

ОХРАНА ТРУДА, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ (НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ)/LABOR PROTECTION, INDUSTRIAL SAFETY, SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS (SUBSOIL USE)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.69>

О ВЛИЯНИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ И МИКРОПОР НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШАХТОПЛАСТОВ

Научная статья

Филатьева Э.Н.¹, Филатьев М.В.^{2,*}, Максьюк И.К.³, Голдованский А.В.⁴, Рожков И.Н.⁵¹ ORCID : 0000-0002-1041-0535;² ORCID : 0000-0001-5608-6737;³ ORCID : 0000-0002-0096-7372;⁴ ORCID : 0009-0004-3334-5352;^{1, 2, 3, 4, 5} Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mfilatev[at]gmail.com)

Аннотация

Установлена теснота корреляционной связи объема фильтрационных пор ископаемых углей для шахтопластов Донецкого и Львовско-Волинского бассейнов со степенью их метаморфических преобразований. Исследование предусматривает статистическую обработку методом наименьших квадратов значений общей пористости, микропор и объема фильтрационных пор, и установления их эмпирических зависимостей от выхода летучих веществ. Сравнение показателей тесноты корреляционных связей эмпирических кривых с экспериментально определенными значениями объемов пор позволяет установить стадии формирования разных видов пор. На основании статистической обработки получены эмпирические зависимости показателей объема общей пористости, микропор и фильтрационных пор от степени метаморфических преобразований шахтопластов. Установлены примерно равные соотношения между средними значениями объемов фильтрационных пор и микропор для всей совокупности из 776 шахтопластов. При этом диапазоны изменения микропор значительно уже фильтрационных, что свидетельствует о сугубо индивидуальном соотношении между объемами фильтрационных пор и микропорами, независимо от степени метаморфических преобразований конкретного шахтопласта. Микропоры определяют возможность нахождения метана, в основном, сорбированном состоянии, а фильтрационные — в свободном. Соотношение этих форм нахождения метана в угле, в большей степени, по сравнению с метаморфическими преобразованиями шахтопластов, характеризуют, очевидно, их склонность к проявлению газодинамических явлений. На основании статистической обработки экспериментальных доказано формирование микропор, в основном на стадии метаморфических преобразований шахтопластов. Результаты исследований позволяют разработать предложения по усовершенствованию нормативной базы в части прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ.

Ключевые слова: уголь, объем, микропоры, фильтрационные поры, метаморфизм, шахтопласты, горные работы, безопасность, нормативная база, усовершенствование.

ON THE INFLUENCE OF FILTRATION AND MICROPORES ON THE GAS-DYNAMIC PROPERTIES OF COAL SEAMS

Research article

Filatieva E.N.¹, Filatiev M.V.^{2,*}, Maksyuk I.K.³, Goldovanskii A.V.⁴, Rozhkov I.N.⁵¹ ORCID : 0000-0002-1041-0535;² ORCID : 0000-0001-5608-6737;³ ORCID : 0000-0002-0096-7372;⁴ ORCID : 0009-0004-3334-5352;^{1, 2, 3, 4, 5} Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Russian Federation

* Corresponding author (mfilatev[at]gmail.com)

Abstract

A close correlation has been established between the volume of filtration pores in fossil coals from the Donetsk and Lviv-Volyn basins and the degree of their metamorphic transformation. The study involves statistical processing using the least squares method of the values of total porosity, micropores and filtration pore volume, and determining their empirical dependencies on the yield of volatile substances. A comparison of the indicators of the closeness of the correlation relationships of empirical curves with experimentally determined values of pore volumes allows the stages of development of different types of pores to be identified. Based on statistical processing, empirical dependencies of the indicators of total porosity, micropores and filtration pores on the degree of metamorphic transformation of mine seams were obtained. Approximately equal ratios between the average values of filtration pore and micropore volumes were established for the entire set of 776 mine strata. At the same time, the ranges of variation in micropores are significantly narrower than those in filtration pores, which indicates a highly individual relationship between the volumes of filtration pores and micropores, regardless of the degree of metamorphic transformation of a particular coal seam. Micropores determine the possibility of finding methane mainly in a sorbed state, while filtration pores determine the possibility of finding methane in a free state. The ratio of these forms of methane occurrence in coal, to a greater extent than metamorphic transformations of mine strata, obviously

characterises their tendency to manifest gas-dynamic phenomena. Based on statistical processing of experimental data, the formation of micropores has been proven, mainly at the stage of metamorphic transformations of mine strata. The research results allow to develop proposals for improving the regulatory framework in terms of predicting the hazardous properties of coal seams during mining operations.

Keywords: coal, volume, micropores, filtration pores, metamorphism, coal seams, mining operations, safety, regulatory framework, improvement.

Введение

Пористость горных пород, в том числе и ископаемых углей, характеризуется наличием в них пустот. Благодаря пористости горные породы могут вмещать (за счет капиллярных сил) жидкости и газы [1]. Различают три вида пористости: общую (физическую), открытую и эффективную.

Общая пористость это суммарный объем сообщающихся и изолированных пор. Она включает поры различных радиусов, форм и степени сообщаемости. Открытая пористость — объем сообщающихся между собой пор, которые заполняются жидким или газообразным флюидом при насыщении породы в вакууме. Она меньше общей пористости на объем изолированных пор. Эффективная пористость характеризует часть объема, которая занята подвижным флюидом. Она меньше открытой пористости на объем связанных (остаточных) флюидов [1].

Установлено [2], что определение полного объема пористости ископаемых углей с использованием действительной (d_r^d) и кажущейся (d_a^r) плотности [3] могут приводить к ошибкам порядка 100–200%. Такие погрешности, по мнению авторов [2], обусловлены пренебрежением наличия объема закрытых пор. При составлении каталога шахтопластов коллекторских свойств каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов [4] фильтрационный объем угля определялся по разности между величинами общего (P_r) и сорбционного объема микропор (W_o). При этом общий объем пор P_r был определен двумя методами. В одном случае для совокупности из 186 шахтопластов использовалось эмпирическое уравнение зависимости P_r от выхода летучих веществ при термическом разложении углей без доступа воздуха (V^{daf}):

$$P'_{r(p)} = 0,114 - 0,006V^{daf} + 0,00013 (V^{daf})^2 \quad (1)$$

Для второй части шахтопластов из 590 совокупностей значения P_r были рассчитаны исходя из величин действительной (d_r^d) и кажущейся (d_a^r) плотности, установленных экспериментально стандартными методами [3]:

$$P_r = \frac{d_r^d - d_a^r}{d_r^d \cdot d_a^r} \quad (2)$$

В обоих рассматриваемых случаях при определении значений общей пористости согласно уравнениям 1 и 2 [4] не учитывалось наличие закрытых пор. Погрешность такого расчета P_r в этом случае может составлять 100–200% [2]. Исходя из возможной погрешности определения общего объема пор P_r , погрешности определения объема фильтрационных пор P_ϕ , при использовании уравнения 3 [4], будут аналогичными.

$$P_\phi = P_r - W_o \quad (3)$$

Точность определения фильтрационного объема пор имеет важное практическое значение, так как она касается проблем безопасной отработки газоносных угольных шахтопластов, склонных к проявлению внезапных выбросов угля и газа.

При составлении каталога [4] предполагалась зависимость объема фильтрационных пор углей от степени метаморфических преобразований шахтопластов. В качестве показателя степени таких преобразований принят выход летучих веществ при термическом разложении углей без доступа воздуха (V^{daf}). Этот же показатель является одним из основных критериев установления склонности шахтопластов к проявлению газодинамических явлений согласно нормативным документам по безопасному ведению горных работ [5], [6], [7].

Установленные значения общей пористости P_r и объема микропор W_o (сорбционного объема угля) позволили [4] рассчитать согласно уравнению 3 объем фильтрационных пор для каждого шахтопласта. Объем микропор W_o определялся исходя из экспериментальных изотерм сорбции метана с применением математического аппарата теории объемного заполнения микропор, разработанного академиком М.М. Дубининым [6].

Наличие экспериментальных значений V^{daf} позволяет оценить тесноту корреляционных зависимостей показателей пористости P_r , W_o и P_ϕ от степени метаморфических преобразований шахтопластов. Подтверждение или опровержение такой зависимости позволит установить причастность метаморфических процессов к формированию фильтрационных и сорбционных пор и, в конечном итоге, к проявлению внезапных выбросов угля и газа.

Цели и методы исследования

Цель исследования — установить тесноту корреляционной связи объема фильтрационных пор для каменноугольных и антрацитовых шахтопластов P_ϕ , рассчитанных согласно уравнению 3 по разности между объемами общих P_r и сорбционных W_o пор, в зависимости от степени метаморфических преобразований углей (показателя V^{daf}).

Методика исследований предусматривает для совокупности из 590 шахтопластов статистическую обработку методом наименьших квадратов значений общей пористости P_r (уравнение 2) и установление эмпирической их зависимости от выхода летучих веществ (V^{daf}). Сравнение показателей тесноты корреляционных связей эмпирической кривой (уравнение 1) с экспериментально определенными значениями P_r для совокупности из 590 шахтопластов позволяет оценить точность расчетов согласно этому уравнению.

Эмпирическая зависимость сорбционного объема микропор (W_o) от выхода летучих веществ (V^{daf}) определена методом наименьших квадратов для всей совокупности из 776 шахтопластов.

Эмпирическую кривую и тесноту корреляционных связей объёма фильтрационных пор P_f , рассчитанных по разнице P_r и W_0 (уравнение 3), устанавливали методом наименьших квадратов.

Основные результаты и обсуждения

Результаты статистической обработки зависимости значений объёма общих пор P_r , рассчитанных согласно уравнению 2 для совокупности из 590 шахтопластов от V^{daf} , приведена на графике (рис. 1, кривая 1).

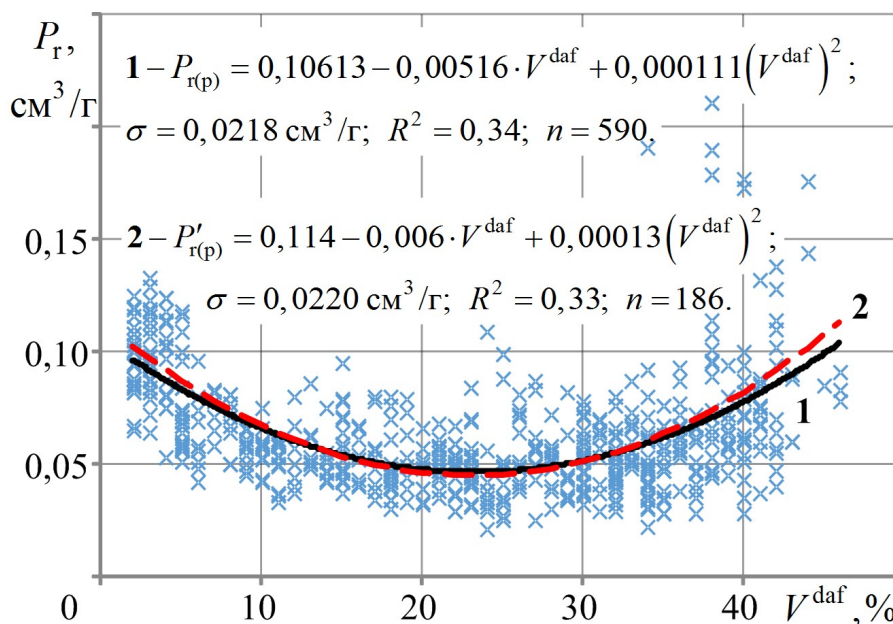


Рисунок 1 - Зависимость значений объёма общей пористости углей (P_r) для совокупности из 590 шахтопластов от выхода летучих веществ (V^{daf})

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.69.1>

Примечание: \times – значения общей пористости P_r , определенные согласно уравнению 2; 1 – эмпирическая усредняющая кривая полинома степени второго порядка, полученная методом наименьших квадратов для совокупности из 590 шахтопластов; 2 – эмпирическая зависимость (уравнение 1), используемая в каталоге [4] при расчете значений для 186 шахтопластов; σ – среднеквадратические отклонения; R^2 – коэффициенты детерминации; n – количество обработанных пар данных

Значения P_r были рассчитаны [4] согласно уравнению 2 с использованием экспериментально определенных действительной (d_r^d) и кажущейся (d_a^r) плотности, установленных в соответствии с требованиями стандарта [3].

Незначительная величина коэффициента детерминации ($R^2=0,34$) и существенное значение среднеквадратического отклонения ($\sigma=0,0218 \text{ см}^3/\text{г}$) свидетельствуют о практическом отсутствии корреляционной зависимости объёма общей пористости от выхода летучих веществ для совокупности из 590 шахтопластов.

Аналогичными корреляционными показателями (рис. 1, кривая 2, $R^2=0,33$; $\sigma=0,0220 \text{ см}^3/\text{г}$) характеризуется и эмпирическая зависимость (уравнение 1), используемое в каталоге [4] при определении для совокупности из 186 шахтопластов. Это подтверждает практическое отсутствие или незначительную корреляционную зависимость общей пористости от выхода летучих веществ для всей совокупности из 776 шахтопластов. Существенное среднеквадратическое отклонение от усредняющих кривых (1, 2) значений объёмов общей пористости (соответственно 0,0218 и 0,0220 $\text{см}^3/\text{г}$) не исключают возможную погрешность ее определения 100–200%, установленную [2].

Для совокупности из 776 шахтопластов установлена тесная корреляционная зависимость объёма микропор W_0 от выхода летучих веществ V^{daf} (рис. 2).

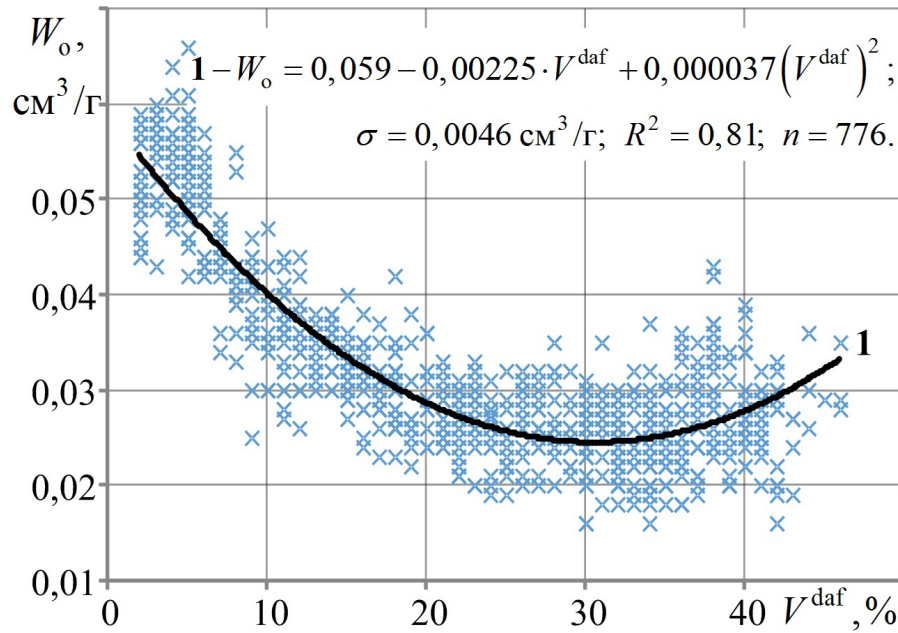


Рисунок 2 - Зависимость объёма микропор углей (W_o) от выхода летучих веществ (V^{daf}), экспериментально определенных [4] для шахтопластов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.69.2>

Примечание: \times – экспериментальные данные [4]; 1 – усредняющая кривая; σ – среднее квадратическое отклонение; R^2 – коэффициент детерминации; n – количество обработанных пар данных

Она характеризуется высокими значениями коэффициента детерминации ($R^2=0,81$) и относительно низким среднее квадратическим отклонением ($\sigma=0,0046 \text{ см}^3/\text{г}$). Это свидетельствует о преимущественном формировании микропор на стадии метаморфических преобразований шахтопластов.

Практическое отсутствие корреляционной зависимости объёма общих пор от выхода летучих веществ (рис. 1) и высокая корреляционная связь объёма микропор (рис. 2) повлияли на значения показателей тесноты корреляционной связи объёма фильтрационных пор от степени метаморфических преобразований шахтопластов (рис. 3).

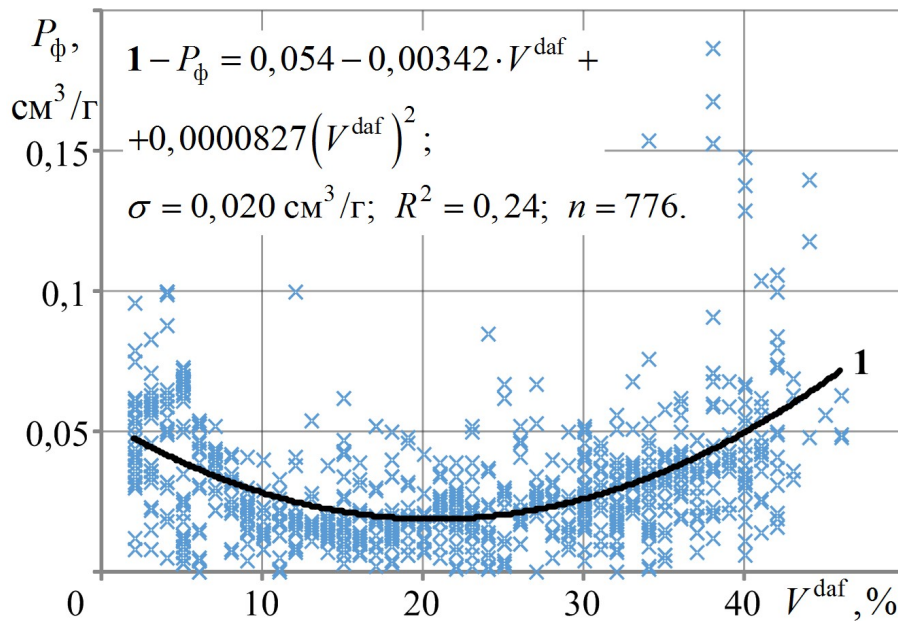


Рисунок 3 - Зависимость объёма фильтрационных пор (P_ϕ) от выхода летучих веществ (V^{daf}), согласно данным каталога [4]
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.69.3>

Примечание: \times – значения P_{ϕ} , рассчитанные по уравнению 3 [4]; 1 – усредняющая кривая; σ – среднеквадратическое отклонение; R^2 – коэффициент детерминации; n – количество обработанных пар данных

Низкие показатели корреляционной связи значений объёма фильтрационных пор P_{ϕ} от степени метаморфических преобразований шахтопластов (рис. 3, кривая 1, $R^2=0,24$; $\sigma=0,020$ см³/г) обусловлены, в первую очередь, их расчетом с использованием уравнения 3. Согласно ему соотношения между объёмами общих, фильтрационных и микропор соблюдаются только для средних их значений (табл. 1). Погрешность определения средних значений пор согласно уравнению 3 составляет около 3%. Такая, допустимая для инженерных расчетов погрешность, не соблюдается для индивидуальных значений P_{ϕ} конкретно рассматриваемого шахтопласта. Это следует из отсутствия четких границ между диапазонами изменения объёмов разных видов пор (табл. 1).

Таблица 1 - Сведения об объёме пор ископаемых углей шахтопластов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.69.4>

Вид объёма пор	Кол-во шахтопластов	Числовые значение объёма пор, см ³ /г	
		Диапазон изменения	Среднее значение
Общая пористость	776	0,021÷0,211	0,065
Микропоры	776	0,016÷0,066	0,034
Фильтрационные поры	776	0,000÷0,187	0,033

Примечание: источник [4]

Деление объёмов пор, принятое при составлении каталога [4] на фильтрационные и микропоры, является условным и приблизительным. Большое разнообразие пор, отличающихся по размерам, форме, взаимному расположению и характеру взаимодействия различных реагентов со стенками пор требует их классификации [9]. Единой классификации пористой структуры углей нет. Большинство исследователей пользуются классификацией академика М.М. Дубинина, предложенной для пористых сорбентов [8]. Она основана на различном механизме сорбционных процессов в порах, которые разделены по размерам на макропоры с эффективными радиусами входных отверстий больше $1 \div 2 \cdot 10^3$ Å, переходные поры с эффективными радиусами входных отверстий от $1 \div 2 \cdot 10^3$ Å до $15 \div 16$ Å. Исходя из такой градации пор по эффективным радиусам входных отверстий также не наблюдаются четкие границы между возможными диапазонами их значений.

Поры с диаметром более 10^5 Å условно относят к макропорам, а поры с диаметром более 10^4 Å предложено классифицировать по их генезису [9]. Различают также эндогенные, экзогенные и гипергенные трещины. Ходот В.В. дополнил классификацию пор, положив в основу их фильтрационные свойства [10]. Зависимость объёма фильтрационных пор от метаморфических преобразований шахтопластов не подтвердилась тесной корреляционной связью по результатам статистической обработки (рис. 3). Изменение объёма микропор размером менее 30 Å установлено на всех стадиях метаморфических преобразований шахтопластов (рис. 4).

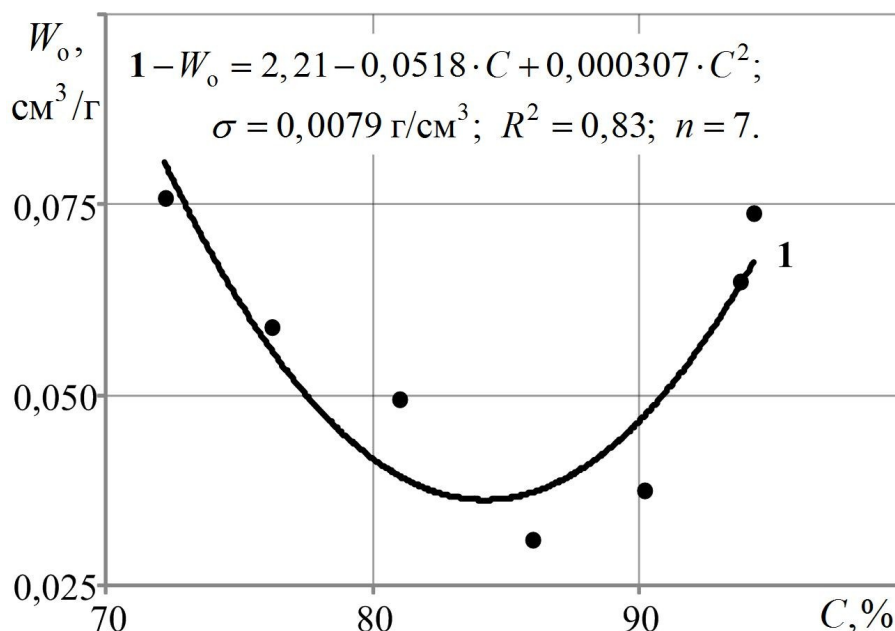


Рисунок 4 - Изменение объема микропор в зависимости от содержания углерода
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.69.5>

Примечание: • – экспериментальные данные [9]; 1 – усредняющая кривая; σ – среднее квадратическое отклонение; R^2 – коэффициент детерминации

Эта зависимость, исходя из характера усредняющей кривой и абсолютных значений микропор, близка к установленной их зависимости от выхода летучих веществ (рис. 2, кривая 1, $R^2=0,81$; $\sigma=0,0046 \text{ см}^3/\text{г}$). Это указывает на формирование значительной части микропор, в основном, на стадиях метаморфизма. Наряду с этим, имеются фильтрационные поры, объемы которых близкие или одинаковые с объемом микропор, но они формировались на более ранних, по сравнению, с метаморфизмом стадиях углефикации. Вследствие этого отсутствуют тесные корреляционные зависимости P_f от выхода летучих веществ (рис. 3). Возможная близость объемов фильтрационных и микропор при одинаковой степени метаморфизма следует из их диапазонов, соответственно равных $0,000 \div 0,187 \text{ см}^3/\text{г}$ и $0,016 \div 0,066 \text{ см}^3/\text{г}$ (табл. 1).

Несмотря на близость объемов этих пор они обладают, очевидно, разными как сорбционными, так и фильтрационными свойствами. При этом наблюдается примерно равное соотношение между средними значениями объемов фильтрационных пор и микропор для всей совокупности из 776 шахтопластов (табл. 1). Эти соотношения объемов пор характеризуются соответственно значениями $0,033 \text{ см}^3/\text{г}$ и $0,034 \text{ см}^3/\text{г}$. При примерно одинаковых средних значениях объемов фильтрационных пор и микропор, диапазон изменения фильтрационных пор ($0,000 \div 0,187 \text{ см}^3/\text{г}$) довольно близок к диапазону изменения общих пор ($0,021 \div 0,211 \text{ см}^3/\text{г}$). Диапазоны изменения микропор значительно уже ($0,016 \div 0,066 \text{ см}^3/\text{г}$), что свидетельствует о сугубо индивидуальном соотношении между фильтрационными порами и микропорами, независимо от степени метаморфических преобразований конкретного шахтопласта.

Заключение

Полученные результаты конкретизируют зависимость метаноёмкости от стадий углеобразования, что существенно дополняет известные исследования в этом направлении [11], [12], [13]. Проведенные исследования позволяют сделать важный для науки и практики вывод: микропоры определяют возможность нахождения метана в сорбированном состоянии, а фильтрационные — в свободном. Соотношение этих форм нахождения метана в угле, в большей степени, по сравнению с метаморфическими преобразованиями шахтопластов, характеризуют их склонность к проявлению газодинамических явлений.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Горная энциклопедия / под. ред. Е.А. Козловский, М.И. Агошков, Н.К. Байбаков и др. — Москва : Советская энциклопедия, Ортин – Социосфера, 1989. — 5623 с.
2. Василенко Т.А. Определение пористости ископаемого угля с учетом объема закрытых пор / Т.А. Василенко, В.В. Слюсарев // Физико-технические проблемы горного производства. — Вып. 5. — Днепропетровск : Ин-т физики горных процессов НАНУ, 2002. — С. 79–86.
3. Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности. — Введ. 2017-04-01. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 11 с.
4. Каталог коллекторских свойств каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. — Макеевка-Донбасс : МакНИИ, 1985. — 48 с.
5. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. №506 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт"». — 139 с.
6. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 декабря 2023 г. N 441 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах». — 157 с.
7. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря 2020 г. N 515 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». — 114 с.
8. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость / М.М. Дубинин. — Москва : ВАХЗ, 1972. — 128 с.
9. Еремин И.В. Петрография и физические свойства углей / И.В. Еремин, В.В. Лебедев, Д.А. Цикарев. — Москва : Недра, 1980. — 263 с.
10. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа / В.В. Ходот. — Москва : Госгортехиздат, 1961. — 407 с.
11. Киряева Т.А. Взаимосвязь параметров физико-химических и сорбционных процессов с выбросоопасностью угольных пластов. Часть II: о влиянии стадий метаморфизма природных углей на их метаноемкость / Т.А. Киряева // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 2, № 3. — С. 151–158. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-151-158
12. Майборода А.А. Коллекторы метана в угленосных формациях Донбасса / А.А. Майборода, В.А. Анциферов, А.А. Голубев и др. // Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики. — 2009. — № 4. — С. 6–15.
13. Васильковский В.А. Адсорбция метана на ископаемых углях в диапазоне комнатных температур и давлений выше 0.1 МПа / В.А. Васильковский, М.М. Довбнич, Я.В. Мендрий // Физика и техника высоких давлений. — 2016. — № 26. — С. 79–88.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gornaya enciklopediya [Mining Encyclopedia] / ed. E.A. Kozlovsky, M.I. Agoshkov, N.N. Baibakov et al. — Moscow : Soviet Encyclopedia, Ortin – Sociosphere, 1989. — 5623 p. [in Russian]
2. Vasilenko T.A. Opredelenie poristosti iskopaemogo uglya s uchetom obyoma zakritikh por [Determination of the porosity of fossil coal, taking into account the volume of closed pores] / T.A. Vasilenko, V.V. Slyusarev // Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva [Physico-technical problems of mining production]. — Iss. 5. — Dnepropetrovsk : In-t fiziki gornikh protsessov NANU, 2002. — P. 79–86. [in Russian]
3. Toplivo tverdoe mineralnoe. Opredelenie deistvitel'noi i kazhushcheysya plotnosti [Solid mineral fuel. Determination of the actual and apparent density]. — Introd. 2017-04-01. — Moscow : Standartinform, 2016. — 11 p. [in Russian]
4. Katalog kollektorskih svojstv kamennyh uglej i antracitov Doneckogo i L'vovsko-Volynskogo bassejnov [Catalog of reservoir properties of hard coals and anthracites of the Donetsk and Lviv-Volyn basins]. — Makeyevka-Donbass : MakNII, 1985. — 48 p. [in Russian]
5. Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 8 dekabrya 2020 g. №506 «Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti "Instrukciya po aerologicheskoy bezopasnosti ugol'nyh shaft"» [Order No. 506 of the Federal Environmental, Technological and Nuclear Supervision Service dated December 8, 2020 "On Approval of Federal Standards and Regulations in the field of Industrial Safety "Instruction on Aerological Safety of Coal Mines"]. — 139 p. [in Russian]
6. Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 7 dekabrya 2023 g. N 441 «Ob utverzhdenii Rukovodstva po bezopasnosti «Rekomendacii po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na sklonnyh k dinamicheskim yavleniyam ugol'nyh plastah» [Order No. 441 of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated December 7, 2023 "On Approval of the Safety Manual "Recommendations for Safe Mining Operations in Coal Seams Prone to Dynamic Phenomena"]. — 157 p. [in Russian]
7. Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 10 dekabrya 2020 g. N 515 «Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Instrukciya po prognozu dinamicheskikh yavlenij i monitoringu massiva gornyh porod pri otrabotke ugol'nyh mestorozhdenij» [Order No. 515 of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated December 10, 2020 "On Approval of Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety "Instruction on Forecasting Dynamic Phenomena and Monitoring rock Formations during Mining of Coal Deposits"]. — 114 p. [in Russian]
8. Dubinin M.M. Adsorbtsiya i poristost [Adsorption and porosity] / M.M. Dubinin. — Moscow : VAKhZ, 1972. — 128 p. [in Russian]

9. Yeremin I.V. Petrografiya i fizicheskie svoistva uglei [Petrography and physical properties of coals] / I.V. Yeremin, V.V. Lebedev, D.A. Tsikarev. — Moscow : Nedra, 1980. — 263 p. [in Russian]
10. Khodot V.V. Vnezapnie vibrosi uglya i gaza [Sudden emissions of coal and gas] / V.V. Khodot. — Moscow : Gosgortekhzdat, 1961. — 407 p. [in Russian]
11. Kiryaeva T.A. Vzaimosvyaz parametrov fiziko-khimicheskikh i sorbtionnikh protsessov s vibrosoopasnostyu ugolnikh plastov. Chast II: o vliyani stadii metamorfizma prirodnykh uglei na ikh metanoemkost [The relationship between the parameters of physical-chemical and sorption processes and the outburst hazard of coal seams. Part II: on the influence of the stages of metamorphism of natural coals on their methane capacity] / T.A. Kiryaeva // Interexpo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia]. — 2022. — Vol. 2, № 3. — P. 151–158. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-151-158 [in Russian]
12. Maiboroda A.A. Kollektori metana v uglenostnikh formatsiyakh DonbassaKollektori metana v uglenostnikh formatsiyakh Donbassa [Methane collectors in coal formations of Donbass] / A.A. Maiboroda, V.A. Antsiferov, A.A. Golubev et al. // Respublikanskii akademicheskii nauchno-issledovatel'skii i proektno-konstruktorskii institut gornoi geologii, geomekhaniki, geofiziki i marksheiderskogo dela (RANIMI) Ministerstva obrazovaniya i nauki Donetskoi Narodnoi Respubliki [Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI) of the Ministry of Education and Science of the Donetsk People's Republic]. — 2009. — № 4. — P. 6–15. [in Russian]
13. Vasilkovskii V.A. Adsorbtsiya metana na iskopaemikh uglyakh v diapazone komnatnykh temperatur i davlenii vishe 0.1 MPa [Adsorption of methane on fossil coals in the range of room temperatures and pressures above 0.1 MPa] / V.A. Vasilkovskii, M.M. Dovbnich, Ya.V. Mendrii // Fizika i tekhnika vysokikh davlenii [High pressure physics and engineering]. — 2016. — № 26. — P. 79–88. [in Russian]