

**Оригинальная статья**

УДК: 544.778.4:662.66

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-73-83

**ЗАВИСИМОСТЬ ЗОЛЬНОСТИ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА  
ОТ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА**

© 2026 г. Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин, А. Н. Заостровский

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 650000, Кемерово, пр. Советский, 18)

**Аннотация.** Дефицит традиционных коксующихся углей обуславливает необходимость вовлечения в состав коксовых шихт низко метаморфизованных углей марок ДГ, Г и Ж, технологические свойства которых существенно зависят от гранулометрического состава. В связи с этим исследование распределения зольности и выхода летучих веществ по фракциям различной дисперсности приобретает как фундаментальное, так и прикладное значение. Методом седиментации в жидкой среде из исходных угольных порошков выделены узкие фракции с преобладающим размером частиц от 0,5 до 5,0 мкм. Контроль гранулометрического состава осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии; зольность и выход летучих веществ определяли по стандартным методикам технического анализа. Установлено, что характер зависимости зольности от размера частиц определяется маркой угля. Для образцов ДГ и Г при уменьшении размера частиц менее 1 мкм наблюдается резкое увеличение зольности, обусловленное накоплением высокозольных минеральных компонентов в тонких классах. В отличие от них, у угля марки Ж зольность наиболее тонких фракций снижается, приближаясь к показателям исходного угля, что указывает на иной характер распределения минеральной массы. Показано, что седиментационное разделение позволяет снизить зольность высокозольного угля марки Г на 7 – 8 % за счет удаления тонких высокозольных фракций. Обоснована перспективность использования ультрадисперсной фракции угля марки Ж с размером частиц около 1 мкм в качестве компонента коксовой шихты, что позволяет регулировать ее состав без ухудшения зольности.

**Ключевые слова:** уголь, седиментация, технический анализ, выход летучих веществ, зольность углей

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (временный номер регистрации проекта № 1023032300042-4-1.4.3).

**Благодарность.** Исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

**Для цитирования:** Ковалев Р.Ю., Никитин А.П., Заостровский А.Н. Зависимость зольности углей различной степени метаморфизма от гранулометрического состава. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):73–83. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-73-83](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-73-83)

**Original article**

**DEPENDENCE OF THE ASH CONTENT OF COALS OF VARIOUS DEGREE OF  
METAMORPHISM ON THE GRANULOMETRIC COMPOSITION**

© 2026 R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin, A. N. Zaostrovsky

Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (18 Sovetsky Av., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

**Abstract.** The shortage of traditional coking coals necessitates the inclusion of low-metamorphosed coals of grades DG, G and Zh in the composition of coke charges, the technological properties of which significantly depend on the granulometric composition. In this regard, the study of the distribution of ash content and the yield of volatile substances by fractions of various dispersities acquires both fundamental and applied importance. By the method

of sedimentation in a liquid medium, narrow fractions with a predominant particle size from 0.5 to 5.0 microns were isolated from the initial coal grains. The granulometric composition was monitored by scanning electron microscopy; the ash content and yield of volatile substances were determined using standard technical analysis methods. It has been established that the nature of the dependence of ash content on particle size is determined by the brand of coal. For DH and G samples, with a decrease in particle size of less than 1 microns, there is a sharp increase in ash content due to the accumulation of high-ash mineral components in fine grades. In contrast, the ash content of the thinnest fractions of W grade coal decreases, approaching the indicators of the initial coal, which indicates a different nature of the distribution of mineral mass. It is shown that sedimentation separation reduces the ash content of high-ash grade G coal by 7 – 8 % due to the removal of fine high-ash fractions. The prospects of using an ultrafine fraction of W grade coal with a particle size of about 1 microns as a component of the coke charge are substantiated, which makes it possible to regulate its composition without deterioration of ash content.

**Keywords:** coal, sedimentation, technical analysis, volatile matter yield, ash content of coal

**Funding.** The work was carried out as part of the implementation of the state assignment of the ICCMS FRC CCC SB RAS (temporary registration number of the project No. 1023032300042-4-1.4.3).

**Acknowledgements.** The research was carried out on the equipment of the CCU of the FRC CCC SB RAS.

**For citation:** Kovalev R.Yu., Nikitin A.P., Zaostrovsky A.N. Dependence of the ash content of coals of varying degrees of metamorphism on the granulometric composition. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):73–83. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-73-83](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-73-83)

## Введение

Дефицит традиционного коксующегося сырья обуславливает необходимость включения в шихту коксования углей низкой и средней степени метаморфизма (марок ДГ, Г, Ж) [1; 2]. Ключевым фактором, влияющим на качество конечного продукта, является гранулометрический состав шихты. Исследования показывают неоднозначный эффект мелких фракций: с одной стороны, исключение класса 0 – 5 мм может повысить горячую прочность кокса (CSR) [3], с другой – увеличение содержания частиц 0 – 3 мм в шихте из углей марок Г, Ж, К до 85 % позволяет улучшить показатели дробимости  $M_{25} > 90$  % и истираемости  $M_{10} < 7$  % [1; 4]. Отсев наиболее мелкой фракции (менее 0,5 мм) даже на 4 % для шихт из углей марок ДГ и Д способствует росту величины  $M_{25}$  на 3 % и снижению параметра  $M_{10}$  на 2 % [5]. В связи с этим представляет интерес оценка перспектив использования ультрадисперсных фракций (менее 0,1 мм) неспекающихся углей марок ДГ и Г.

Однако применение тонких классов осложняется проблемой повышенной зольности. Многочисленные исследования, использующие как сухое [6; 8], так и мокрое [7; 9] разделение, демонстрируют закономерный рост зольности с уменьшением размера частиц. При измельчении угля до класса менее 0,05 мм зольность увеличивается на 2 % [6], а для фракций 0 – 0,5 мм, представляющих собой отходы обогащения, может достигать 71,9 % [7]. Аналогичная тенденция наблюдается для угля марки Г, где зольность возрастает с 8,6 для класса 0,5 – 1,0 мм до 31,2 % для частиц менее 0,05 мм [8].

Мокрое диспергирование углей марок Д и Г приводит к росту зольности с 15 до 80 % при переходе от класса 3 к 0 – 0,05 мм [9]. Более высокая зольность фракции после сухого размола более 6 мм по сравнению с классом менее 3 мм для шихт [10] указывает на необходимость детального изучения влияния размерного состава различных марок угля.

Процессы разделения тесно связаны с физико-химическими свойствами поверхности угольных частиц. Установлено, что в фракциях менее 0,04 мм преобладают частицы размером 18,9 – 23,78 мкм в зависимости от марки угля [11]. Эффективность разделения (расслоение в жидкой среде) существенно зависит от размера: доля оседающих частиц возрастает с 15 % для класса 20 – 40 мм до 75 % для класса 120 – 180 мм [12]. Важнейшую роль играет смачиваемость, определяющая ход процессов флотации, агломерации и сепарации [13]. Гидрофобность угля может снижаться для ультрадисперсных частиц из-за роста удельной поверхности [14]. С помощью модели жидкости Гершеля-Балкли в сочетании с параметром вязкости была выведена формула прогнозирования вязкости угольных суспензий, полученных путем растворения в воде угольных частиц различных размеров [15]. Установлено, что при различном соотношении крупных и мелких частиц угля в пульпе при определенной концентрации (58 %) существует минимальное значение вязкости угольной суспензии, при этом расчетное значение и максимальное отклонение от измеренного значения составляют 5,23 % [15]. В работе [16]

представлены результаты экспериментов по установлению влияния размера частиц на характеристики течения пылевидного угля. В качестве экспериментальных материалов использовали серию образцов пылевидного угля со средним размером частиц в диапазоне 18 – 224 мкм, энергия базовой текучести отражало взаимодействие частиц друг с другом в жидком потоке. Показано, что энергия базовой текучести увеличивается с повышением максимального размера частиц [16]. В работе [17] показано, что насыпная плотность и предел текучести водоугольной суспензии уменьшались с повышением максимального размера угольных частиц. В работе [18] установлено, что метод с использованием псевдооживленного слоя с плотной воздушной средой не подходит для обогащения угля размером менее 1 – 13 мм, поскольку эффективность разделения резко снижается при размере частиц угля менее 13 мм, процесс становится неэкономичным. В работе [19] показано, что кумулятивная функция распределения частиц углей повышается при увеличении размера угольных частиц и от скорости удара.

Особый интерес представляет влияние размера частиц на нагрев углей, при котором более мелкие частицы с большей вероятностью образывали частицы угольного остатка большего размера, чем они сами, а более крупные частицы угля имели большую склонность к фрагментации [20]. Однако для исследованных в настоящей работе размеров от 0,5 до 2,8 мм установлено, что поведение при пиролизе и газификации существенно не меняется в зависимости от размера частиц [20].

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью поиска компромисса между положительным влиянием мелких фракций на прочностные характеристики кокса и негативным на его зольность, а также потребностью в эффективных методах получения и сепарации ультрадисперсных классов угля.

Проведено исследование зависимости состава от размера частиц для углей марок ДГ, Г и Ж. Фракции различной дисперсности получали сухим (размол) и мокрым (седиментация) способами с последующим анализом зольности и выхода летучих веществ. Целью настоящей работы является установление закономерности изменения технического состава углей в зависимости от дисперсности их частиц и оценка перспективности метода седиментации для получения низкозольных тонких классов, пригодных для использования в коксовой шихте.

## Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали угли марок ДГ (Соколовское месторождение, ООО УК «Сибкоул»), Г (Ленинское месторождение, шахта «Заречная») и Ж (Никитинское месторождение, шахта им. С.Д. Тихова).

Первичное измельчение образцов проводили в шаровой мельнице Fritsch Pulverisette-6 с последующим фракционированием на виброситах для получения порошков с максимальным размером частиц 100 мкм. Такую фракцию подвергали доизмельчению аналогичным методом до максимального размера частиц 63 мкм. Полученные порошки характеризовались широким распределением частиц по размерам.

Для выделения узких фракций с более однородным гранулометрическим составом применяли методику седиментации в жидкой среде. Процедура включала следующие этапы:

1. Образец угля массой 10 г диспергировали в 100 мл дистиллированной воды. Для улучшения смачивания угля водой в систему вводили технический спирт (1 мл для углей марок ДГ и Г) или ацетон (0,5 мл для угля марки Ж). Суспензию обрабатывали в ультразвуковой ванне Сапфир в течение 20 мин.

2. Суспензию отстаивали в течение заданного времени (1 или 2 ч), в течение которого происходило осаждение крупных частиц под действием силы тяжести.

3. Верхний полупрозрачный слой, содержащий мелкие частицы, аккуратно отбирали пипеткой, переносили в чашки Петри и высушивали до постоянной массы при температуре 110 °С в течение 2 ч с последующей выдержкой на воздухе в течение 8 ч.

4. Процедуру (повторное диспергирование осадка, отстаивание и отбор верхнего слоя) повторяли до полного осветления жидкости для максимизации выхода целевой фракции. Ввиду малого выхода узких фракций (0,3 – 1,0 г на цикл, табл. 1, где  $d$  – размер частиц угля) циклы седиментации повторяли для накопления достаточной для анализа навески.

Размеры частиц в исходных порошках и выделенных узких фракциях контролировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6390 LV в ЦКП Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН. Для каждой фракции строили гистограммы распределения частиц по размерам, на основании которых определяли максимум распределения ( $d_{mi}$ ) и максимальный наблюдаемый размер частиц ( $d_{max}$ ). В качестве основного раз-

Т а б л и ц а 1

**Выходы узких фракций после седиментации различных марок углей**  
*Table 1. Outputs of narrow fractions after sedimentation of various coal grades*

Марка угля	Время седиментации, ч	Выход узкой фракции, г (%)
ДГ ( $d \leq 100$ мкм)	2	0,3 (3)
Г ( $d \leq 100$ мкм)	2	0,5 (5)
Ж ( $d \leq 100$ мкм)	2	1,0 (10)

Т а б л и ц а 2

**Гранулометрические характеристики узких фракций угля марки Ж**  
*Table 2. Granulometric characteristics of narrow fractions of Zh-grade coal*

Исходная фракция	Время седиментации, ч	$d_{md}$ , мкм	$d_{max}$ , мкм
$d \leq 100$ мкм	1	2,3	6
$d \leq 63$ мкм	2	0,5	5

мерного параметра ( $d_i$ ), используемого в дальнейшем для анализа, был принят максимум распределения  $d_{md}$ . Репрезентативные данные по фракциям угля марки Ж приведены в табл. 2.

Для всех полученных фракций определяли стандартные показатели качества: зольность ( $A^d$ ) по ГОСТ Р 55661 – 2013; влажность ( $W^a$ ) по ГОСТ Р 52911 – 2020; выход летучих веществ ( $V^{daf}$ ) по ГОСТ Р 55660 – 2013.

### Результаты и обсуждение

Применение метода седиментации позволило эффективно уменьшить максимальный размер частиц во всех исследуемых порошках. Увеличение времени отстаивания с 60 до 120 мин привело к закономерному снижению класса крупности получаемых фракций (табл. 3).

Наиболее выраженный эффект наблюдался для угля марки ДГ, где класс крупности уменьшился на порядок. Для углей марок Г и Ж (особенно для исходной фракции 0 – 63 мкм) увеличение времени седиментации свыше 60 мин не приводило к существенному дальнейшему уменьшению размера частиц (например, для угля марки Ж класс оставался 0 – 5 мкм). Это может быть обусловлено агрегацией мелких гидрофобных

частиц в водной среде или их адгезией к более крупным, что особенно характерно для угля марки Ж.

Данные СЭМ-анализа и построенные гистограммы распределения (рис. 1) количественно подтверждают эту тенденцию. Анализ зависимостей логарифма характерного ( $d_i$ ) и максимального ( $d_{max}$ ) размеров от времени седиментации (рис. 2) показывает их линейное уменьшение. При этом значимое снижение параметра  $d_i$  к 120-ой минуте отмечается для углей марок ДГ и Г, а существенное уменьшение параметра  $d_{max}$  – только для угля марки ДГ, что дополнительно свидетельствует о различном поведении частиц разных марок в процессе седиментации.

Ключевым результатом работы является установление неоднозначной зависимости зольности от размера частиц, которая существенно отличается для разных марок угля (рис. 3).

Для углей марок ДГ и Г наблюдается четкая тенденция к росту зольности при уменьшении размера частиц менее 1 мкм ( $\ln(d_i) < 0$ ), что объясняется концентрированием минеральных примесей в наиболее тонких фракциях [9]. Примечательно, что для угля марки Г размол исходной фракции  $d_i$  примерно от 100 до 63 мкм уже приводило к скачкообразному росту зольности с 29 до 38 %.

Т а б л и ц а 3

**Классы исходных углей и после седиментации**  
*Table 3. Classes of source coals and after sedimentation*

Марка угля	Класс исходного угля, мкм	Длительность седиментации, мин		Класс после седиментации угля, мкм
		60	120	
ДГ	0 – 100	60		0 – 5
		120		0 – 0,5
Г	0 – 100	60		0 – 8
		120		0 – 4
	0 – 63	60		0 – 5
		120		0 – 4,5
Ж	0 – 100	60		0 – 6
		120		0 – 5
	0 – 63	60		0 – 5

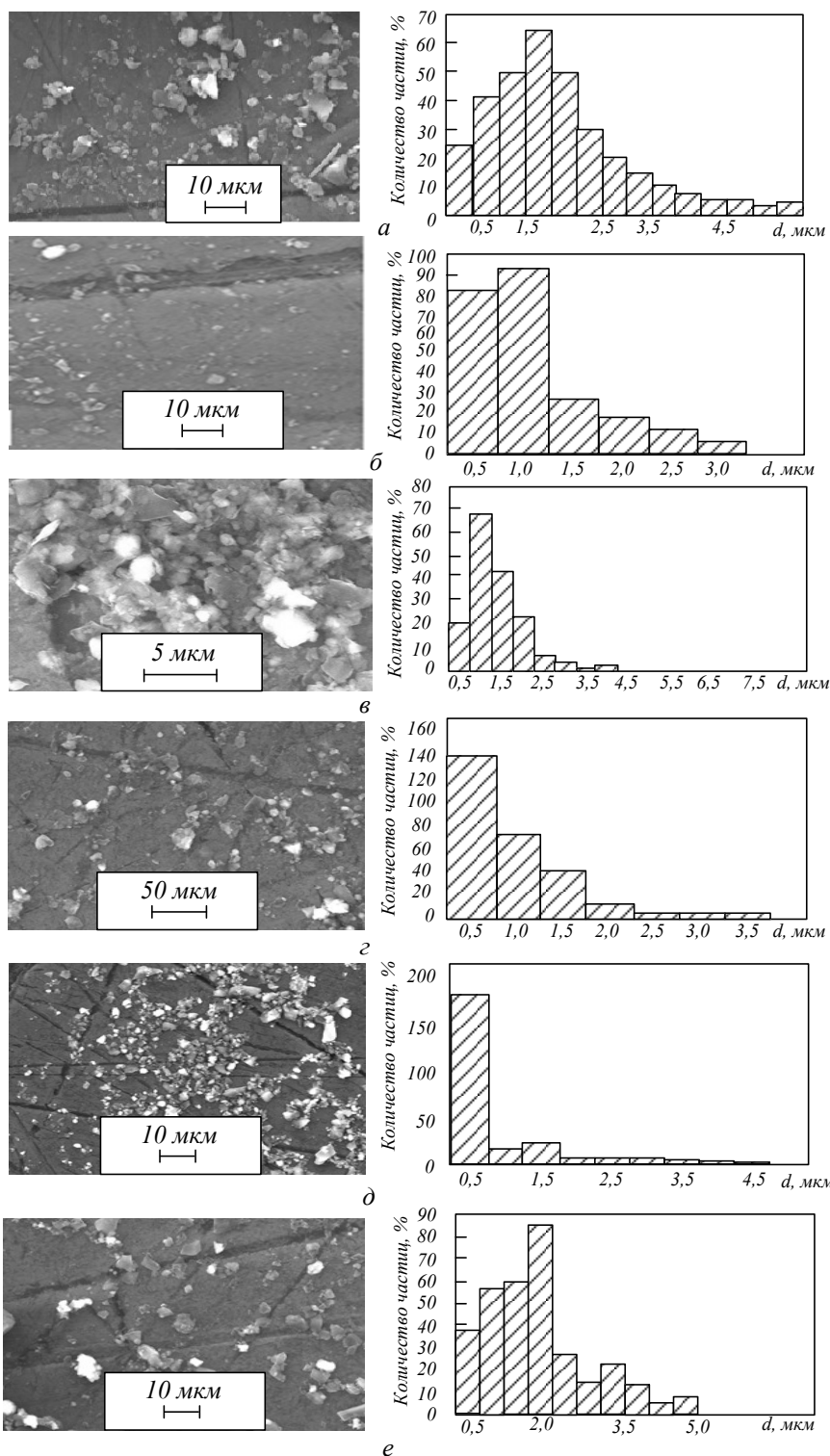


Рис. 1. Микрофотографии частиц угля и гистограммы распределения по размерам частиц:

*a* – уголь марки ДГ (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 60 мин; *б* – уголь марки ДГ (исходная фракция с размером частиц менее 63 мкм), седиментация 60 мин; *в* – уголь марки Г (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 60 мин; *з* – уголь марки Г (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 120 мин; *д* – уголь марки Г (исходная фракция с размером частиц менее 63 мкм), седиментация 120 мин; *е* – уголь марки Ж (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 120 мин

Fig. 1. Micrography of coal particles and histograms of particle size distribution:

*a* – DG grade coal (initial fraction with particle size less than 100 microns), sedimentation 60 min; *б* – DG grade coal (initial fraction with particle size less than 63 microns), sedimentation 60 min; *в* – G grade coal (initial fraction with particle size less than 100 microns), sedimentation 60 min; *з* – grade G coal (initial fraction with a particle size of less than 100 microns), sedimentation 120 min; *д* – grade G coal (initial fraction with a particle size of less than 63 microns), sedimentation 120 min; *е* – grade Zh coal (initial fraction with a particle size of less than 100 microns), sedimentation 120 min

Для угля марки Ж зависимость носит немонотонный характер. При уменьшении размера частиц от 63,0 до 2,5 мкм зольность возрастает на 2 %, однако при дальнейшем измельчении до частиц размером менее 1 мкм происходит ее снижение относительно исходной фракции 100 мкм.

Более детальный анализ (рис. 4) показывает, что эта закономерность также зависит от исходной дисперсности порошка.

Для угля марки Г ( $d_i \approx 100$  мкм) зольность стабильна (примерно 27 %) вплоть до 1 мкм, после чего резко возрастает до 43 %. Для фракции 63 мкм

наблюдается снижение зольности с 36 до 30 % в диапазоне 63 – 1 мкм с последующим ростом до 50 % при величине  $d_i$  менее 1 мкм.

Для угля марки Ж ( $d_i \approx 100$  мкм) отмечается слабый рост зольности с 8 до 10 % в интервале 100,0 – 2,5 мкм и ее снижение на 2 % для частиц менее 2 мкм. При этом для фракции  $d_i \approx 63$  мкм зольность практически не зависит от размера частиц.

Процесс седиментации является не только методом классификации, но и эффективным способом обогащения для высокозольных углей (табл. 4).

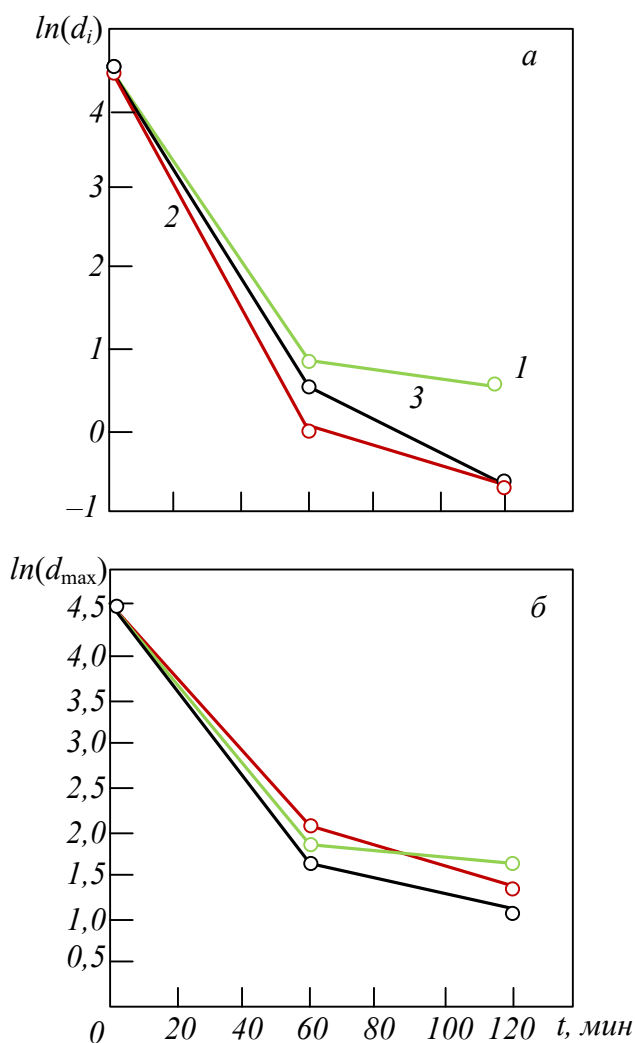


Рис. 2. Зависимость  $\ln(d_i)$  (а) и  $\ln(d_{\max})$  (б) от длительности седиментации для углей марок ДГ (1), Ж (2), Г (3)  
Fig. 2. Dependence of  $\ln(d_i)$  (a) and  $\ln(d_{\max})$  (б) on sedimentation duration for DG (1), Zh (2), G (3) coal grades

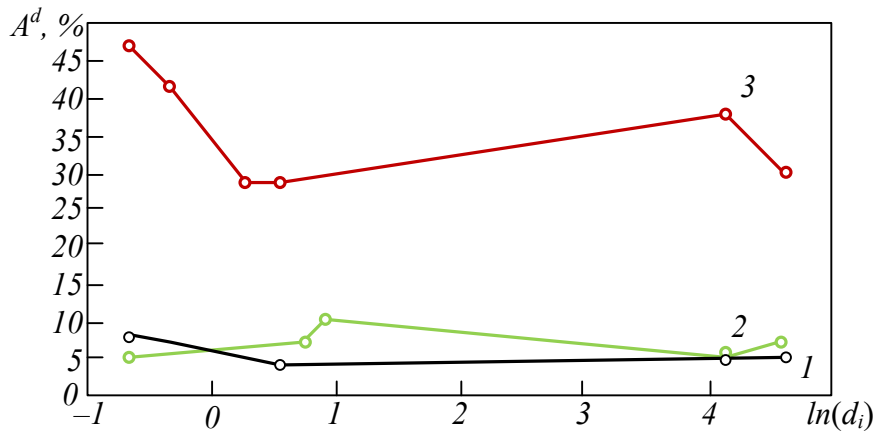


Рис. 3 Зависимость зольности от величины  $\ln(d_i)$  для угля марок ДГ (1), Ж (2), Г (3)  
 Fig. 3. Dependence of ash content on the logarithm of the  $\ln(d_i)$  for DG (1), Zh (2), G (3) coal grades

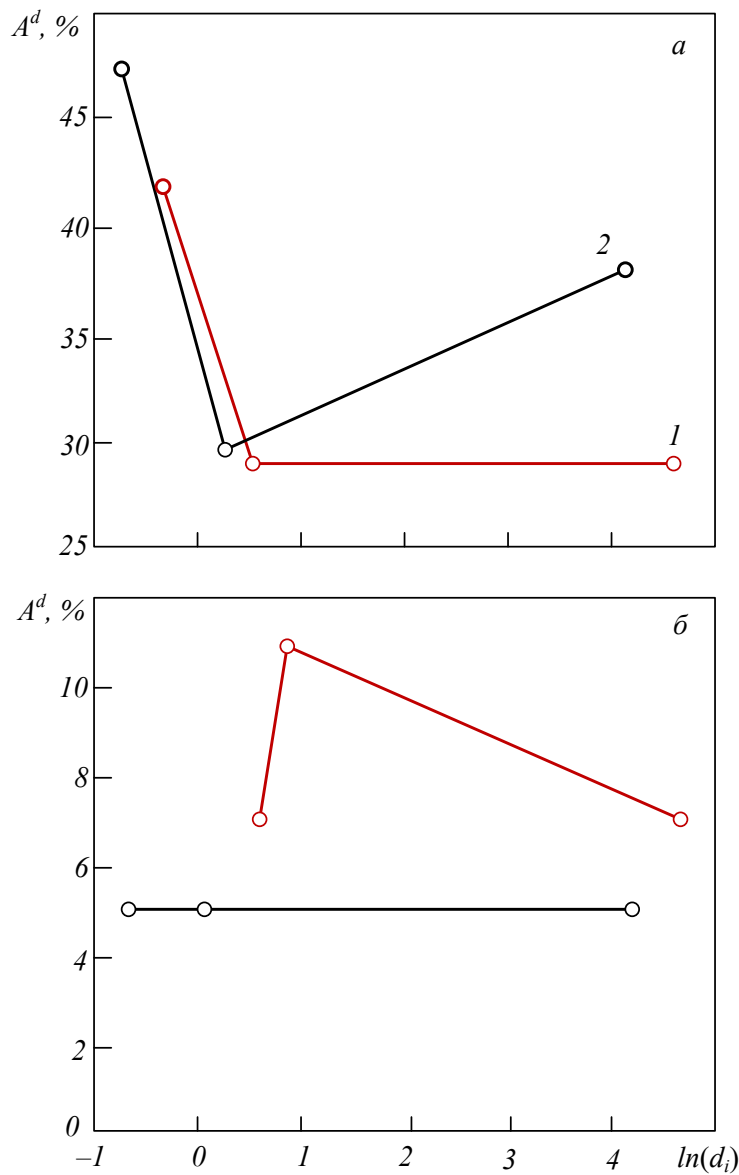


Рис. 4. Зависимость зольности угля марок Г (а) и Ж (б) от величины  $\ln(d_i)$ :  
 1 -  $d_i \approx 100$  мкм; 2 -  $d_i \approx 63$  мкм  
 Fig. 4. Dependence of the ash content of coal grades G (a) and Zh (b) on order  $\ln(d_i)$ :  
 1 -  $d_i \approx 100$  microns; 2 -  $d_i \approx 63$  microns

**Характеристики остатков седиментации угля марки Г**  
**Table 4. Characteristics of sedimentation residues of grade G coal**

Материал	$W^a$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %
Исходный, $d_i \approx 100$ мкм	3,0	29,0	35,1
Остаток после 1 ч седиментации	2,0	22,0	44,5
Остаток после 2 ч седиментации	2,0	21,0	43,8
Исходный, $d_i \approx 63$ мкм	3,0	38,4	38,0
Остаток после 2 ч седиментации	2,0	33,7	44,4

Седиментация позволила снизить зольность угля марки Г на 7 – 8 % для фракции  $d_i \approx 100$  мкм и примерно на 5 % для фракции  $d_i \approx 63$  мкм. Параллельно наблюдался рост выхода летучих веществ ( $V^{daf}$ ) с 35,1 до 44,0 – 47,0 % для фракции  $d_i \approx 100$  мкм, что свидетельствует о концентрировании органической массы угля в оседающих частицах. Для углей марок ДГ и Ж выход летучих веществ оставался постоянным (примерно 40 и 32 %) и не зависел от степени дисперсности. Влажность всех исследуемых углей также не демонстрировала значимых изменений.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение для составления коксовых шихт. Немонотонный характер изменения зольности для угля марки Ж, в частности ее снижение для ультрадисперсных частиц ( $d_i \approx 1$  мкм), указывает на перспективность использования рассматриваемой фракции в качестве добавки. Это позволяет решить две задачи: утилизировать мелкие классы и одновременно управлять зольностью шихты. Кроме того, подтверждена эффективность седиментации как простого гидромеханического метода снижения зольности труднообогатимого угля марки Г, что открывает путь к улучшению качества сырья для коксования.

### Выводы

Метод седиментации является эффективным инструментом для получения узких фракций из углей марок ДГ, Г и Ж. Увеличение времени седиментации закономерно снижает характерный размер ( $d_i$ ) частиц, достигая максимумов распределения порядка 0,5 – 1,0 мкм.

Влияние дисперсности на зольность существенно зависит от марки угля. Для углей марок ДГ и Г наблюдается четкая тенденция к значительному росту зольности при уменьшении размера частиц менее 1 мкм, что связано с концентрированием минеральных примесей в тончайших фракциях. Для угля марки Ж зависимость носит немонотонный характер: при уменьшении размера от 63,0 до 2,5 мкм зольность незначительно возрастает, однако для ультрадисперсных частиц ( $d_i < 1$  мкм) ее значение сопоставимо с исходным уровнем (примерно 8 %) и даже имеет тенденцию к снижению. Это указывает на принципиально иное

распределение минеральной составляющей в угле марки Ж.

Седиментация продемонстрировала потенциал как метод обогащения для высокозольных углей. В частности, для угля марки Г удалось снизить зольность на 7 – 8 % с одновременным ростом выхода летучих веществ, что свидетельствует о концентрировании органической массы.

На основе выявленных закономерностей определена перспектива практического применения: ультрадисперсная фракция угля марки Ж с размером частиц около 1 мкм может быть рекомендована в качестве добавки в коксовую шихту. Это позволяет не только утилизировать мелкие классы, но и управлять зольностью шихты без ее ухудшения. Метод седиментации является перспективным для предварительного снижения зольности труднообогатимых углей (например, марки Г).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинченко С.А., Давидзон А.Р., Казаков В.В., Мирошниченко Д.В., Сорокотяга К.Н., Борохович Д., Канунников И., Круш И. Совершенствование технологической схемы подготовки углей в условиях ПАО «ЯКХЗ». *Углехимический журнал*. 2013;6:20–28.
2. Miroshnichenko I.V., Miroshnichenko D.V., Shulga I.V., Balaeva Y.S., Pereima V.V. Calorific Value of Coke. 1. Prediction. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):143–149  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X19040057.2>
3. Karunova E.V., Kalko O.A., Sorokina I.V. Influence of the Granulometric Composition of Coking Batch on Coke Quality. *Coke and Chemistry*. 2025;68(2):91–95.  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X25600216>
4. Кривонос В.В., Данилов А.Б., Вердибоженко Г.С., Лозинский О.Б., Дроздник И.Д., Кафтан Ю.С., Бидоленко Н.Б., Сорокотяга К.Н. Оптимизация схемы подготовки и уровня измельчения групп углей и шихты в углеподготовительном цехе № 1 ПАО «Алечеевкокс». *Углехимический журнал*. 2013;1-2:15–22.
5. Пастернак А.А., Скрипченко Н.П., Косминский А.В., Дроздник И.Д., Мирошниченко Д.В., Сорокотяга К.Н. Совершенствование схемы подготовки углей в УПЦ-2 ПАО

- «АКХЗ». *Углехимический журнал*. 2013;5:14–22.
6. Fedorova N.I., Manina T.S., Ismagilov Z.R., Avid B. Composition and technological properties of coal from the Tavantolgoi deposit in Mongolia. *Solid Fuel Chemistry*. 2015;49(3):129–134.  
<https://doi.org/10.3103/S0361521915030064>
  7. Черкасова Т.Г., Баранцев Д.А. Распределение химических элементов в гранулометрических фракциях отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2023;4(23):26–40.  
<https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-26-40>
  8. Efimova O.S., Fedorova N.I., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Chemical and Granulometric Composition of Coal Dust of a Mine Degassing Plant. *Chemistry for Sustainable Development*. 2018;26(6):597–601.  
<https://doi.org/10.15372/CSD20180605>
  9. Мурко В.И., Заостровский А.Н. Выбор углей для приготовления водоугольных суспензий и закономерности формирования их структурно-реологических характеристик. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2001;5(24):49–54.
  10. Stepanov Y.V., Popova N.K., Shestoperova A.V., Gilyazetdinov R.R., Tsarev N.V. Effectiveness of selective crushing for coking batch. *Coke and Chemistry*. 2010;53(7):247–249.  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X10070021>
  11. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the Granulometric and Morphological Composition of Coal Powders. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021;29(5):525–535.  
<https://doi.org/10.15372/CSD2021330>
  12. Zhou R., He T., Liu Y., Mai P., Han G. Study on Coal Particle Properties and Critical Velocity Model in Coalbed Methane Horizontal Wells. *Processes*. 2025;13:1550.  
<https://doi.org/10.3390/pr13051550>
  13. Crawford R.J., Mainwaring D.E. The influence of surfactant adsorption on the surface characterisation of Australian coals. *Fuel*. 2001;80:313–320.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00110-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00110-1)
  14. Xia W., G. Xie G. Changes in the hydrophobicity of anthracite coals before and after high temperature heating process. *Powder Technology*. 2014;264:31–35.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.016>
  15. Zhao L., Jian C., Cai R., He P. Study of rheological parameters due to coal particle size change in pipeline transported coal slurry. *Scientific Reports*. 2024;14:29333.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-79696-2>
  16. Lu H., Guo X., Liu Y., Gong X. Effect of Particle Size on Flow Mode and Flow Characteristics of Pulverized Coal. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015;32:143–153.  
<https://doi.org/10.14356/kona.2015002>
  17. Liu Y., Guo X., Lu H., Gong X. An Investigation of the Effect of Particle Size on the Flow Behavior of Pulverized Coal. *Procedia Engineering*. 2015;102:698–713.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.170>
  18. Mohanta S., Meikap B. C. Influence of medium particle size on the separation performance of an air dense medium fluidized bed separator for coal cleaning. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;115:761–766.  
<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A13>
  19. Yang D., Li J., Du C., Zheng K., Liu S. Particle size distribution of coal and gangue after impact-crush separation. *Journal of Central South University*. 2017;24:1252–1262.  
<https://doi.org/10.1007/s11771-017-3529-2>
  20. Hanson S., Patrick J.W., Walker A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification. *Fuel*. 2002;81(5):531–537.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00153-3)

## REFERENCES

1. Zinchenko S.A., Davidzon A.R., Kazakov V.V., Miroshnichenko D.V., Sorokotyaga K.N., Borokhovich D., Kanunnikov I., Krush I. Improvement of the technological scheme for coal preparation at PJSC «YaKHZ». *Uglekhimicheskii zhurnal*. 2013;6:20–28. (In Russ.).
2. Miroshnichenko I.V., Miroshnichenko D.V., Shulga I.V., Balaeva Y.S., Pereima V.V. Calorific Value of Coke. 1. Prediction. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):143–149.  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X19040057.2>
3. Karunova E.V., Kalko O.A., Sorokina I.V. Influence of the Granulometric Composition of Coking Batch on Coke Quality. *Coke and Chemistry*. 2025;68(2):91–95.  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X25600216>
4. Krivonos V.V., Danilov A.B., Verdibozhenko G.S., Lozinskii O.B., Drozdник I.D., Kaftan Yu.S., Bidolenko N.B., Sorokotyaga K.N. Optimization of the Preparation Scheme and Grinding Level of Coal Groups and Blend in Coal Preparation Plant No. 1 at PJSC «Alecheevkoks». *Uglekhimicheskii zhurnal*. 2013;1-2:15–22.

5. Pasternak A.A., Skripchenko N.P., Kosminskii A.V., Drozdник I.D., Miroshnichenko D.V., Sorokotyaga K.N. Sovershenstvovanie skhemy podgotovki uglei v UPTS-2 PAO «AKKHZ». *Uglekhimicheskii zhurnal*. 2013;5:14–22.
6. Fedorova N.I., Manina T.S., Ismagilov Z.R., Avid B. Composition and technological properties of coal from the Tavantolgoi deposit in Mongolia. *Solid Fuel Chemistry*. 2015;49(3):129–134.  
<https://doi.org/10.3103/S0361521915030064>
7. Черкасова Т.Г., Баранцев Д.А. Распределение химических элементов в гранулометрических фракциях отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2023;4(23):26–40.  
<https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-26-40>
8. Efimova O.S., Fedorova N.I., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Chemical and Granulometric Composition of Coal Dust of a Mine Degassing Plant. *Chemistry for Sustainable Development*. 2018;26(6):597–601.  
<https://doi.org/10.15372/CSD20180605>
9. Мурко В.И., Заостровский А.Н. Выбор углей для приготовления водоугольных суспензий и закономерности формирования их структурно-реологических характеристик. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2001;5(24):49–54.
10. Stepanov Y.V., Popova N.K., Shestoperova A.V., Gilyazetdinov R.R., Tsarev N.V. Effectiveness of selective crushing for coking batch. *Coke and Chemistry*. 2010;53(7):247–249.  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X10070021>
11. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the Granulometric and Morphological Composition of Coal Powders. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021;29(5):525–535.  
<https://doi.org/10.15372/CSD2021330>
12. Zhou R., He T., Liu Y., Mai P., Han G. Study on Coal Particle Properties and Critical Velocity Model in Coalbed Methane Horizontal Wells. *Processes*. 2025;13:1550.  
<https://doi.org/10.3390/pr13051550>
13. Crawford R.J., Mainwaring D.E. The influence of surfactant adsorption on the surface characterisation of Australian coals. *Fuel*. 2001;80:313–320.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00110-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00110-1)
14. Xia W., G. Xie G. Changes in the hydrophobicity of anthracite coals before and after high temperature heating process. *Powder Technology*. 2014;264:31–35.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.016>
15. Zhao L., Jian C., Cai R., He P. Study of rheological parameters due to coal particle size change in pipeline transported coal slurry. *Scientific Reports*. 2024;14:29333.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-79696-2>
16. Lu H., Guo X., Liu Y., Gong X. Effect of Particle Size on Flow Mode and Flow Characteristics of Pulverized Coal. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015;32:143–153.  
<https://doi.org/10.14356/kona.2015002>
17. Liu Y., Guo X., Lu H., Gong X. An Investigation of the Effect of Particle Size on the Flow Behavior of Pulverized Coal. *Procedia Engineering*. 2015;102:698–713.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.170>
18. Mohanta S., Meikap B. C. Influence of medium particle size on the separation performance of an air dense medium fluidized bed separator for coal cleaning. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;115:761–766.  
<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A13>
19. Yang D., Li J., Du C., Zheng K., Liu S. Particle size distribution of coal and gangue after impact-crush separation. *Journal of Central South University*. 2017;24:1252–1262.  
<https://doi.org/10.1007/s11771-017-3529-2>
20. Hanson S., Patrick J.W., Walker A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification. *Fuel*. 2002;81(5):531–537.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00153-3)

#### Сведения об авторах:

**Родион Юрьевич Ковалев**, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

**E-mail:** kovaleviuhm@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0001-7776-7440

**SPIN-код:** 8244-8479

**Андрей Павлович Никитин**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

**E-mail:** nikitinandreyp@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0003-2187-2281

**SPIN-код:** 2980-7637

**Анатолий Николаевич Заостровский**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

**E-mail:** catalys01@rambler.ru

**ORCID:** 0000-0003-1761-7093

**SPIN-код:** 9749-0681

#### Information about the authors

**Rodion Yu. Kovalev**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS

**E-mail:** kovaleviuhm@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0001-7776-7440

**SPIN-код:** 8244-8479

**Andrey P. Nikitin**, Ph.D. (Phys.-Math.), senior researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS

**E-mail:** nikitinandreyp@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0003-2187-2281

**SPIN-cod:** 2980-7637

**Anatoly N. Zaostrovsky**, Cand. Sci. (Eng.), leading researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS

**E-mail:** catalys01@rambler.ru

**ORCID:** 0000-0003-1761-7093

**SPIN-cod:** 9749-0681

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 14.01.2026

После доработки 10.02.2026

Принята к публикации 01.03.2026

Received 14.01.2026

Revised 10.02.2026

Accepted 01.03.2026