственно:

$$P(Q) = 1 - e^{-Q}, \quad (1)$$

где Q — линейная функция от l , s и v [5].

Данный подход был использован в [9–11], где предложено связать параметр распределения Пуассона с интенсивностью взрывной нагрузки и исходной трещиноватостью массива горной породы. Ограничиваясь краевыми дефектами, они предполагают, что разрушение горного массива обусловлено активацией дефектов в двух независимо протекающих про-

цессах: образовании естественных трещин и трещин под действием взрывной нагрузки.

Получена функция распределения в предположении, что пространственные координаты активных дефектов краевого типа распределены нормально [9, 10].

Считая, что образование трещин в массиве горных пород обусловлено активацией дефектов краевого и поверхностного типов, и используя различные комбинации участия указанных дефектов в разрушении, в [11] предложено свести классификацию массивов горных пород по типу трещиноватости к четырём типам распределений (Эрланга, экспоненциального, Релея и нормального) и их комбинациям.

Известны и другие попытки построения распределения кусков на основе закона Пуассона [12].

ГАММА-РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

В [13] предложена методика расчета грансостава взорванной породы на основе гамма-распределения. Существенным предположением [13] является соответствие распределения количества кусков по размерам для взорванной породы, распределению естественных отдельностей по размерам для исходного трещиноватого массива. Опираясь на такие свойства эмпирического распределения, как неотрицательность случайной величины и положительной асимметрии плотности, полагают [13], что наиболее удобным и гибким, хорошо аппроксимирующим экспериментальные данные по естественной трещиноватости является гамма-распределение. В [13] получена функция распределения кусков по размерам в долях объема в виде неполной гамма-функции:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^u t^{m-1} e^{-t} dt, \quad (2)$$

$$u = \frac{Px}{M}, \quad m = P + 3, \quad P = \frac{M^2}{D}. \quad (3)$$

Здесь M — математическое ожидание диаметра куска, D — дисперсия распределения количества кусков по размерам, $\Gamma(m)$ — гамма-

функция.

Используя эмпирическое соотношение между средним и дисперсией, полученное при исследовании естественной трещиноватости

$$\frac{M^2}{D} \approx 3 \quad (4)$$

исключает один параметр, и функция распределения принимает вид:

$$\Phi(x) = 1 - e^{-\frac{3}{M}x} \sum_{k=0}^5 \frac{3^k x^k}{M^k k!}. \quad (5)$$

Имеются работы, в которых исследуется применимость гамма-распределения в конкретных условиях [14].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА

Для аналитического описания грансостава взорванной породы одним из первых было предложено соотношение Розина – Раммлера. При вероятностной интерпретации суммарной кумулятивной доли кусков по размеру как интегральной функции распределения, соотношение Розина – Раммлера [5] соответствует введенной Вейбуллом [15] функции распределения:

$$\Phi(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right], \quad (6)$$

где x_0 , n — параметры масштаба и формы.

Впервые соотношение Розина – Раммлера прошло проверку в [16].

Теоретическое построение функции распределения кусков по размерам на основе вероятностных представлений сделано в [3, 4].

Распределение Вейбулла, как частные случаи, содержит экспоненциальные распределения, распределения Релея, близко к логарифмическому нормальному и гамма-распределению [17], и для больших значений параметра формы является нормальным [5].

Отметим так же наличие работ, в которых исследуется применимость указанного распределения к описанию грансостава взорванной породы и производится сравнение с другими распределениями [5, 7].

Например, в [6] на основе усеченного распределения Вейбулла, описывающего грансостав при разрушении единичного блока, построена плотность распределения кусков по размерам для случая взрывного дробления блочного массива горной породы.

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ СХЕМЫ

Другой путь теоретического исследования процесса дробления горных пород взрывом заключается в построении детерминированных схем разрушения, основные параметры которых понимаются как среднестатистические [18].

Следует отметить работу [5], в которой установлено, что критерий дробимости, полученный в [18], совпадает с критическим значением максимальной скорости сдвига для случая несжимаемой среды. В [19] получены формулы для размера среднего осколка и гранулометрического состава разрушенной среды. Имеются работы, в которых рассматривается зонная схема дробления пород [20, 21].

СРЕДНИЙ КУСОК

С теоретическим построением функции распределения осколков по размерам связа-

на прикладная задача получения заданного среднего куска дробленной породы. Величина среднего куска может быть получена, исходя из теоретической схемы и полуэмпирическим или эмпирическим путём. Известно большое число формул [5] для оценки среднего куска. Ограничимся рассмотрением работ [3, 4]. В них из соображений размерности и подобия [22] применительно к взрывному разрушению хрупкой среды в качестве первого приближения приводится формула:

$$\bar{X} = BK^2q^{-2/3}\xi, \quad (7)$$

где В — постоянная, К — коэффициент интенсивности напряжения в поисках трещин, ξ — коэффициент затухания напряжения.

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования проводились с целью оценки влияния на степень дробления отношения ЛНС W к диаметру заряда D при различных его значениях. Часть этих результатов представлена в таблице.

Таблица 1

Результаты опытных взрывов

Диаметр заряда D, мм	Длина заряда L, м	Длина забойки, мм	ЛНС, W, м	Крупность в %				Отношение W/D	Средний диаметр куска d_{cp} , мм
				0–50 мм	50–100 мм	100–150 мм	> 150 мм		
32	2,0	2,5	0,4	45,0	34,0	12,0	9,0	12,5	70,0
32	2,0	2,0	0,73	15,8	22,2	16,0	46,0	32,6	132,4
32	2,0	2,1	0,95	10,3	22,0	22,5	45,2	29,7	138,0
39	2,5	2,0	0,55	42,0	34,0	12,0	12,0	14,1	75,0
39	2,5	1,5	0,8	19,0	22,0	16,0	48,0	20,5	127,0
39	2,5	3,0	1,1	17,0	7,0	6,0	70,0	28,2	157,0
46	3,0	1,5	0,67	38,9	34,1	13,0	14,0	14,6	79,6
46	3,0	2,0	0,9	16,0	26,3	19,2	38,5	19,6	125,0
46	3,38	2,12	1,3	12,0	4,0	5,0	79,0	28,3	170,0

По этим данным построена зависимость выхода крупнокусовой фракции (K %) от отношения линии наименьшего сопротивления W к диаметру заряда (рис. 1). Как видно, из рисунка с увеличением W/D выход крупнокусовой фракции увеличивается более интенсивно с возрастанием диаметра зарядов.

При одном и том же отношении W/D с увеличением диаметра заряда увеличивается выход негабарита (K_1, K_2, K_3). Для того, чтобы сохранить один и тот же выход негабарита при отбойке зарядами увеличенного диаметра, необходимо соответственно уменьшить отношение W/D (рис. 2).

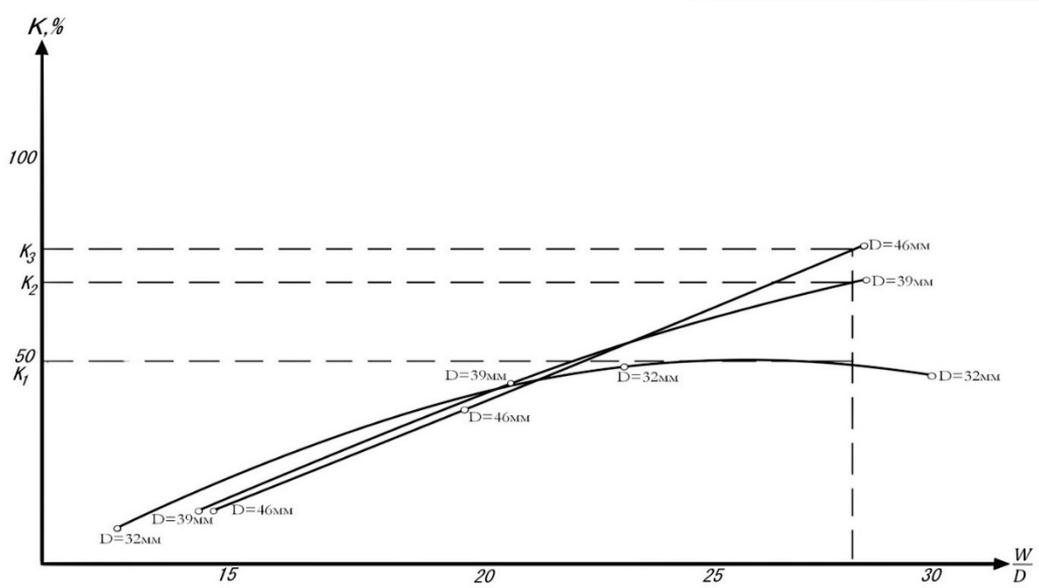


Рис. 1. Зависимость процента выхода крупнокусовой фракции (K %) от отношения ЛНС к диаметру заряда (W/D)

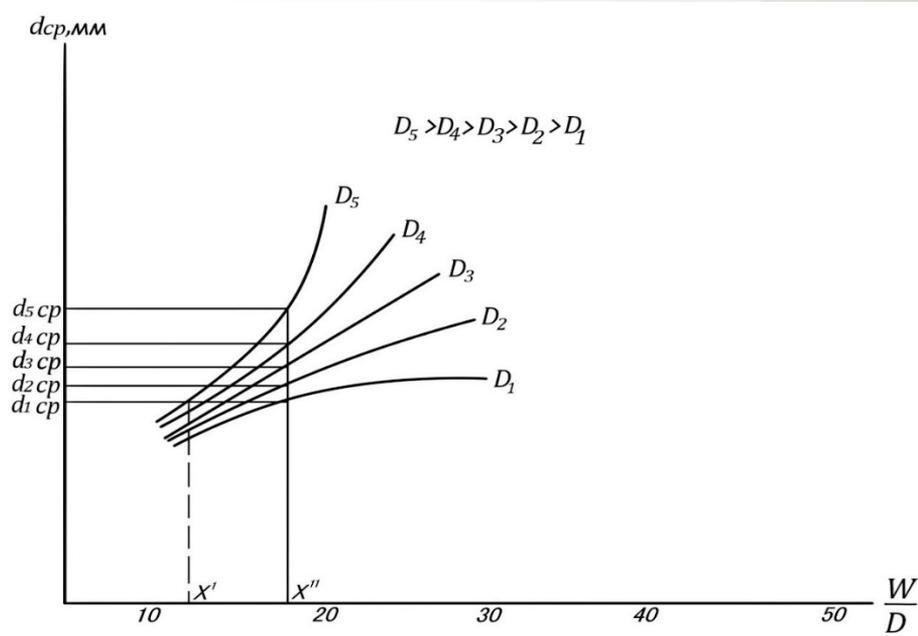


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра кусков (d_{cp}) от отношения ЛНС (W) к диаметру заряда (D)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По характеру исходных представлений выделяются две основные концепции. В первом случае размер осколка считается случайной величиной. При этом функция распределения строится с использованием некоторых ограничений на вероятность появления случайной величины. Полученная схема позволяет вычислить вероятность того, что некоторое значение размера осколка будет принадлежать определенному интервалу.

У второй концепции в основе некоторая модельная схема разрушения. Она допускает достаточно точное вычисление размера осколка в зависимости от начальных данных.

Результаты наших исследований показывают, что экспериментальная проверка теоретических схем весьма сложна, причем проверка согласованности теоретического и эмпирического распределения с помощью некоторого критерия согласия трудно осуществима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков А.В., Репин Н.Я. Анализ применимости некоторых законов распределения при изучении кусковатых смесей // Труды КузПИ. Кемерово. 1973. Вып. 48. С. 39–47.
2. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. 1941. Т. 31. № 2. С. 103–106.
3. Кошелев Э.А., Кузнецов В.М., Софронов С.Т., Черников А.Г. Статистика осколков, образующихся при разрушении твердых тел взрывом // ПМТФ. 1971. № 2. С. 87–100.
4. Кузнецов В.М. О среднем размере кусков, образующихся при дроблении горных пород взрывом // ФТПРПИ. 1973. № 2. С. 39–43.
5. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977. 262 с.
6. Фаддеенков Н.Н. Об аналитическом описании грансостава взорванной массы горной породы с учетом предварительной трещиноватости // ФТПРПИ. 1975. № 2. С. 37–41.
7. Фаддеенков Н.Н. О применимости закона Розина-Раммлера к анализу грансостава взорванной массы горной породы // ФТПРПИ. 1974. № 6. С. 40–42.
8. Камалян Р.З. Об одной схеме расчета взрыва на выброс // ФТПРПИ. 1992. № 1. С. 50–55.
9. Безматерных В.А., Симонов В.Г. Учет естественной трещиноватости взрывного массива при расчете грансостава // Известия вузов. Горный журнал. 1974. № 9. С. 88–94.
10. Безматерных В.А., Симонов В.П., Лешуков М.П. Оценка энергии разрушения хрупких тел при некоторых видах динамических воздействий // Известия вузов. Горный журнал. 1972. № 4. С. 76–81.
11. Безматерных В.А., Симонов В.П., Боровков В.Ф., Сисин А.Г. Классификация массивов горных пород по типу распределения размеров кусков // Известия вузов. Горный журнал. 1973. № 10. С. 29–35.
12. Крысин Р.С. Теоретические предпосылки к основам регулируемого дробления взрывов // Взрывное дело. 1971. Вып. 70/27. С. 198–203.
13. Репин Н.Я., Бирюков А.В. О применении вероятностного метода при исследовании кусковатости горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 1972. № 7. С. 11–21.
14. Родионов Л.Е. К вопросу о количественной оценке структуры массива и кусковатости отбитой породы на рудных карьерах // Труды Всесоюзного политехнического института. 1970. Вып. 58. С. 17–23.
15. Weibull W.A. A statistical distribution punetion op wide applicability // Journal Application Mechanic. 1951. Vol. 18. No. 293. P. 837–843.
16. Барон Л.И., Сиротюк Г.Н. Проверка применимости уравнения Розина-Раммлера для вычисления диаметра среднего куска при взрывной отбойке горных пород // Взрывное дело. 1967. Вып. 62/19. С. 111–121.
17. Володин И.Н. О различии распределений гамма и Вейбулла // Теория вероятностей и

её применения. 1974. Вып. 2. С. 398–404.

18. Власов О.Е. Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород действием взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 104 с.

19. Шерг Е.Н. Оценка дробящего действия удлиненного заряда в хрупкой среде // ФТПРПИ. 1975. № 1. С. 88–92.

20. Багдасарян А.Б. Григорян С.С. О действии взрыва в органическом стекле // ПМТФ. 1967. № 3. С. 57–63.

21. Родионов В.П., Ромашов А.Н. Адушкин В.В., Сухотин А.П. Николаевский В.Н. Механический дефект подземного взрыва. М.: Недра, 1971. 220 с.

22. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1965. 375 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.32.83.002

UDC 622. 235

© R.Z. Kamalyan, S.R. Kamalyan, N.S. Nesterova, 2022

R.Z. KAMALYAN

Doctor of Engineering Sciences,
Professor of Department
IMSIT, Krasnodar
e-mail: kasarub@gmail.com

S.R. KAMALYAN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Deputy Head of Department
Southern Interregional Security Department
of PJSC «Gazprom», Krasnodar
e-mail: kasarub@gmail.com

N.S. NESTEROVA

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor
IMSIT, Krasnodar
e-mail: nnnnnn46@mail.ru

ON EVALUATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION IN DYNAMIC ROCK DESTRUCTION

The paper considers the types of distributions that are used to describe the granulometric composition of the blasted rock mass.

Of the numerous formulas, only three distributions are considered: Poisson, gamma, and Weibull. This is since the use of the Poisson distribution has a rather long history, the gamma distribution was used by one of the authors to determine the shape of the pile of soil formed during an ejection explosion, and the Weibull distribution is popular in determining the particle size distribution of the exploded rock. In addition, many distributions are Weibull special cases.

Along with these distributions, deterministic schemes are also considered in the work. When constructing deterministic fracture schemes, the main parameters are understood as statistical averages.

Of considerable interest is the problem of obtaining a given average piece of crushed rock. The analysis showed that the size of the average piece can be obtained in a semi-empirical or empirical way.

The paper presents the results of experimental studies obtained in natural conditions. The size of the pieces is presented as a percentage depending on the parameters of the charges in various series.

These studies show that the verification of theoretical schemes is very difficult, and it is difficult to reconcile the theoretical and empirical distributions with the help of some goodness-of-fit criterion.

Keywords: ROCK, GRANULAR COMPOSITION, DISTRIBUTION, DEFECTS, CRACKS.

REFERENCES

1. Biryukov A.V., Repin N.Ya. Analysis of the applicability of some distribution laws in the study of lumpy mixtures // Proceedings of KuzPI [Trudy KuzPI]. Kemerovo. 1973. Issue 48. P. 39–47. [In Russ.].
2. Kolmogorov A.N. On logarithmically normal particle size distribution during crushing // Reports of the USSR Academy of sciences [Doklady Akademii nauk SSSR]. 1941. Vol. 31. No. 2. P. 103–106. [In Russ.].
3. Koshelev E.A., Kuznetsov V.M., Sofronov S.T., Chernikov A.G. Statistics of fragments formed during the destruction of solids by explosion // Applied Mechanics and technical physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 1971. No. 2. P. 87–100. [In Russ.].
4. Kuznetsov V.M. On the average size of the pieces formed during the crushing of rocks by explosion // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1973. No. 2. P. 39–43. [In Russ.].
5. Kuznetsov V.M. Mathematical models of explosive business. Novosibirsk: Nauka, 1977. 262 p. [In Russ.].
6. Faddeenkov N.N. On the analytical description of the granulation of the exploded mass of rock, taking into account the preliminary fracturing // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1975. No. 2. P. 37–41. [In Russ.].
7. Faddeenkov N.N. On the applicability of the Rozin-Rammler law to the analysis of the granulation of the exploded mass of rock // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1974. No. 6. P. 40–42. [In Russ.].
8. Kamalyan R.Z. About one scheme for calculating an explosion for an outburst // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1992. No. 1. P. 50–55. [In Russ.].
9. Bezmaternykh V.A., Simonov V.G. Taking into account the natural fracturing of the exploding array when calculating the granulation // News of universities. Mining Journal [Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal]. 1974. No. 9. P. 88–94. [In Russ.].
10. Bezmaternykh V.A., Simonov V.P., Leshukov M.P. Evaluation of the fracture energy of brittle bodies under certain types of dynamic influences // News of universities. Mining Journal [Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal]. 1972. No. 4. P. 76–81. [In Russ.].
11. Bezmaternykh V.A., Simonov V.P., Borovkov V.F., Sisin A.G. Classification of rock massifs by the type of size distribution of pieces // News of universities. Mining Journal [Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal]. 1973. No. 10. P. 29–35. [In Russ.].
12. Krysin R.S. Theoretical prerequisites to the basics of controlled crushing of explosions // Explosion technology [Vzryvnoe delo]. 1971. Issue 70/27. P. 198–203. [In Russ.].
13. Repin N.Ya., Biryukov A.V. On the application of the probabilistic method in the study of lumpiness of rocks // News of universities. Mining Journal [Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal]. 1972. No. 7. P. 11–21. [In Russ.].
14. Rodionov L.E. On the question of the quantitative assessment of the structure of the massif and the lumpiness of the chipped rock in ore quarries // Proceedings of the All - Union Polytechnic Institute [Trudy Vsesoyuznogo politekhnicheskogo instituta]. 1970. Issue 58. C. 17–23. [In Russ.].
15. Weibull W.A. A statistical distribution punetion op wide applicability // Journal Application Mechanic. 1951. Vol. 18. No. 293. P. 837–843.

16. Baron L.I., Sirotyuk G.N. Verification of the applicability of the Rozin-Rammler equation for calculating the diameter of an average piece during explosive rock breaking // Explosion technology [Vzryvnoe delo]. 1967. Issue 62/19. P. 111–121. [In Russ.].

17. Volodin I.N. On the distinction between gamma and Weibull distributions // Probability theory and its applications [Teoriya veroyatnostej i eyo primeneniya]. 1974. Issue 2. P. 398–404. [In Russ.].

18. Vlasov O.E. Smirnov S.A. Fundamentals of calculating the crushing of rocks by the action of an explosion. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. 104 p. [In Russ.].

19. Sher E.N. Evaluation of the crushing effect of an elongated charge in a brittle medium // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1975. No. 1. P. 88–92. [In Russ.].

20. Bagdasaryan A.B. Grigoryan S.S. About the effect of an explosion in organic glass // Applied Mechanics and technical physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 1967. No. 3. P. 57–63. [In Russ.].

21. Rodionov V.P., Romashov A.N. Adushkin V.V., Sukhotin A.P. Nikolaevsky V.N. Mechanical defect of underground explosion. M.: «Nedra», 1971. 220 p. [In Russ.].

22. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. M.: «Nauka», 1965. 375 p. [In Russ.].