

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-51-55

УДК 622.271.3

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И ЭНЕРГОЕМКОСТИ  
ДРОБЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ  
ПЛАСТОВ**

**THE RELATIONSHIP OF GRAIN-SIZE COMPOSITION AND INTENSITY OF  
FRAGMENTATION AT DIFFERENT TECHNOLOGIES OF COAL SEAMS**

**Паначев Иван Андреевич,**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: kiv.sm@kuzstu.ru

**Ivan A. Panachev,**

Dr. Sc. in Engineering, professor, e-mail: kiv.sm@kuzstu.ru

**Бирюков Альберт Васильевич,**

доктор техн. наук

**Albert V. Biryukov,**

Dr. Sc. in Engineering

**Шаламанов Виктор Александрович,**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: sva@kuzstu.ru

**Victor A. Shalamanov,**

Dr. Sc. in Engineering, professor, e-mail: sva@kuzstu.ru

**Винидиктов Андрей Викторович,**

заведующий лабораторией, e-mail: vinidiktivandrei@gmail.com

**Andrei V. Vinidiktov,**

head of laboratory, e-mail: vinidiktivandrei@gmail.com

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian  
Federation

**Аннотация:**

*Одной из важнейших характеристик качества угля является его сортность, определяемая фракционным составом. Известно, что увеличение выхода переизмельченного угля при его добыче наносит большой материальный ущерб народному хозяйству. При этом резко возрастают затраты на его обогащение, увеличиваются потери при перевозке, и при его сжигании в топках угольные фракции менее 6 мм не сгорают, а уносятся в трубы в виде пыли, что является мощным источником запыленности воздушного бассейна. Исходя из этого проблема регулирования фракционного состава ископаемых углей при их разработке приобретает особую остроту и актуальность.*

**Ключевые слова:** *гранулометрический состав, технологии разработки, экскаваторы, открытая добыча, энергоёмкость, дробление.*

**Abstract:**

*One of the most important characteristics of coal quality is its grade determined by fractional composition. It is known that the increase in the yield of re-crushed coal during its production causes great material damage to the national economy. At the same time, the costs of its enrichment sharply increase, losses during transportation increase, and when it is burned in furnaces, coal fractions less than 6 mm do not burn, but are carried into the pipes in the form of dust, which is a powerful source of dust in the air basin. Based on this, the problem of regulation of the fractional composition of fossil coals in their development becomes particularly acute and urgent.*

**Key words:** *granulometric composition, development technologies, excavators, open-pit mining, energy intensity, crushing.*

Применяемые в настоящее время механические способы разрушения углей (комбайновые, струговые и др.) в одинаковых условиях обеспечивают различное содержание фракций (классов) в гранулометрическом составе добываемого угля. Это связано с тем, что разрушение угля при механическом воздействии происходит под влиянием различных видов деформирования: растяжения-сжатия, сдвига, смятия и т.д. Сопротивление угля разрушению неравнозначно для различного вида деформаций. Так, по данным М. М. Протодяконова, сопротивление угля отрыву в 15-20 раз меньше сопротивления сжатию. Сопротивление сдвигу имеет промежуточное значение. Исследования Е. И. Ильницкой показали, что сопротивление угля отрыву в 40-50 раз меньше сопротивления сжатию. По данным различных исследований прочность углей на сжатие колеблется в широких пределах от 0,7 МПа до 60 МПа. Поэтому гранулометрический состав угля существенно зависит от конструкции и типа исполнительного органа (комбайна, струга, ковша экскаватора и т.д.), режима работы машины, формы и сечения среза и свойств угольного массива.

Исследования российских и зарубежных ученых показали, что при комбайном способе разработки угольного пласта выход мелких фракций (0÷6) и (6÷13) мм оказывается выше, чем при разработке их с помощью струга. Это свидетельствует о том, что при разрушении угля методом крупного скола существенно уменьшается переизмельчение угля и соответственно повышается его сортовой состав.

При открытом способе добычи разработка угольных пластов в зависимости от прочности углей производится экскаватором без взрывного рыхления с использованием энергии взрыва. Взрывание углей в этом случае осуществляется с малыми значениями удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ), обеспечивающим лишь сотрясательный эффект, с целью достижения нарушения сплошности пласта по трещинам без дополнительного его дробления. Возможен и третий путь взрывного воздействия на угольный пласт – через угольную подушку (буфер).

Нам границе разреза сред (порода-уголь) действие взрыва значительно ослабляется. За счет отражений и преломлений уменьшаются напряжения на фронте волны, меняется спектральный состав силовых импульсов в результате интенсивного поглощения энергии в высокочастотных областях электрического спектра колебаний. Путем управления энергией взрыва открываются большие возможности увеличения выхода сортовых классов угля и, как следствие, снижение запыленности воздушной среды.

Разработка методов управления взрывом

проводится по двум направлениям. Это оптимизация амплитудно-временных характеристик взрывного импульса, обеспечивающих развитие зоны разрушения вокруг заряда и скорости нагружения в импульсе, регулирующей движение микродефектов и управляющей степенью разрушения. Реализация этих направлений может быть осуществлена путем количественной оценки влияния различных природных (структура массива и его анизотропия) и технологических (схема и периоды короткозамедленного взрывания, применение воздушных промежутков и оболочек зарядов, использование подпорной стенки и ВВ с необходимыми дистанционными характеристиками и др.) факторов на характеристики взрывного разрушения. Учет этих факторов позволяет уменьшить амплитуду взрывной волны, увеличить длительность взрывного импульса и обеспечить более полное использование энергии взрыва и, как следствие, равномерность дробления и уменьшение зоны переизмельчения, являющейся очагом пылеобразования, а при взрывании углей – ухудшающей его сортности. Оперативное управление гранулометрическим составом угля при различных технологиях выемки (комбайновая, струговая, взрывная и др.) ставит задачу аналитического описания и прогнозирования его гранулометрических характеристик. В основе аналитического построения обобщенной функции гранулометрического состава по любому определяющему свойству (числу частиц, суммарной площади поверхности, объему и т.п. лежит закон распределения диаметра частиц изучаемой совокупности. Если  $f(x)$  - плотность распределения диаметра, то функция гранулометрического состава имеет вид [1,2].

$$F_x(x) = \left(\frac{1}{M_k}\right) \int_0^x x^k f(x) dx, \quad (1)$$

где  $F_x(x)$  – содержание фракций ( $x$ ) по заданному свойству;  $M_k$  – математическое ожидание  $x^k$ .

При значениях показателя степени, равных 0, 1, 2, 3 эта функция описывает гранулометрический состав соответственно по числу частиц, их суммарной длине, площади поверхности и объему (весу).

Для частиц угля при любой технологии выемки характерно возрастание относительного числа частиц с уменьшением их диаметра. Поэтому во всех случаях эмпирическая плотность распределения диаметра монотонно убывает. Универсальной моделью в такой ситуации может служить закон Вейбулла

$$f(x) = \left(\frac{a}{n}\right) x^{1/n-1} \exp(-a^n \sqrt[n]{x}): \quad (2)$$

- с начальными моментами

$M_k = \frac{(kn)!}{a^{kn}}$ ; (3)  
 - с обобщенной функцией  
 гранулометрического состава

$$F_x(x) = \frac{1}{(kn)!} \int_0^{a\sqrt[n]{x}} x^{kn} \exp^{-x} dx \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 - \exp(-a\sqrt[n]{x}) \cdot \sum_{m=1}^{kn} [(a\sqrt[n]{x})^m / m],$$
 (4)

где параметр  $n$  принимает натуральные значения, и параметр  $a$  связан со средневзвешенным по объему диаметром частиц  $D_3 = M_4/M_3$  соотношением

$$D_3 = \frac{(4n)!}{(3n)!} a^n.$$
 (5)

Применяя формулу Стирлинга

$$n! \approx (n/e)^n \sqrt{2\pi n}$$
 (6)

соотношение (5) можно привести к виду

$$a = \frac{256n^{2n} \sqrt[4]{4/3}}{27e^n \sqrt[3]{D_3}}.$$
 (7)

В таблице 1 приведены эмпирические данные ситового анализа угля при различных технологиях выемки (Э) в сопоставление с расчетными значениями (р): (а) – струговой, (б) – комбайновый, (в) – с применением взрывного рыхления, (г) – выемка экскаватором при воздействии на угольный пласт взрывом скважинных зарядов через слой породы.

Приведенные данные адекватно аппроксимируются законом (4) при  $k = 3$  и  $k = 8$ . При этом второй параметр распределения находится из соотношения (7)

$$a = \frac{28,4}{\sqrt[3]{D_3}}.$$
 (8)

Удельные затраты энергии при дроблении угля в процессе выемки пропорциональны удельной площади поверхности частиц  $S_0 = \gamma/D_2$ , где  $\gamma$  - мера сферичности частиц, равная в среднем 10;  $D_2 = M_3/M_2$  - средневзвешенный по площади поверхности диаметр частиц. Но поскольку с учетом формулы Стирлинга

$$D_3/D_2 = \frac{2^{10n}}{3^{6n}} = (1024/729)^n,$$
 (9)

то при  $n = 8$  получим соотношение

$$S_0 = 150/D_3.$$

Таким образом, удельная площадь поверхности частиц угля и, следовательно, удельные затраты энергии на дробление обратно пропорциональны средневзвешенному по объему (весу) диаметру частиц.

Удельная энергия дробления  $E_0 = AS_0$  может быть найдена, если известна энергоемкость дробления  $A$ , т.е. количество энергии, затрачиваемое на образование единицы площади поверхности частиц. Эта величина коррелируется с пределом прочности дробимого материала при одноосном сжатии:  $A = 100\sigma$ , где  $A$  измеряется в Дж/м<sup>2</sup>, а  $\sigma$  - в МПа. Полагая для углей в среднем  $\sigma = 30$ , получим

$$E_0 = 0,45/D_3,$$
 (10)

где средневзвешенный по объему диаметр частиц измеряется в метрах.

Поскольку основная часть удельной энергии дробления связана с образованием мелких частиц, то естественно возникает вопрос о взаимосвязи величины  $E_0$  с выходом некондиционной фракции (-6 мм). Для установления этой взаимосвязи сопоставим соответствующее значение величин  $E_0$  и  $E_3$  по трем существенно различным технологиям выемки угля (табл. 2).

Анализ этих данных приводим к регрессивной модели вида

$$E_0 = 165/(55 - P),$$
 (11)

где  $P$  - весовой выход фракции (-6мм), %;  $E_0$  - удельная энергия дробления, МДж

Как видно из таблицы 2, при открытой разработке угольных месторождений с предварительным взрывным рыхлением угля выход мелких фракций снижается в 2,5 раза по сравнению со струговой выемкой и в 4 раза по

Таблица 1. Весовой выход фракции

Table 1. The weight yield of fraction

$x$ , мм	6	13	25	70	120	200	400	$D_3$ , мм
(э)	30	44	58	70	79	88	100	70
(а)								
(р)	25	42	58	80	88	94	98	24
(б)								
(э)	46	63	77	89	96	100		118
(в)								
(р)	47	63	80	94	97	99		89
(г)								
(э)	12	24	36	58	69	80	92	99
(д)								
(р)	11	22	33	58	71	81	91	
(э)	16	27	40	64	72	88	98	89
(г)								
(р)	16	29	44	68	80	88	96	
(э)	8	16	26	51	68	91	98	99
(д)								
(р)	10	19	30	54	69	80	91	

Таблица 2. Взаимосвязь удельной энергии дробления угля с выходом некондиционной связи  
Table 2. The relationship of the specific energy of coal crushing with the output of substandard communication

Технология выемки	$E_3$ (б), %	$E_6$ , МДж/м <sup>3</sup>
Экскаваторная с применением БВР	12	3,8
Струговая	30	6,4
Комбайновая	46	18,7

сравнению с комбайновой. При этом удельные затраты энергии дробления снижаются соответственно в 1,7 и 5 раз.

Таким образом, в отличие от формального подбора функций для аналитического описания фракционного состава (уравнение Розина–Рамллера, Годена–Андреева и др.), вероятностный подход к исследованию гранулометрических характеристик позволяет:

- прогнозировать гранулометрический

состав по значению средней характеристики крупности;

- осуществлять количественный анализ соотношения между энергетическими затратами на дробление и выходом некондиционных фракций во взаимосвязи с удельной площадью поверхности частиц;

- управлять технологическими параметрами выемки с целью повышения сортности угля и снижения пылеобразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков А. В. Управление взрывным дроблением крупноблочных пород / А. В. Бирюков, И. А. Паначев // Уголь, № 10, 1990. С.19-20.
2. Паначев И. А. Об энергоёмкости дробления горных пород / И. А. Паначев, А. В. Бирюков // Горный журнал, № 2, 1986. С. 64-66.
3. Репин, Н. Я. Буровзрывные работы на угольных разрезах / Н. Я. Репин, В. П. Богатырев, В. Д. Буткин, А. С. Ташкинов. – М.: Недра, 1987. – 254с.
4. Кутузов, Б. Н. Проектирование и организация взрывных работ: Учебник /Под общ. Ред. Проф. Б. Н. Кутузова. – М.: изд. «Горная книга», 2012. – 416 с.
5. Кук, М. Н. Наука о промышленных взрывчатых веществах. Пер с англ. под ред. Г. П. Демидюка, Н. С. Бахарева. – М.: Недра, 1980. – 453 с. – Пер. изд.: США, 1974.
6. K. Hino. Effect of Discontinuity of Rock on Fragmentation. Journal of the Industrial Explosives Society, Japan. Vol. 18, № 4, (1957).
7. T. Sakurai. On measurement of blasting energies by ballistic mortar. Journal of the industry. Explosives Society, Japan. V. 20, № 1, March. (1959).
8. J. M. Walsh and R. H. Christian, Phys. Rev. 97. 1954/
9. R. Raspet, P. Butler, F. Yahani. The effect of material properties on reducing intermediate blast noise // Appl. Acoust. V. 22, № 3. P. 243-259. (1987).
10. R. Raspet, S. Griffists. The reduction of blast noise with aqueous foam // J. Acoust. Soc. Amer. V. 74. № 6. P. 1757-1763. (1983).
11. T. D. Panezak, P. B. Butler, H. Krier. Shok propagation and blast attenuation through aqueous foams // J. Haz. Mater. V. 14, № 4. P. 321-336. (1987).
12. J. Rowers, H. Krier. Attenuation of blast waves when detonating explosives inside barriers // J. Haz. Mater. V. 13, № 1. P. 121-133. (1987).
13. Катанов, И. Б. Низкоплотные материалы в конструкции скважинных зарядов на карьерах / И. Б. Катанов, И. С. Федотенко. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2012. – 124 с.
14. Любимов, И. Р. Использование водорастворимых полимеров для повышения устойчивости противопожарных пен / В. Н. Любимов, А. И. Скушника // Безопасность в техносфере, № 4 (июль - август), 2014. С. 55-58.
15. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах». Утверждены Приказом Ростехнадзора от 16.12.2013 № 605. – Екатеринбург: ИД «Урал Юр Издат», 2014 – 280 с.
16. Катанов, И. Б. Совершенствование конструкции скважинного заряда с пеногелевой забойкой / И. Б. Катанов, П. Г. Скачилов // Вестник Кузбасский государственный технический университета, № 5 (111).2015. С. 43-45.

17. Катаров, И. Б. Обоснование рациональной производительности устройства для пеногелевой забойки / И. Б. Катаров, П. Г. Скачилов // Вестник Кузбасский государственный технический университета, № 4 (116), 2016. С. 65-71.

18. Сысоев, А. А. Инженерно-экономические расчеты для открытых горных работ: уч. пос. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2005. – 179 с.

## REFERENCES

1. Biryukov A.V. Control of explosive crushing of large-block rocks / A.V. Biryukov, I. A. Panachev // *Coal*, № 10, 1990. P. 19-20.
2. Panachev I. A. On the energy intensity of rock crushing / I. A. Panachev, A.V. Biryukov // *Mining journal*, № 2, 1986. P. 64-66.
3. Repin, N. Y. Drilling and blasting operations at coal mines / N. Y. Repin, V. P. Bogatyrev, V. D. Butkin, A. S. Tashkin. - M.: Nedra, 1987. – 254 P.
4. Kutuzov, B. N. Design and organization of blasting operations: The Textbook / Under total Ed. Prof. B. N. Kutuzov. – M.: Publishing house. "Mountain book", 2012. – 416 P.
5. Cook, M. N. Science of industrial explosives. Translated from English. Edited by G. P. Demidyuk, N. S. Bakharev. - M.: Nedra, 1980. - 453 p. - Per. ed.: USA, 1974.
6. K. Hino. Effect of Discontinuity of Rock on Fragmentation. *Journal of the Industrial Explosives Society, Japan*. Vol. 18, № 4, (1957).
7. T. Sakurai. On measurement of blasting energies by ballistic mortar. *Journal of the industry. Explosives Society, Japan*. V. 20, № 1, March. (1959).
8. J. M. Walsh and R. H. Christian, *Phys. Rev.* 97. 1954/
9. R. Raspet, P. Butler, F. Yahani. The effect of material properties on reducing intermediate blast noise // *Appl. Acoust.* V. 22, № 3. P. 243-259. (1987).
10. R. Raspet, S. Griffists. The reduction of blast noise with aqueous foam // *J. Acoust. Soc. Amer.* V. 74. № 6. P. 1757-1763. (1983).
11. T. D. Panezak, P. B. Butler, H. Krier. Shok propagation and blast attenuation through aqueous foams // *J. Haz. Mater.* V. 14, № 4. P. 321-336. (1987).
12. J. Rowers, H. Krier. Attenuation of blast waves when detonating explosives inside barriers // *J. Haz. Mater.* V. 13, № 1. P. 121-133. (1987).
13. Katarov, I. B. Low-Density materials in the construction of borehole charges at quarries / I. B. Katarov, I. S. Fedotenko. - Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2012. - 124 p.
14. Lyubimov, I. R. The use of water-soluble polymers to increase the stability of fire-fighting foams / V. N. Lyubimov, A. I. Skushnikova // *Safety in the technosphere*, № 4 (July-August), 2014. P. 55-58.
15. Federal rules and regulations in the field of industrial safety "safety Rules for blasting". Approved by Rostekhnadzor Order № 605 of 16.12.2013. –Ekaterinburg: Publishing house "Ural Yur Izdat", 2014 – 280 p.
16. Katarov, I. B. Perfection of a design of a borehole charge with a foam-gel face / I. B. Katarov, P. G. Skachilov // *Vestnik KuzSTU*, № 5 (111).2015. P. 43-45.
17. Katarov, I. B. Substantiation of rational productivity of the device for foam-gel slaughtering / I. B. Katarov, P. G. Skachilov // *Vestnik KuzSTU*, № 4 (116), 2016. P. 65-71.
18. Sysoev, A. A. Engineering and economic calculations for open pit mining: Uch. POS. - Kemerovo: GU KuzSTU, 2005. - 179 p.

Поступило в редакцию 20.11.2019

Received 20 November 2019