

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
GEOTECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 662.749; 662.276; 539.217

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-161-170

КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПОР УГЛЕЙ**Воробьев Александр Егорович¹, Корчевский Александр Николаевич²,
Воробьев Кирилл Александрович³**¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова² Донецкий национальный технический университет³ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы

* для корреспонденции: fogel_al@mail.ru

Аннотация.

Представлена классификация и характеристика пор углей. Показаны различные типы пор и нанопор в углях. В исследованиях были применены современные технологии тестирования угольных пор, а также методы их классификации, позволяющие систематически обобщить и научно описать основные характеристики структуры угольных пор. Так, для изучения и описания качественно-количественной оценки сложной структуры пор угля были применены такие инновационные аналитические технологии, как оптическая и сканирующая электронная микроскопия (ОМ и СЭМ). Методы классификации пор в углях основывались на их подразделении по генетическому типу, размеру и морфологии. В соответствии с этой классификацией все угольные поры были подразделены на микропоры (<10 нм в диаметре), переходные поры (10-100 нм в диаметре), мезопоры (100-1000 нм в диаметре) и макропоры (>1000 нм в диаметре). По характеру взаимодействия с газами (и прежде всего с метаном) микропоры и переходные поры относятся к адсорбционным порам (<100 нм), которые являются основным пространством для адсорбции газа, а мезопоры и макропоры – к порам газового просачивания (> 100 нм). Объяснено влияние качества углей на их пористость. Дано распределение размеров пор различных образцов угля и изменение их объема в зависимости от марки угля. Описано влияние метаморфизма на развитие угольных пор. Было установлено, что метаморфизм, тектоническая деформация и имеющиеся мацералы являются основными внутренними факторами, влияющими на характеристики и показатели распределения угольных пор. Представлена зависимость между удельной площадью поверхности, пористостью, средним радиусом пор и маркой угля.

**Информация о статье**

Поступила:

04 сентября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

19 марта 2026 г.

Ключевые слова:уголь, пористость,
классификация пор, напоры,
распределение, параметры

Для цитирования: Воробьев А.Е., Корчевский А.Н., Воробьев К.А. Классификация и характеристика пор углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 1 (173). С. 161-170. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-161-170, EDN: PISFQA

Введение. Уголь как отдельный вид осадочной органической породы, образовавшейся в результате захоронения и накопления древних растительных остатков, претерпевших длительный период

геологических, физических и химических процессов их изменения, обычно содержит довольно сложную систему пор [2, 3, 9, 11, 13], с различным (от нанометров до миллиметров) распределением их диаметров.

Несмотря на то, что к настоящему времени было осуществлено довольно значительное количество высококачественных исследований ряда свойств и характеристик угля, все же пока еще не создано единой, стройной и всеобъемлющей концепции, полноценно описывающей формирование порового пространства (ее структуры, формы и размеров).

Цель исследования – осуществить классификацию и раскрыть характеристики пор углей, определить влияние качества углей на характеристики состояния пор.

Методы исследования. Уголь, как сложная пористая среда, доставляет при изучении характеристики его структуры пор из-за их неоднородности распределения размеров определенные трудности. Оценка и классификация этих пористых структур обычно требует использования нескольких аналитических методов (Рис. 1), потому что один метод не может в полной мере охватить весь спектр размеров имеющихся в угле пор. В исследованиях были применены современные технологии тестирования угольных пор, а также методы их классификации, позволяющие систематически обобщить и научно описать основные характеристики структуры угольных пор. Так, для изучения и описания качественно-количественной оценки сложной структуры пор угля были применены такие инновационные аналитические технологии, как оптическая и сканирующая электронная микроскопия (ОМ и

СЭМ). Эти методы особенно ценятся за их способность качественно-количественно определять распределение размеров пор в различных масштабах.

Общая классификация угольных пор. Размер поровых каналов углей в основном характеризуется их средним и срединным радиусом.

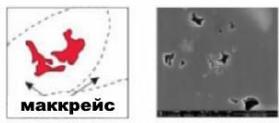
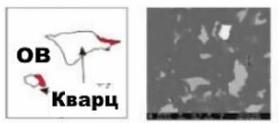
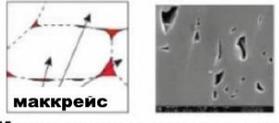
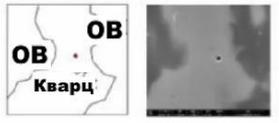
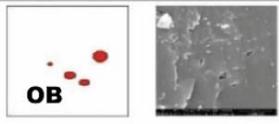
Методы классификации пор в углях основывались на их подразделении по генетическому типу, размеру и морфологии. В соответствии с этой классификацией все угольные поры были подразделены на микропоры (<10 нм в диаметре), переходные поры (10-100 нм в диаметре), мезопоры (100-1000 нм в диаметре) и макропоры (>1000 нм в диаметре). При этом по характеру взаимодействия с газами (и прежде всего с метаном) микропоры и переходные поры относятся к адсорбционным порам (<100 нм), которые являются основным пространством для адсорбции газа, а мезопоры и макропоры – к порам газового просачивания (> 100 нм).

В свою очередь, микропоры подразделяются на ультрамикропоры (< 0,7 нм) и супермикропоры (с диаметром 0,7–2,0 нм), причем поры размером диаметра менее 100 нм обычно определяются как нанопоры [1, 4, 10, 14-18]. Тип определенных экспериментально угольных пор в наномасштабе и их репрезентативные изображения показаны на Рис. 2. На основе имеющейся сложности



Рис. 1. Методы исследования порового пространства углей
Fig. 1. Methods for studying the porous space of coals

структуры угольных пор, включая разнообразие геометрии пор и структуру их сети, а также существующей в угле универсальности распределения пор по различным размерам и

	ОВ поры	Поры минеральной матрицы
Наномасштабные поры	 <p>Фитральные остаточные нанопоры</p>	 <p>Поры в минералогическом крае</p>
	 <p>Межчастичные нанопоры между микроскопическими органическими компонентами</p>	 <p>Внутризерновые поры кварца</p>
	 <p>Термические поры</p>	 <p>Состав межмелочатых пор</p>
Микротрещины	 <p>Микротрещины, образованные напряжением</p>	 <p>Микроструктуры, развитые вдоль минералов</p>

Резервуарное пространство в наномасштабе - ■

Рис. 2. Типы нанопор в антрацитовых углях: ОВ – органическое вещество
 Fig. 2. Types of nanopores in anthracite coals: OM – organic matter

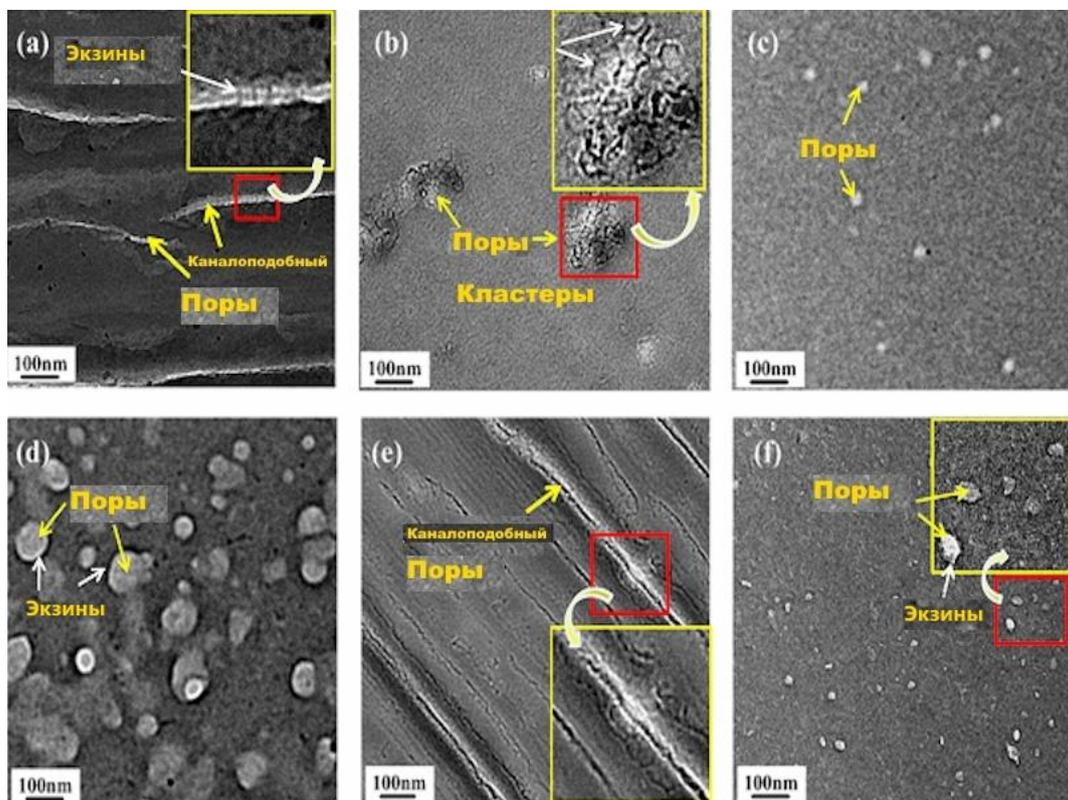


Рис. 3. Результаты наблюдений ТЭМ различных пор в образцах угля
 Fig. 3. Results of TEM observations of various pores in coal samples

формам все угольные поры классифицируются на отдельные типы, которые оказывают различное влияние на адсорбцию и просачивание газа в угольной матрице.

В связи с такой особенностью поры в угле подразделяются на проходные, взаимосвязанные, тупиковые и закрытые поры.

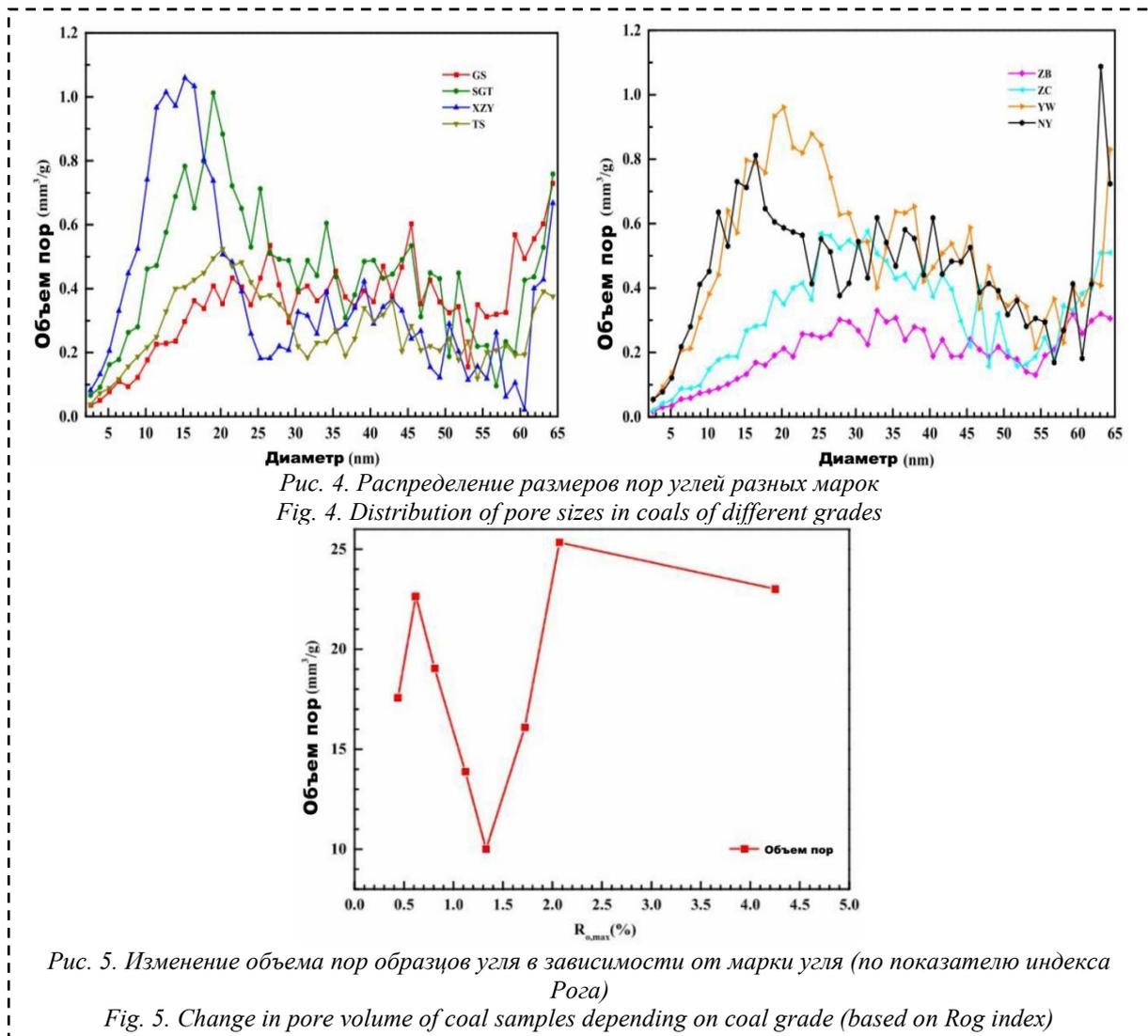
Кроме того, было установлено, что метаморфизм, тектоническая деформация и имеющиеся мацералы являются основными внутренними факторами, влияющими на характеристики и показатели распределения угольных пор. Среди всех известных факторов, влияющих на развитие угольных пор, метаморфизм является основным фактором контроля этого процесса. Это обусловлено тем, что на относительно высокой стадии метаморфизма разложение органического вещества в углях высвобождает значительное количество газа, формирующего при миграции различные каналы.

Когда образующийся газ накапливается до определенного количества, он прорывает существующие структурные ограничения

угольной матрицы и высвобождается из угольного тела, что способствует образованию некоторых воздушных полостей в угольной матрице.

Углефикация органического вещества (ОВ) приводит к регулярному изменению нанопор угля, а механизм их эволюции, по существу, контролируется изменением молекулярной структуры угля. При этом эволюция структуры пор во время углефикации должна сопровождаться изменением имевшихся характеристик открытых и закрытых пор.

Влияние качества углей на их пористость. Угли отдельных рангов имеют различные характеристики пористости, возникающие из-за различных величин литостатического давления, тектонизма и степени метаморфизма. Так, в частности, на ранних стадиях углефикации (обычно соответствующих средним максимальным значениям отражательной способности витринита R_o , макс < 0,65%), ароматический слой угля мал и распределен практически беспорядочно. Поры в таких углях развиваются в каждом масштабе размерности.



Так, во время стадий высоколетучего битуминозного угля и среднелетучего битуминозного угля ($R_{o, макс} = 0,65-1,2\%$) с увеличением марки угля и под воздействием механического уплотнения и дегидратации объем пор уменьшается (особенно мезопор и макропор). На стадии битуминозного угля с низким содержанием летучих веществ ($R_{o, макс} = 1,3-1,7\%$) гелеобразование гуминовых веществ завершает дегидратацию и уплотнение, и содержание микропор еще больше снижается. В течение всей стадии формирования угля высокого ранга ($R_{o, макс} > 1,9\%$) ароматические кольца имеют направленное выравнивание, образуя ряд микропор (в основном межмолекулярных). Поэтому высокосортовый уголь имеет более сложную и гораздо изменчивую структуру пор, с меньшим их размером и более низкой проницаемостью.

Таким образом, качественно-количественные характеристики пор угля во многом зависят от содержания в нем угольных мацералов и непосредственно марки угля. Так, в частности, результаты осуществленных лабораторных исследований показывают, что распределение пор горловины витрена имеет выраженную положительную асимметрию. Кроме того, в ходе

осуществленных лабораторных исследований было установлено, что средний размер пор низкосортного угля несколько больше, чем у высокосортного угля, а с увеличением ранга угля количество межмолекулярных пор существенно уменьшается.

Осуществленное исследование показывает, что в разных углях различные основные типы пор доминируют в каждом диапазоне размеров резервуарного пространства угля. В частности, как показано на Рис. 3, все поры в углях пространственно разделены и попадают в диапазон размеров мезопор (с однородным размером 20 нм).

Увеличенные вставки с желтой границей представляют собой ограниченные красным области на изображениях ТЭМ. На панелях **a** и **e** наблюдаются поры в виде каналов.

Некоторые небольшие эскизы также можно найти в порах, похожих на каналы, на панели **a**. Кластеры пор на панели **b** в основном состоят из мезопор диаметром 20 нм. Также можно наблюдать черные эскизы пор. Поры, представленные на панели **c**, являются сферическими порами с тусклыми эскизами. Относительно более крупные поры и эскизы более четко показаны на панели **d**. Панель **f**

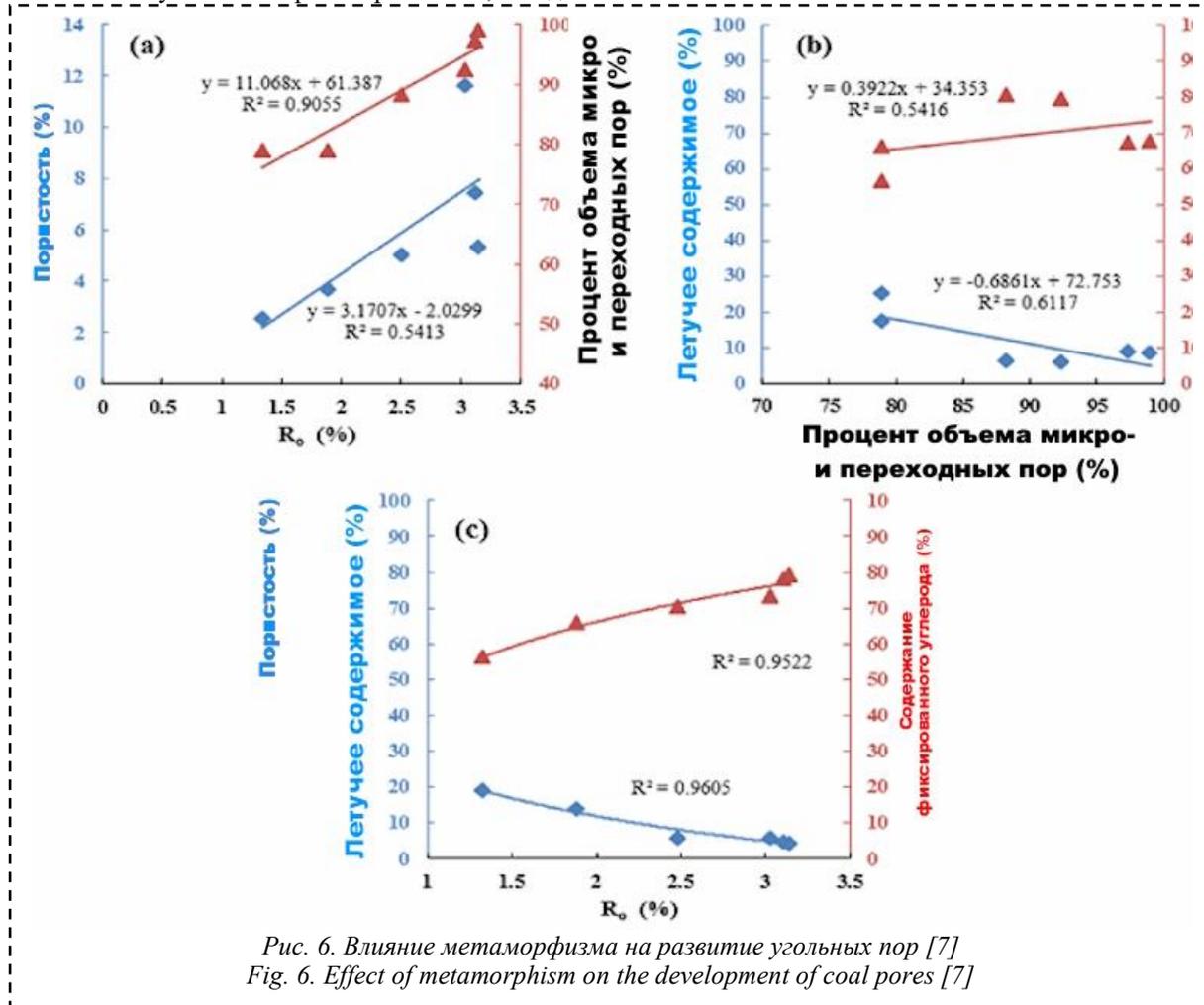


Рис. 6. Влияние метаморфизма на развитие угольных пор [7]
 Fig. 6. Effect of metamorphism on the development of coal pores [7]

представляет поры неправильной формы.

Распределение размеров пор различных образцов угля представлено на Рис. 4. Так, в диапазоне 2–65 нм все образцы угля демонстрируют распределение размеров пор, но между ними имеются определенные различия в этом распределении [5]. Так, для пор диаметром менее 20 нм образцы SGT (битуминозный уголь C), XZY (битуминозный уголь C), YW (битуминозный уголь A), NY (антрацит) имеют несколько больший объем пор.

Кроме того, было установлено, что с изменением степени метаморфизма углей общий объем пор угля сначала увеличивается (Рис. 5), затем уменьшается, затем вновь увеличивается и уменьшается.

Объем пор образца GS (лигнит) с самой низкой степенью метаморфизма составляет 17,587 мм³/г, а образца SGT (битуминозный уголь C) – 22,654 мм³/г [5, 12, 16]. Уменьшающаяся тенденция к объему пор наблюдается от образца SGT (битуминозный уголь C) к образцу ZB (битуминозный уголь B). Объем пор образца ZB (битуминозный уголь B) составляет 9,996 мм³/г, что является наименьшим объемом пор среди рассматриваемых восьми образцов угля. Для углей с более высокой степенью метаморфизма объем пор образца YW (битуминозный уголь A) составляет 25,334 мм³/г, что является наибольшим объемом пор среди рассматриваемых восьми образцов угля. Для образца NY (антрацит) объем пор немного ниже

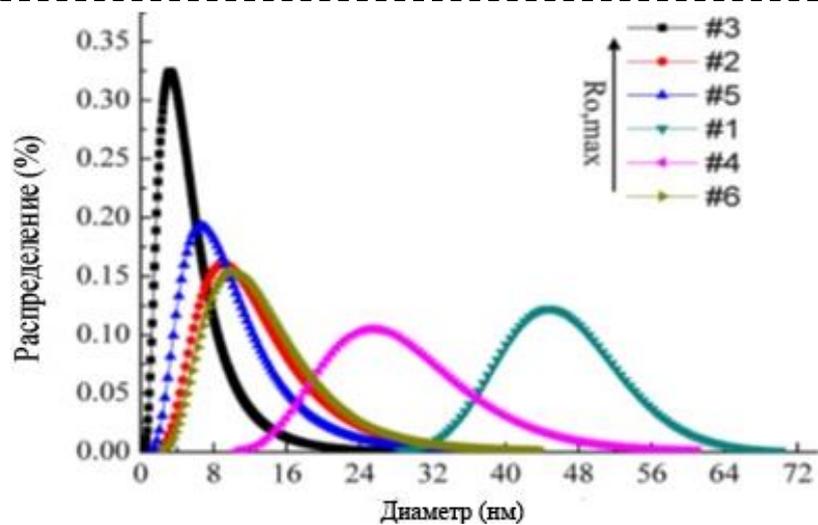


Рис. 7. Распределение размеров пор образцов угля [8]

Fig. 7. Distribution of pore sizes in coal samples [8]

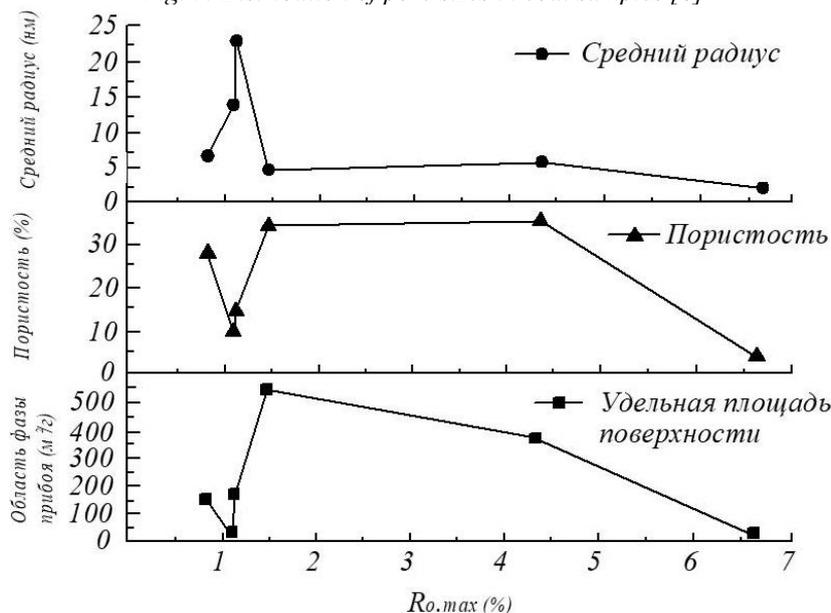


Рис. 8. Зависимость между удельной площадью поверхности, пористостью, средним радиусом пор и маркой угля [8]

Fig. 8. Relationship between specific surface area, porosity, average pore radius, and coal grade [8]

и составляет 23,015 мм³/г.

Как показано на Рис. 6а, с увеличением отражательной способности витринита (Ro), процент объема микро- и переходных пор увеличивается, что предопределено тем, что обычно объем пор каждого уровня размера уменьшается с увеличением степени метаморфизма угля.

При этом с увеличением Ro пористость образцов угля также увеличивается (см. Рис. 6а).

Необходимо также отметить, что хотя большинство размеров пор исследуемых образцов угля количественно распределяется от 1 до 10 нм, однако, антрацит (образец 2) с Ro, макс = 4,329% имеет относительно более широкое распределение размеров пор, варьирующееся от 2 до 43 нм [8, 10, 17, 18]. Распределение диаметров пор каждого образца угля в области от 2 до 20 нм представляет собой явление их распределения с одним пиком [6], которое указывает на то, что главный пик в основном составляет около 2–5 нм (Рис. 7).

При этом пиковое значение образцов угля 1–4 появляется около показателя, количественно равного по значению 4 нм, и оба конца пикового значения резко падают, указывая на то, что при этом распределение диаметра пор наиболее концентрировано. Полученная кривая имеет плоский тренд в количественном диапазоне от 5 до 20 нм, указывая на то, что в этом диапазоне находится значительное количество микро- и переходных пор [6], а распределение их диаметров достаточно сильно однородно, но при этом нет особенно концентрированного распределения пор.

Еще одно пиковое значение для образца угля 5 появляется при 2 нм, что указывает на то, что распределение диаметров пор наиболее сконцентрировано при их диаметре размерностью 2 нм. Кривые на обоих концах пикового значения плавно снижаются, а непосредственно пиковое значение с увеличением диаметра пор до 20 нм, также постепенно уменьшается, что указывает на то, что микропоры и переходные поры при 2–20 нм составляли большую часть образца угля 5.

Для высоколетучих битуминозных углей А радиус пор увеличивается с увеличением показателя Ro, макс, достигая максимального значения 23,1 нм (при Ro, макс = 1,115%).

Результаты исследований показали, что объемы микропор и мезопор и удельные площади поверхности положительно коррелируют с уменьшением размера частиц угля. Так, меньший размер пор угля приводит к появлению большей удельной площади поверхности и более богатой адсорбции газа. На Рис. 8 средний радиус пор, удельная площадь поверхности и пористость представлены в виде функции Ro, макс. При этом удельная площадь

поверхности угля достигает значений от 26,34 м²/г и до максимального значения 550,85 м²/г.

Малолетучий каменный уголь (образец 5) с Ro, макс = 1,454% имеет диапазон пор от 1 до 38 нм, а большинство размеров его пор находится в пределах от 3 до 16 нм. Для высоколетучих битуминозных углей А (образцы 1, 4 и 6) размеры пор увеличиваются с уменьшением метаморфической степени угля. При этом распределение пор образцов 1, 4 и 6 попадает в размерные окна 29.70, 10.60 и 2.44 нм. Следовательно, размер пор такого угля с увеличением степени метаморфизма имеет явно выраженную тенденцию к уменьшению.

Заключение. Все угольные поры в зависимости от мацеральности и степени метаморфизма и деформации делятся на четыре основных типа, включая первичные поры, метаморфические поры, эпигенетические поры и минеральные поры, а также на несколько второстепенных типов разделения пор по наноразмерам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. Е. Характеристика особенностей нанокристаллитов углей // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VIII Международной научно-практической конференции. Белово. Изд-во филиала КузГТУ. Велико Тырново. Болгария. 2015. С. 14-17.
2. Воробьев А. Е. [и др.] Основные закономерности изменения свойств углей // Материалы международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». Москва (Россия) – Котону (Бенин). М., РУДН. 2010. С. 304-306.
3. Воробьев А. Е., Комащенко В. И., Дребенштедт К., Зубков В. Г. [и др.] Уголь: процессы глобализации и национальная безопасность. М.: МИИР, 2006. 264 с.
4. Воробьев А. Е., Лоцев Г. В. Особенности наноминералогии углей // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2015. Т. 15. № 9. С. 165-167.
5. Liu T., Zhao Y., Noraei Danesh N. The characteristics of closed pores in coals with different ranks // Front. Earth Sci. 9:785913. 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.785913.
6. Minbo Zhang, Zhen Zhang, Danguy Zhang, Delong Zou, Jinlei Du. Study on pore and fissure structure characteristics of deep soft coal rock // Hindawi Geofluids. 2021. Article ID 1475926. 13 p. DOI: 10.1155/2021/1475926.
7. Shuang Wu, Dazhen Tang, Song Li, Yanjun Meng, Wenji Lin. Evaluation of pore development in different coal reservoirs based on centrifugation experiment // Journal of Petroleum Science and Engineering 157. 2017. Pp. 1095-1105.

8. Yixin Zhao, Shimin Liu, Derek Elsworth, Yaodong Jiang and Jie Zhu. Pore structure characterization of coal by synchrotron small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy // ACS publication: Energy Fuels 28. 2014. DOI: 10.1021/ef500487d/ Pp. 3704-3711.

9. Барабанщикова В. В., Лобанова Е. А., Чернышева Н. А. Классификация и квалификация пор в углях. Екатеринбург : УрО РАН, 2019. 186 с.

10. Воронин Ю. А., Воробьев А. Е., Мальшев А. Н. Микроструктура и пористость углей. Новосибирск : Наука, 2015. 240 с.

11. Ивченко В. Н., Семенов Ю. И. Современные представления о структуре пор в углях. Кемерово : КемГУ, 2018. 136 с.

12. Курилов А. В., Чухланцева Е. Я. Моделирование структуры пор в углях. Иркутск : ИГХ СО РАН, 2019. 144 с.

13. Морозов В. И., Герасимов В. С. Макро- и микроуровневая структура пор в углях. Воронеж : ВГУ, 2018. 176 с.

14. Сидоров А. П., Новикова Т. В. Основы квалификаций пор углей. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2019. 112 с.

15. Виноградова Л. Н., Иванова Е. М. Структурная классификация пор углей // Вопросы химии и химической технологии. 2018. № 1. С. 12-20.

16. Гончарова А. С., Мирошниченко А. Л. Проблемы классификации пор в углях // Российский журнал прикладной химии. 2019. Том 92. № 1. С. 54-62.

17. Денисов С. Б., Зайцев В. Н. Современные подходы к классификации пор в углях* // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Энергетика. 2015. № 1. С. 43-54.

18. Куликова О. А., Смирнов Н. Н. Классификации пор в углях: сравнительный анализ отечественных и зарубежных подходов // Российские нанотехнологии. 2019. Том 14. № 1-2. С. 12-20.

© 2026 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:

Воробьев Александр Егорович, доктор техн. наук, профессор кафедры гидравлики, ГГНТУ, e-mail: fogel_al@mail.ru

Корчевский Александр Николаевич, кандидат техн. наук, зав. кафедрой ОПИ, ДонНТУ, e-mail: korchevskiyal@mail.ru

Воробьев Кирилл Александрович, магистр, старший преподаватель, РУДН, e-mail: k.vorobyev98@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Воробьев Александр Егорович – формулировка задач исследования, концептуализация исследования, выполнение задач научного менеджмента, написание текста.

Корчевский Александр Николаевич – формулировка выводов по результатам исследований, выполнение задач научного менеджмента, обзор литературы, написание текста.

Воробьев Кирилл Александрович – сбор и анализ данных, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

CLASSIFICATION AND CHARACTERISTICS OF COAL PORES

Aleksandr E. Vorob'yov¹, Aleksandr N. Korchevskiy²,
Kirill A. Vorob'ev³

¹ Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov

² Donetsk National Technical University

³ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

* for correspondence: fogel_al@mail.ru



Abstract.

The paper presents a classification and characterization of coal pores.

Article info

Received:

04 September 2025

Accepted for publication:

15 January 2026

Accepted:

12 February 2026

Published:

19 March 2026

Keywords: coal, porosity, pore classification, pressures, distribution, parameters

Various types of pores and nanopores in coals are shown. The study utilized modern coal pore testing technologies and classification methods to systematically summarize and scientifically describe the main characteristics of coal pore structure. Thus, innovative analytical technologies such as optical and scanning electron microscopy (OM and SEM) were used to study and describe the qualitative and quantitative assessment of the complex coal pore structure. The coal pore classification methods were based on their division by genetic type, size, and morphology. According to this classification, all coal pores were divided into micropores (<10 nm in diameter), transitional pores (10-100 nm in diameter), mesopores (100-1000 nm in diameter), and macropores (>1000 nm in diameter). Based on the nature of their interaction with gases (primarily methane), micropores and transition pores are classified as adsorption pores (<100 nm), which are the primary space for gas adsorption, while mesopores and macropores are classified as gas permeation pores (>100 nm). The influence of coal quality on porosity is explained. The pore size distribution for various coal samples and the change in pore volume depending on coal grade are presented. The influence of metamorphism on the development of coal pores is described. It was established that metamorphism, tectonic deformation, and existing macerals are the main internal factors influencing the characteristics and distribution parameters of coal pores. The relationship between specific surface area, porosity, average pore radius, and coal grade is presented.

For citation: Vorob'yov A.E., Korchevskiy A.N., Vorob'ev K.A. Classification and characteristics of coal pores. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 1(173):161-170. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-161-170, EDN: IISFQA

REFERENCES

1. Vorobyev A.E. Characteristics of nanocrystallites of coals / Innovations in Technologies and Education: Collection of articles of participants of the VIII International Scientific-Practical Conference. Belovo. Publishing house of KuzGTU branch. Veliko Tarnovo. Bulgaria. 2015. Pp. 14-17.
2. Vorobyev A.E. [et al.] Main regularities of changes in properties of coals / Materials of the international conference "Resource-reproducing, low-waste and environmental protection technologies for subsoil exploitation". Moscow (Russia) – Cotonou (Benin). Moscow, PFUR. 2010. Pp. 304-306.
3. Vorobyev A.E., Komashchenko V.I., Drebenstedt K., Zubkov V.G. et al.] Coal: Globalization Processes and National Security. Moscow: MIIR Publ.; 2006. 264 p.
4. Vorobyev A.E., Lotsev G.V. Features of nano-mineralogy of coals. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavonic University*. 2015; 15(9):165-167.
5. Liu T., Zhao Y., Noraei Danesh N. The characteristics of closed pores in coals with different ranks. *Frontiers in Earth Science*. 2021; 9:785913. DOI: 10.3389/feart.2021.785913.
6. Minbo Zhang, Zhen Zhang, Dangyu Zhang, Delong Zou, Jinlei Du. Study on pore and fissure structure characteristics of deep soft coal rock / Hindawi Geofluids. 2021, Article ID 1475926, 13 p. DOI: 10.1155/2021/1475926.
7. Shuang Wu, Dazhen Tang, Song Li, Yanjun Meng, Wenji Lin. Evaluation of pore development in different coal reservoirs based on centrifugation experiment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017; 157:1095-1105.
8. Yixin Zhao, Shimin Liu, Derek Elsworth, Yaodong Jiang, Jie Zhu. Pore structure characterization of coal by synchrotron small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy. *ACS Publications: Energy & Fuels*. 2014; 28:3704-3711. DOI: 10.1021/ef500487d.
9. Barabanschikova V.V., Lobanova E.A., Chernysheva N.A. Klassifikatsiya i kvalifikatsiya por v ugliah. Jekaterinburg: UrO RAN; 2019. 186 s.
10. Voronin Ju.A., Vorobjov A.E., Malyshev A.N. Mikrostruktura i poristost' uglej. Novosibirsk: Nauka; 2015. 240 s.
11. Ivchenko V.N., Semenov Ju.I. Sovremennye predstavleniya o strukture por v ugljakh. Kemerovo: KemGU; 2018. 136 s.
12. Kurilov A.V., Chukhlanceva E.Ja. Modelirovanie struktury por v ugljakh. Irkutsk: IGKh SO RAN; 2019. 144 s.
13. Morozov V.I., Gerasimov V.S. Makro- i mikrourovnevaja struktura por v ugljakh. Voronezh: VGU; 2018. 176 s.
14. Sidorov A.P., Novikova T.V. Osnovy kvalifikatsij por uglej. Krasnojarsk: Sibirskij federal'nyj universitet; 2019. 112 s.
15. Vinogradova L.N., Ivanova E.M. Strukturnaja klassifikatsiya por uglej. *Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii*. 2018. № 1. S. 12-20.
16. Goncharova A.S., Miroshnicenko A.L. Problemy klassifikatsii por v ugljakh. *Rossijskij zhurnal prikladnoj himii*. 2019; 92(1):54-62.

17. Denisov S.B., Zaicev V.N. Sovremennye podhody k klassifikatsii por v ugljakh. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. N.E. Baumana. Serija: Ehnergetika. 2015; 1:43-54.

18. Kulikova O.A., Smirnov N.N. Klassifikatsii por v ugljakh: sravnitel'nyj analiz otechestvennyh i zarubezhnyh podhodov. *Rossijskie nanotehnologii*. 2019; 14(1-2):12-20.

© 2025 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:

Aleksandr E. Vorob'yov, D.Sc. in Engineering, Professor, GSOTU, e-mail: fogel_al@mail.ru

Aleksandr N. Korchevskiyi, C.Sc. in Engineering, Head of Department, Ass. Professor, DonNTU, e-mail: korchevskiyal@mail.ru

Kirill A. Vorob'ev, Master, Senior Lecturer, PFUR, e-mail: k.vorobyev98@mail.ru

Contribution of the authors:

Aleksandr E. Vorob'yov – formulation of research objectives, conceptualization of research, fulfillment of scientific management tasks, writing a text.

Aleksandr N. Korchevskiyi – formulation of conclusions based on research results, fulfillment of scientific management tasks, literature review, writing a text.

Kirill A. Vorob'ev – data collection and analysis, writing text.

All authors have read and approved the final manuscript .

