

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINERAL PROCESSING

Научная статья

УДК 61.53.03

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-1-64-73

### ОЦЕНКА ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПРОБЫ УГЛЕЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА

Семенова Светлана Александровна,  
Патраков Юрий Федорович

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (Институт угля СО РАН)

\*для корреспонденции: semlight@mail.ru



#### Информация о статье

Поступила:

22 декабря 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 января 2022 г.

Принята к публикации:

25 февраля 2022 г.

#### Ключевые слова:

уголь, аналитическая проба, гранулометрический лазерный анализ, дисперсный состав, стадия метаморфизма, петрографический состав

#### Аннотация.

В статье описаны результаты исследования дисперсного состава частиц в аналитической угольной пробе фракцией < 200 мкм, полученной в лабораторных условиях методом ручного измельчения в ступе. В качестве объектов исследования использовали образцы углей месторождений Кузбасса различных стадий метаморфизма и петрографического состава. Исследование дисперсного состава аналитической пробы углей осуществляли с использованием лазерного дифракционного микроанализатора для автоматического гранулометрического экспресс-анализа. В качестве параметров дисперсного состава пробы использованы среднестатистический размер частиц угля, распределение частиц по размерам, плотность распределения, среднеарифметический диаметр, медиана, величина и интенсивность модальных значений. По результатам работы обосновано влияние особенностей распределения петрографических компонентов в угольной массе и стадии метаморфизма на прочностные характеристики углей и фракционный состав аналитической пробы. Показано, что низкометаморфизованные блестящие угли наряду с сильно метаморфизованными при ударном и истирающем воздействии образуют повышенное количество крупных частиц (100-150 мкм). Среднеметаморфизованные полуматовые угли при измельчении образуют большее количество мелкой пыли (< 50 мкм). Матовые дюреновые угли более устойчивы к механическому воздействию. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологий добычи, обогащения и переработки углей, связанных с пылеобразованием.

**Для цитирования:** Семенова С.А., Патраков Ю.Ф. Оценка дисперсного состава аналитической пробы углей методом лазерного дифракционного анализа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1 (149). С. 64-73. doi: 10.26730/1999-4125-2022-1-64-73

**Введение.** Аналитическую пробу крупностью < 200 мкм используют для определения многих стандартных химико-технологических параметров углей – влажность, выход летучих веществ, зольность, содержание серы, теплота сгорания и т.д. [1]. Подготовка аналитической пробы включает измельчение усредненной пробы углей вручную в ступе или с использованием

механизированных устройств (дробилки молотковая, щековая, конусная; истиратели вибрационный, дисковый и др.). Вместе с тем механическая прочность углей существенно различается и зависит как от стадии метаморфизма, так и от распределения петрографических и минеральных компонентов, а также от степени окисленности органической массы (ОМУ) [2-4]. Поэтому использование фракции, столь разнообразной по содержанию частиц различного размера, не всегда оправданно, так как может привести к методическим ошибкам.

В последнее время для определения размера частиц широкое использование получил метод лазерной дифракции [5-7], который заменил традиционные методы: гель-фильтрацию и седиментацию (при размере частиц менее нескольких миллиметров) [8], оптическую и электронную микроскопию (при размере частиц более 50 мкм) [9]. По сравнению с указанными методами лазерная дифракция имеет ряд преимуществ: высокая скорость, точность выполнения анализа и воспроизводимость результатов; способность диагностировать крупность частиц в широком диапазоне размеров; программное обеспечение, позволяющее рассчитать форму и определить расчетные величины средних диаметров частиц и др. [10].

Цель данной работы – оценить дисперсный состав аналитических проб углей, полученных методом ручного истирания в ступе, методом лазерного дифракционного анализа.

**Методы исследования.** В качестве образцов для получения аналитической пробы < 200 мкм использовали усредненные пробы углей различных месторождений Кузбасса с показателем отражения витринита  $R_o$  от 0,7 до 2,2% технологических марок от Д до Т.

1. Микрофотографии угольных проб получали на растровом электронном микроскопе *JSM-6390 LA* фирмы «*JEOL*».

Петрографический анализ углей проводили на автоматическом петрографическом комплексе *SIAMS-620* в масляной иммерсии в отраженном свете, увеличение 300 раз.

Механическую прочность углей оценивали расчетным способом определения размолоспособности (по Хардгроу *HGI*), исходя из зольности, стадии метаморфизма (показателя отражения витринита  $R_o$ ) и мацерального состава (суммы отошающих компонентов  $\Sigma OK$ ) [11]:

$$HGI = 3 - 0,34 A^d + 0,33 \Sigma OK - 0,523 \Sigma OK \cdot R_o + 96,1 R_o - 20,2 R_o^2, \text{ ед.}$$

Определение дисперсности частиц проводили на лазерном дифракционном анализаторе *Analysette 22 Comfort* производства компании *Fritsch GmbH, Laborgerätebau* (Германия), использующем физический принцип дифракции электромагнитных волн. Лазерный луч проходит сквозь измерительную ячейку во время перемещения через нее угольной суспензии. Свет луча рассеивается пропорционально размеру частиц угля и посредством линзы фокусируется на детекторе. За счет изменения положения измерительной ячейки, уменьшения или увеличения расстояния между ячейкой и детектором возможно измерение более мелких или крупных частиц. Программное обеспечение, основанное на использовании комплекса математических методов Фраунгофера или Ми [12], позволяет вычислять распределение частиц по размерам и объемные доли, соответствующие эквивалентным диаметрам частиц.

Перед измерением гранулометрических характеристик для улучшения смачивания угольных частиц в ванну перед внесением водоугольной суспензии добавляли пептизирующий агент 0,1% р-р пирофосфата натрия и смачиватель СП-01 (*TU 2481-002-95498669-2008*). С целью повышения точности измерений на каждой пробе суспензии проводилось последовательное пятикратное сканирование с включением ультразвука для очистки поверхности.

Для визуализации результатов измерений использовали:

- накопительную кривую распределения  $Q_3(x)$ , которая указывает на распределение общего количество частиц с эквивалентным диаметром, меньшим и равным  $x$ . При построении интегральной кривой на графике откладываются значения  $Q_{3i}$  для всех фракций, начиная с наименьшего размера частиц, а на оси абсцисс – размер  $x_i$ ;

- кривая плотности распределения  $dQ_3(x)$  – первая производная  $Q_3(x)$ . Дифференциальная кривая строится после аналитического или графического дифференцирования интегральной кривой распределения.

2. Для характеристики дисперсного состава пыли использовали следующие параметры: среднестатистический размер частиц  $d$ , мкм, распределение частиц пыли по размерам  $Q$ , %, дифференциальная функция – плотность распределения частиц пыли  $dQ$ , %/мкм,

Таблица 1. Петрографический состав исследуемых образцов углей  
Table 1. Petrographic composition of the studied coal samples

Месторождение	Марка угля	Стадия метоморфизма	Литотип	$R_o$ , %	$V_t$	$S_v$	$I$	$\Sigma OK$
Караканское	Д	I	блестящий (кларен)	0,53	86	3	12	14
Ленинск-Кузнецкое	Г	I-II	блестящий (кларен)	0,68	92	3	5	7
Кушеяковское	Ж	III	блестящий (кларен)	0,92	91	2	7	8
Кемеровское	КС	III	полуматовый (кларено-дюрен)	1,01	38	21	43	57
Кемеровское	СС	III	полуматовый дюрен	1,19	30	17	53	64
Бирюлинское	ОС	IV	полуматовый (кларено-дюрен)	1,31	55	14	31	40
Краснобродское	Т	V	полуматовый (кларено-дюрен)	1,92	55	6	39	43
Бунгурское	Т	VI	полуматовый (дюрен)	2,26	45	5	50	53

Таблица 2. Химико-технологические и физические свойства исследуемых углей  
Table 2. Chemical-technological and physical properties of the studied coals

Марка угля	Влажность, $W^a$ , %	Зольность, $A^d$ , %	Выход летучих веществ, $V^{daf}$ , %	Индекс Хардгрова $HGI^*$ , ед.
Д	5,0	4,9	43,5	39
Г	2,4	2,9	42,6	48
Ж	1,5	7,3	37,4	83
КС	0,8	6,2	21,7	75
СС	1,2	18,1	26,0	70
ОС	0,3	6,0	19,1	75
Т	0,7	13,8	19,8	65
Т	1,4	6,5	8,9	57

среднеарифметический диаметр  $d_{ср}$ , мкм и мода  $M_d(d)$ , мкм, которая соответствует величине наиболее распространенного диаметра частиц в составе пыли [13].

**3. Описание результатов.** Исследуемые угли марок Д, Г и Ж относятся к относительно «молодой» по геологическим меркам кольчугинской серии [14] и представлены преимущественно блестящими и полублестящими разновидностями с содержанием витринита более 90%. Более зрелые полуматовые угли балахонской серии (угли марок КС, СС, ОС и Т) обогащены фюзенизированными компонентами (табл. 1) и характеризуются большей минерализованностью угольной массы (табл. 2).

Согласно результатам лазерного дифракционного анализа (рис. 1, табл. 3), дисперсный состав аналитической пробы для образцов углей разных стадий метаморфизма существенно различается. Для всех угольных проб характерно полимодальное распределение частиц по крупности, при этом значения модальных величин и их интенсивности различны. В большинстве случаев профили плотности распределения частиц по размерам имеют три выраженных гало с вершинами в области мелких (18-23 мкм), средних (39-43 мкм) и крупноразмерных фракций (65-117 мкм). Если модальные величины первых двух максимумов для разных углей близки по значению, то значения третьего максимума, характеризующего содержание наиболее крупных частиц в составе пробы, находятся в широком диапазоне крупности. Для углей балахонской серии с  $R_o = 1,1-1,9\%$  наибольшее количество крупных частиц соответствует размеру 65-79 мкм. Угли кольчугинской серии с  $R_o = 0,5-0,9\%$  имеют максимум распределения крупных частиц в

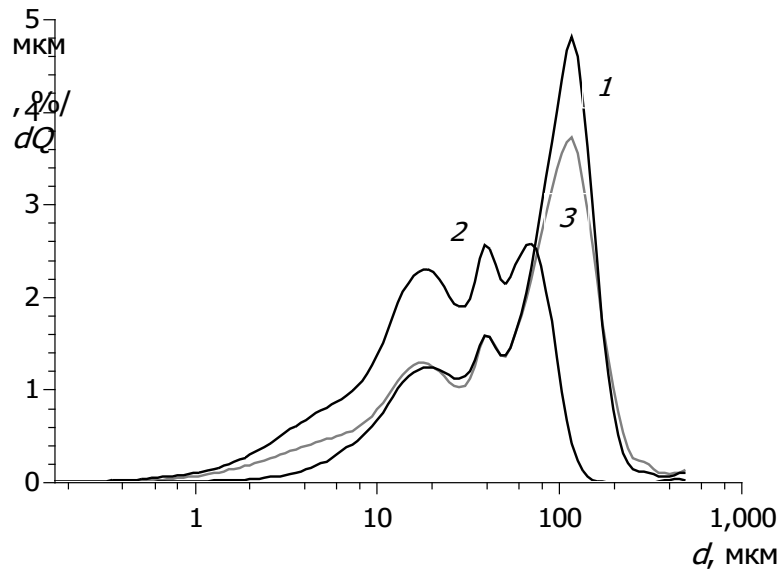


Рис. 1. Пример плотности распределения частиц в составе аналитической пробы для углей марок Г (1), ОС (2) и Т (3)

Fig. 1. Example of particle distribution density in the composition of an analytical sample for coals of grades G (1), OS (2) and T (3)

Таблица 3. Численные характеристики фракционного состава аналитической угольной пробы (< 200 мкм)

Table 3. Numerical characteristics of the fractional composition of the analytical coal sample (< 200 microns)

Марка	Доля частиц в составе пробы с размером (мкм), % отн.					Среднеарифметический диаметр, мкм	Медиана, мкм	Мода, мкм	Дифференциал моды, $dQ$ , %/мкм
	< 10	10-30	30-50	50-100	>100				
Д	2,4	8,06	7,39	19,31	62,8 4	143,40	129,12	23,2/42,6/ 150,61	0,66/1,14/ 4,78
Г	5,8	19,61	11,36	30,18	33,0 5	81,63	79,19	19,12/38,96/ 117,05	1,25/1,59/ 4,81
Ж	9,85	21,08	13,37	26,68	29,0 2	73,75	62,07	22,7/42,61/ 111,80	1,52/2,02/ 3,56
КС	14,17	28,59	19,55	31,31	6,38	46,09	38,01	21,80/38,90/ 79,40	1,82/2,78/ 3,26
СС	14,34	34,06	19,41	22,14	10,0 5	48,15	32,62	19,12/38,96/ 74,40	2,17/2,94/ 2,17
ОС	20,77	35,95	18,35	23,18	1,75	34,74	24,81	19,12/38,96/ 69,73	2,30/2,57/ 2,58
Т	13,16	26,97	22,24	32,63	5	47,20	39,91	23,22/41,56/ 65,36	1,70/3,15/ 3,85
Т	12,15	20,05	11,2	27,18	29,4 2	76,54	66,98	17,90/38,96/ 117,0	1,30/1,60/ 3,70

пробе при 112-150 мкм. Подобное распределение частиц в аналитической пробе имеет и наиболее высокометаморфизованный уголь марки Т с  $R_o = 2,2\%$ .

Два первых максимума плотности распределения частиц укладываются в границы области, характеризующейся наиболее взрывоопасными свойствами – 10-50 мкм [15, 16]. Наибольшая доля частиц (до 50% отн.) с этим диапазоном крупности соответствует углям средней стадии метаморфизма с  $R_o = 1,0-1,8\%$  (табл. 3, рис. 2), что указывает на взрывоопасные свойства их пыли, образующейся в условиях ударной нагрузки и трения. Доля мелких частиц крупностью <10 мкм в составе проб не превышает 20% отн. и также возрастает у среднеметаморфизованных углей. Содержание в пробах фракции 50-100 мкм имеет близкие показатели для всех исследуемых образцов и находится в диапазоне ~ 20-30% отн. Количество наиболее крупных частиц (>100 мкм) в пробах имеет наибольшие значения у низко- и высокометаморфизованных

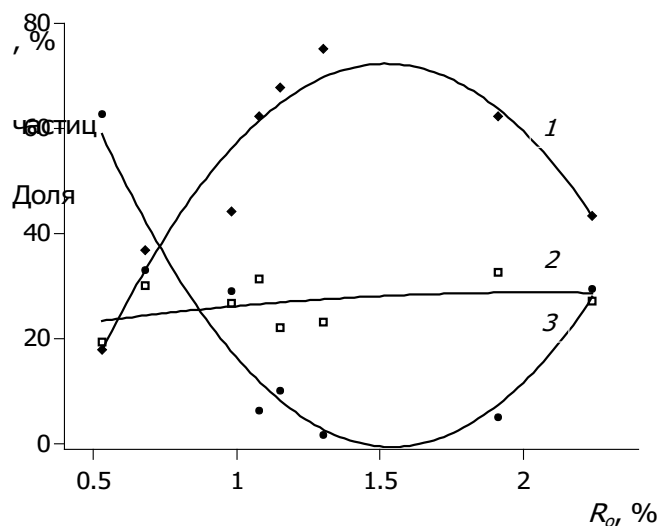


Рис. 2. Доля частиц размером  $< 50$  мкм (1), 50-100 мкм (2) и  $> 100$  мкм (3) в составе аналитической пробы ( $< 200$  мкм) для углей ряда метаморфизма

Fig. 2. The proportion of particles  $< 50$  microns (1), 50-100 microns (2) and  $> 100$  microns (3) in the composition of the analytical sample ( $< 200$  microns) for coals of the metamorphism series

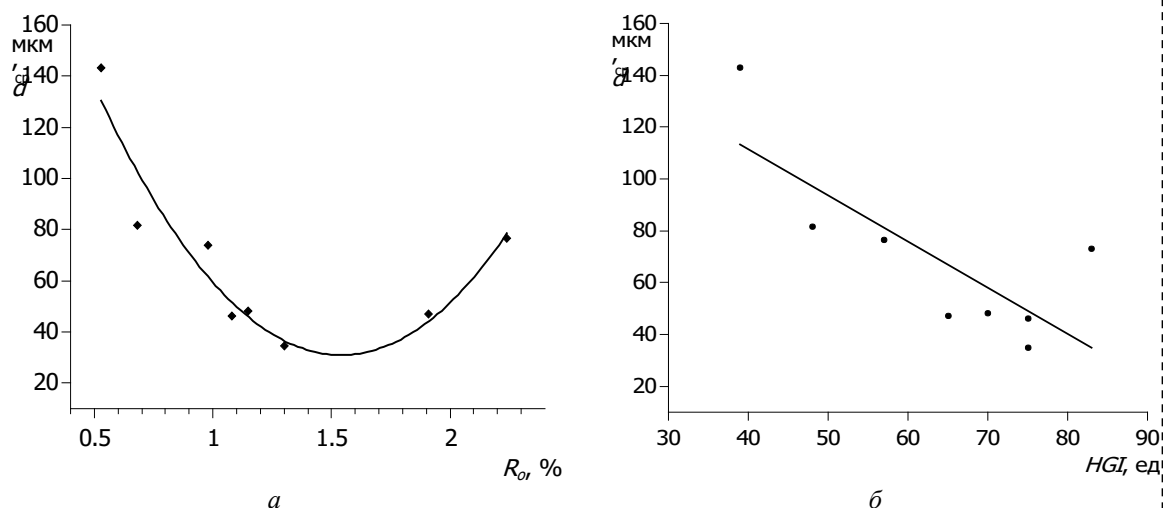
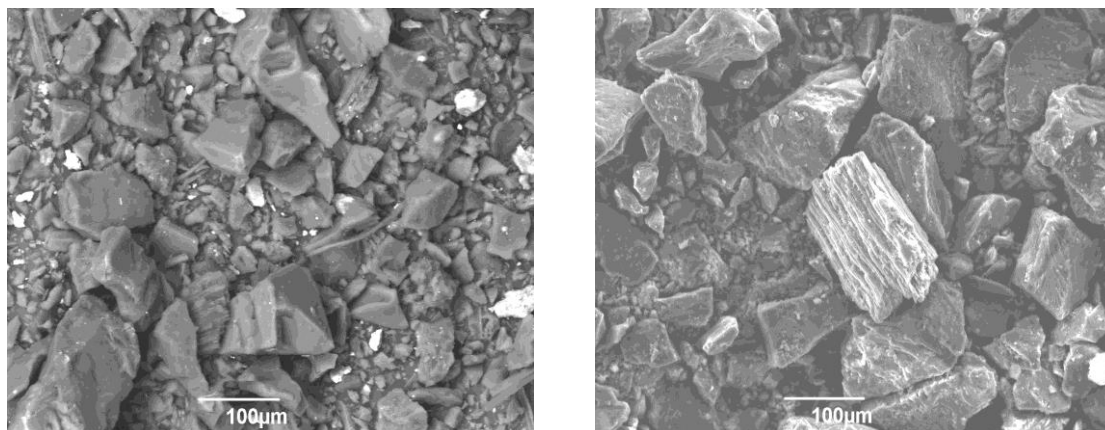


Рис. 3. Среднеарифметический диаметр частиц в составе аналитической пробы для углей ряда метаморфизма (а) и его зависимость от размолоспособности углей (индекс Хардгрова HGI) (б)

Fig. 3. The arithmetic mean diameter of particles in the composition of the analytical sample for coals of the metamorphism series (a) and its dependence on the grinding capacity of coals (Hardgrove index HGI) (b)

углей, что объясняется их повышенной механической прочностью [2, 4]. Таким образом, для большинства исследуемых углей более 70% частиц в составе аналитической пробы соответствует классу  $< 100$  мкм. Исключение составляет низкометаморфизованный уголь марки Д, у которого в составе пробы количество частиц крупностью  $> 100$  мкм составляет 63%.

Полученные результаты могут быть интерпретированы с точки зрения особенностей физико-химических свойств углей, которые в значительной мере определяются степенью их метаморфизма и петрографической неоднородностью. Известно, что сопротивление ударной нагрузке изменяется по кривой с минимумом в области среднеметаморфизованных углей [4], что наблюдается в ряду исследуемых образцов при оценке их размолоспособности (табл. 2). В нашем случае среднеарифметический диаметр частиц в аналитических пробах имеет зависимость, симбатную механической прочности углей (рис. 3 а) и антибатную их размолоспособности (табл. 2 и 3, рис. 3 б). Можно полагать, что минимальную прочность углям средней стадии метаморфизма обеспечивают структурно-химические особенности ОМУ – ослабление роли водородных и ковалентных связей и вместе с тем снижение межмолекулярных взаимодействий



а б  
 Рис. 4. Микрофотографии частиц блестящих (а) и полуматовых (б) углей Кузбасса  
 Fig. 4. Micrographs of particles of shiny (a) and semi-matt (b) coals of Kuzbass

в ОМУ; недостаточно развитая система сопряжения ароматических слоев; низкая пористость [2, 17-19]. В совокупности при механическом воздействии это способствует образованию широкого диапазона крупности частиц угля с преобладанием частиц мелкого размера.

Повышенная сопротивляемость измельчению низкометаморфизованных углей может быть обусловлена их способностью пластично деформироваться вследствие наличия в ОМУ протяженных углеводородных цепей, связывающих слабоконденсированные ароматические фрагменты, и больших расстояний между макромолекулами. Дополнительную стабильность структуре могут обеспечивать многочисленные полярные кислородсодержащие группы, образующие меж- и внутримолекулярные водородные связи [2, 17]. В свою очередь, повышающаяся механическая прочность у наиболее метаморфизованных углей обусловлена сближением межплоскостных расстояний и уплотнением конденсированных ароматических слоев в их структуре [2].

Образование большого количества мелких (< 10 мкм) и средних (10-50 мкм) классов крупности при измельчении полосчатых полуматовых углей балахонской серии, в отличие от блестящих углей марок Д, Г и Ж, объясняется их большей истираемостью при подготовке пробы вследствие шероховатости поверхности и образования сколов из-за различной твердости органических и минеральных составляющих [2-4, 11]. Вместе с тем при равномерном распределении фюзенированных компонентов среди органо-минеральной дюреновой массы (марка СС) прочность углей повышается и количество крупных классов в аналитической пробе возрастает (табл. 3).

Наглядно различия текстуры поверхности частиц блестящих и матовых углей представлены на рис. 4. Частицы блестящего витринитового угля отличаются четкими ромбовидными формами с резко очерченными гранями. У полуматового кларено-дюренового угля частицы имеют округленные края и шероховатую поверхность, обеспечивающую образование дополнительной мелочи при трении.

**Заключение.** Таким образом, в результате исследования дисперсного состава аналитической пробы углей крупностью < 200 мкм методом лазерной дифракции установлены особенности распределения частиц по размерам при подготовке пробы ручным способом в ступе. Показано, что функции распределения частиц существенным образом зависят от степени метаморфизма и петрографического состава углей и определяются их механической прочностью. Установлено, что использование ударного и истирающего воздействия при подготовке пробы способствует образованию большого количества мелочи (< 50 мкм) у среднеметаморфизованных углей и образованию повышенных количеств крупных классов (> 100 мкм) у низко- и высокометаморфизованных углей. Влияние петрографического состава зависит от количества гелефицированных или фюзенизированных компонентов и характера их распределения среди основной массы углей.

Полученные результаты могут быть полезны при оценке влияния фракционного состава тонкодисперсной угольной пыли на технологические процессы, связанные с ее участием – пробоподготовки, пылеподавления, фильтрации, флотации, сжигании топлива в пылеугольных топках, транспортировки и др. Исследование дисперсного состава угольных частиц в таких случаях необходимо проводить с использованием более прецизионных методов по сравнению со стандартным ситовым анализом.

*Авторы выражают благодарность за содействие в проведении эксперимента директору ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН к.ф.-м.н. Созинову С.А., вед. инж. Папиной Т.А.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авгушевич И. В., Сидорук Е. И., Броневец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификация углей. М. : Реклама мастер, 2018. 576 с.
2. Van Krevelen D. W. Coal: typology, physics, chemistry, constitution. Amsterdam; London; New York; Tokyo : Elsevier, 1993. 979 p.
3. Артемьев В. Б., Еремин И. В., Гагарин С. Г. Петрография углей и их эффективное использование. М. : Недра коммюникейшенс ЛТД, 2000. 334 с.
4. Агроскин А. А. Физика угля. М. : Недра, 1965. 352 с.
5. Журавлева Н. В., Потоккина Р. Р., Исмагилов З. Р. Определение гранулометрического состава угольных порошков методом лазерной дифракции // Химия твердого топлива. 2016. № 5. С. 56-62. doi: 10.7868/80023117716050108
6. Zhang R., Liu Sh., Zheng S. Characterization of nano-to-micron sized respirable coal dust: Particle surface alteration and the health impact // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 413. 125447. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125447
7. Liu Sh.-H., Cheng Ya.-F., Meng X.-R., Ma H.-H., Song Sh.-X., Liu W.-J., Shen Zh.-W. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 56. P. 444-450. doi: 10.1016/j.jlp.2018.10.005.
8. Min F., Chen J., Peng Ch., Chen Ch. Promotion of coal slime water sedimentation and filtration via hydrophobic coagulation // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2018. doi: 10.1080/19392699.2018.1535491.
9. Koval S., Krahenbuhl G., Warren K., O'Brien G. Optical microscopy as a new approach for characterising dust particulates in urban environment // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 223. pp. 196-202. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.038
10. Международный стандарт ISO 13320-1. Анализ размеров частиц, методы лазерной дифракции.
11. Арцер А. С., Протасов С. И. Угли Кузбасса: происхождение, качество, использование. Т. 1. Кемерово : изд-во КузГТУ, 1999. 177 с.
12. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М. : Мир, 1986. 660 с.
13. Патраков Ю. Ф., Семенова С. А. Исследование дисперсного состава угольной пыли методом лазерной дифракции // Горный журнал. 2020. № 4. С. 71-75. doi: 10.17580/gzh.2020.04.14
14. Атлас верхнепалеозойских углей Кузнецкого бассейна / Под ред. И. Н. Звонарева. Новосибирск: Наука, 1966. 367 с.
15. Фомин А. И., Ворошилов Я. С., Палеев Д. Ю. Исследование влияния угольной пыли на безопасность ведения горных работ // Горная промышленность. 2019. Т. 143. №1. С. 33-36. doi: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-33-36
16. Huang Q., Honaker R. Recent trends in rock dust modifications for improved dispersion and coal dust explosion mitigation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 2016. - Vol. 41. P. 121-128. doi: 10.1016/j.jlp.2016.03.009
17. Русьянова Н. Д. Углекимия. М.: Наука, 2000. – 315 с.
18. Радченко А. Г., Киселев Н. Н., Федотов С. М., Радченко А.А. Структурно-химические свойства углей в ряду метаморфизма и их выбросоопасность // Проблемы горного давления. 2020. Т. 38-39. № 1-2. С. 121-139.
19. Смирнов В. Г., Дырдин В. В., Манаков А. Ю., Федорова Н. И., Шикина Н. В., Исмагилов З. Р. Физико-химические и сорбционные свойства образцов природного угля различной степени метаморфизма // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 10. С. 1320-1332. doi: 10.1134/S0044461819100116

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Об авторах:

**Семенова Светлана Александровна**, Федеральный исследовательский центр Угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (Институт угля СО РАН) (650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10, Россия), кандидат технических наук, доцент, e-mail: semlight@mail.ru

**Патраков Юрий Федорович**, Федеральный исследовательский центр Угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (Институт угля СО РАН) (650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10, Россия), доктор технических наук, профессор, e-mail: yurat52@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Семенова С.А., - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Патраков Ю.Ф. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

### ESTIMATION OF THE DISPERSED COMPOSITION OF AN ANALYTICAL COAL SAMPLE BY LASER DIFFRACTION ANALYSIS

Svetlana A. Semenova,  
Yury F. Patrakov

Federal research center of coal and coal chemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of coal SB RAS)

\*for correspondence: semlight@mail.ru



#### Article info

Submitted:  
22 December 2021

Approved after reviewing:  
30 January 2022

Accepted for publication:  
25 February 2022

**Keywords:** coal, analytical sample, granulometric laser analysis, dispersed composition, metamorphism stage, petrographic composition.

#### Abstract.

The article describes the results of a study of the dispersed composition of particles in an analytical coal sample with a fraction  $< 200 \mu\text{m}$  obtained in laboratory conditions by manual grinding in a mortar. Samples of coals from the Kuzbass deposits of various stages of metamorphism and petrographic composition were used as objects of research. The study of the dispersed composition of the analytical sample of coals was carried out using a laser diffraction microanalyzer for automatic granulometric express analysis. The parameters of the dispersed composition of the sample are the average size of coal particles, the particle size distribution, the distribution density, the arithmetic mean diameter, the median, the magnitude and intensity of the modal values. Based on the results of the work, the influence of the distribution of petrographic components in the coal mass and the stage of metamorphism on the strength characteristics of coals and the fractional composition of the analytical sample is justified. It is shown that low-metamorphosed bright coals, along with highly metamorphosed ones, form an increased number of large particles ( $100\text{-}150 \mu\text{m}$ ) under impact and abrasion. Medium-metamorphosed semi-dull coals form a larger amount of fine dust ( $< 50 \mu\text{m}$ ) when crushed. Dull durain coals are more resistant to mechanical stress. The results obtained can be used to improve the technologies of coal mining, processing and processing associated with dust formation.

**For citation** Semenova S.A., Patrakov Yu.F. Estimation of the dispersed composition of an analytical coal sample by laser diffraction analysis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 1(149):64-73. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-1-64-73



## REFERENCES

1. Avgushevich IV, Sidoruk EI, Bronovec TM. *Standartnye metody ispytaniya uglej. Klassifikatsiya uglej* [Standard methods for testing coals. Classification of coals], Moscow, Reklama master, 2018, 576 p. [In Russ].
2. Van Krevelen DW. *Coal: typology, physics, chemistry, constitution*. Amsterdam, Lon-don, New York, Tokyo, Elsevier, 1993, 979 p.
3. Artem'ev VB., Eremin IV., Gagarin SG. *Petrografiya uglej i ih effektivnoe ispol'zovanie* [Petrography of coals and their efficient use], M.: Nedra kommyunikejshens LTD, 2000. 334 p. [In Russ].
4. Agroskin AA. *Fizika uglej* [Coal Physics], M.: Nedra, 1965, 352 p. [In Russ].
5. Zhuravleva NV, Potokina RR, Ismagilov ZR. *Opredelenie granulometricheskogo sostava ugol'nyh poroshkov metodom lazernoj difrakcii* [Determination of the granulometric composition of coal powders by laser diffraction]. *Himiya tverdogo topliva* 2016;5: 56-62. doi: 10.7868/80023117716050108 [In Russ].
6. Zhang R, Liu Sh, Zheng S. Characterization of nano-to-micron sized respirable coal dust: Particle surface alteration and the health impact. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;413: 125447. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125447
7. Liu Sh-H, Cheng Ya-F, Meng X-R, Ma H-H, Song Sh-X, Liu W-J, Shen Zh-W Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2018;56: 444-450. doi: 10.1016/j.jlp.2018.10.005.
8. Min F, Chen J, Peng Ch, Chen Ch. Promotion of coal slime water sedimentation and fil-tration via hydrophobic coagulation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Oct. 2018. doi: 10.1080/19392699.2018.1535491.
9. Koval S, Krahenbuhl G, Warren K, O'Brien G. Optical microscopy as a new approach for characterising dust particulates in urban environment. *Journal of Environmental Management*. 2018;223: 196-202. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.038.
10. *Mezhdunarodnyj standart ISO 13320-1. Analiz razmerov chastic, metody lazernoj difrakcii* [International standard ISO 13320-1. Particle size analysis, laser diffraction methods].
11. Arcer AS, Protasov SI. *Ugli Kuzbassa: proiskhozhdenie, kachestvo, ispol'zovanie* [Coals of Kuzbass: origin, quality, use], №. 1. Kemerovo : KuzGTU Publ., 1999. 177 p. [In Russ].
12. Boren K, Hafmen D. *Pogloshchenie i rasseyanie sveta malymi chasticami* [Absorption and scattering of light by small particles], M. : Mir, 1986. 660 p. [In Russ].
13. Patrakov YuF, Semenova SA. *Issledovanie dispersnogo sostava ugol'noj pyli metodom lazernoj difrakcii* [Investigation of the dispersed composition of coal dust by laser diffraction]. *Gornyj zhurnal*. 2020;4: 71-75. doi: 10.17580/gzh.2020.04.14. [In Russ].
14. Zvonarev IN. *Atlas verhnepaleozojskih uglej Kuzneckogo bassejna* [Atlas of upper paleozoic coals of the Kuznetsk basin], Novosibirsk : Nauka, 1966. 367 p. [In Russ].
15. Fomin AI, Voroshilov YaS, Paleev DYU. *Issledovanie vliyaniya ugol'noj pyli na bezopasnost' vedeniya gornyh rabot*. [Investigation of the influence of coal dust on the safety of mining operations]. *Gornaya promyshlennost'*. 2019;143(1):33-36. doi: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-33-36. [In Russ].
16. Huang Q, Honaker R. Recent trends in rock dust modifications for improved dispersion and coal dust explosion mitigation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2016;41:121-128. doi: 10.1016/j.jlp.2016.03.009.
17. Rus'yanova ND. *Uglekhimiya* [Coal chemistry], M. : Nauka, 2000, 315 p. [In Russ].
18. Radchenko AG, Kiselev NN, Fedotov SM, Radchenko AA. *Strukturno-himicheskie svoystva uglej v ryadu metamorfizma i ih vybrosoopasnost'* [Structural and chemical properties of coals in the series of metamorphism and their outburst hazard]. *Problemy gornogo davleniya*. 2020;38-39, (1-2): 121-139. [In Russ].
19. Smirnov VG, Dyrdin VV, Manakov AYU, Fedorova NI, Shikina NV, Ismagilov ZR. *Fiziko-himicheskie i sorbcionnye svoystva obrazcov prirodnoho uglya razlichnoj stepeni metamorfizma* [Physico-chemical and sorptive properties of natural coal samples of various degrees of metamorphism]. *Zhurnal prikladnoj himii*. 2019;92(10): 1320-1332. doi: 10.1134/S0044461819100116. [In Russ].

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Svetlana A. Semenova**, Federal research center of coal and coal chemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of coal SB RAS) (650065, Kemerovo, Leningradskiy Ave., 10, Russia), C. Sc. in Chemistry., Associate Professor, e-mail: semlight@mail.ru

**Yury F. Patrakov**, Federal research center of coal and coal chemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of coal SB RAS) (650065, Kemerovo, Leningradskiy Ave., 10, Russia), Dr. Sc. in Chemistry, Professor, e-mail: yupat52@gmail.com

*Contribution of the authors:*

Svetlana A. Semenova - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Yury F. Patrakov - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

*All authors have read and approved the final manuscript.*