

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-28-35>

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ УГОЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЙ СЛОЙ

© **Юрий Федорович Патраков***, **Светлана Александровна Семенова**,
Анастасия Владимировна Яркова

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Институт угля), Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский пр-т, д. 10; *e-mail: yupat52@gmail.com

*Статья поступила 16 ноября 2022 г. Поступила после доработки 27 января 2023 г.
Принята к публикации 20 марта 2023 г.*

Многие технологические процессы при добыче и первичной переработке угля (пылеподавление, тампонаж, гидроразрыв, мокрое обогащение и др.) зависят от смачиваемости угольной поверхности, определяемой физико-химическими свойствами взаимодействующих сред. От смачиваемости поверхности существенно зависят фильтрационные свойства трещиновато-пористого угольного массива. В работе представлены результаты исследования смачиваемости угольной поверхности водой и ее фильтрации через слой угольного порошка. Показано, что повышенная влажность угля способствует увеличению смачивающих и фильтрационных свойств угольного слоя по отношению к воде благодаря созданию у поверхности контакта гидратной оболочки. Установлено, что способ подготовки угольных проб значительно влияет на функциональный состав и гидрофильность внешней поверхности угольных частиц. Измельчение угля в присутствии кислорода воздуха способствует образованию на поверхности угольных частиц полярных кислородных групп (гидроксильных, карбоксильных), что приводит к повышению гидрофильности и фильтрационных свойств угля. Полученные результаты могут быть использованы для прогноза смачиваемости углей технологическими жидкостями, совершенствования технологий добычи, обогащения и переработки углей.

Ключевые слова: каменный уголь; подготовка лабораторной пробы; фракционный состав; влажность; окисление; гидрофобность поверхности; смачиваемость; фильтрация.

RESEARCH OF THE COAL SURFACE WETTABILITY BY FILTERING THE LIQUID THROUGH A POROUS LAYER

© **Yuriy F. Patrakov***, **Svetlana A. Semenova**, **Anastasia V. Yarkova**

Federal research center of coal and coal chemistry, RAS (Institute of coal), 10, Leningradsky prosp., Kemerovo, 650065, Russia; *e-mail: yupat52@gmail.com

Received November 16, 2022. Revised January 27, 2023. Accepted March 20, 2023.

Many technological processes occurred upon the extraction and primary processing of coal (dust suppression, grouting, hydraulic fracturing, wet enrichment, etc.) depend on the wettability of the coal surface, determined by the physicochemical properties of the interacting media. The filtration properties of a fractured-porous coal massif significantly depend on the wettability of the surface. We present the results of studying the wettability of the coal surface with water and its filtration through a layer of coal powder. It is shown that the increased humidity of coal contributes to an increase in the wetting and filtration properties of the coal layer in relation to water due to the creation of a hydrate shell at the contact surface. It is revealed that the method of coal sample preparation significantly affects the functional composition and hydrophilicity of the outer surface of coal particles. Grinding coal in the presence of oxygen in air contributes to the formation of polar oxygen groups (hydroxyl, carboxyl) on the surface of coal particles, which leads to an increase in the hydrophilicity and filtration properties of coal. The results obtained can be used

to predict the wettability of coals with process fluids, to improve technologies for mining, enrichment and processing of coals.

Keywords: coal; laboratory sample preparation; fractional composition; moisture; oxidation; surface hydrophobicity; wettability; filtration.

Введение

Востребованность знаний в области смачиваемости поверхности углей обусловлена зависимостью большинства технологических процессов, связанных с добычей (пылеподавление, тампонаж и др.) и первичной переработкой углей (мокрое обогащение), от физико-химических свойств внешней поверхности [1 – 6]. При нахождении угля в естественной среде угольные пласты подвергаются фильтрации природными минерализованными водами, а при добыче и вскрытии угольных массивов для повышения газоотдачи, предотвращения взрывов угольной пыли, процессов окисления и самовозгорания используют химически активные технологические жидкости [1 – 3, 7 – 12]. Фильтрация подобных дисперсионных сред в трещиновато-пористую массу угля напрямую связана со смачиваемостью поверхности, которая определяется степенью ее гидрофобности [6].

Смачиваемость поверхности угля зависит от множества факторов. В первую очередь на гидрофобность или, напротив, гидрофильность поверхности влияют особенности химического состава органической массы угля (ОМУ), включающей полярные гетероатомы кислорода, азота и серы. Немаловажное значение имеют минеральные включения, различающиеся по степени гидрофильности и характеру диспергирования, а также физические свойства поверхности и объема углей (пористость, локальные дефекты, трещины, шероховатость и др.) [6]. Помимо этого, под влиянием внешних факторов (атмосферного окисления) на угольной поверхности возможно формирование новых функциональных групп, вследствие чего свойства контактировавшего с воздухом внешнего слоя угля становятся отличными от свойств поверхности не контактировавшего с воздухом (нативного) угля [12, 13].

Цель работы — исследование влияния условий пробоподготовки на смачивание угольной поверхности водой и ее фильтрацию через пористый слой угля.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы низкометаморфизованного угля марки Д (длиннопламенный) Канско-Ачинского месторождения (Хакасия). Характеристики угля, %: влага общая W^r — 9,5; влага аналитическая W^a — 3,8; зольность A^d — 6,5. Вы-

бор низкометаморфизованного угля для оценки смачиваемости и фильтрационных свойств обусловлен повышенной естественной гидрофильностью его поверхности за счет наличия в ОМУ полярных периферийных кислородсодержащих групп (ОН + СООН).

Для сравнительного анализа фильтрационных свойств нативного и поверхностно-окисленного угля использовали способ бесконтактных с воздухом доставки, разделки и хранения образцов. Пробу угля отбирали со свежееобнаженной поверхности угольного пласта в виде крупных кусков (250 – 300 мм). Образцы помещали в герметично закрывающийся, заполненный инертным газом пластиковый контейнер. Таким образом обеспечивали минимальный контакт угля с атмосферным кислородом и исключали неконтролируемое окисление основной массы отобранной пробы.

При доставке в лабораторию контейнер с углем через приемный шлюз помещали в заполненный инертным газом (азот особой чистоты ТУ 2114-003-05758954–2007) герметичный перчаточный бокс. В боксе проводили распаковку контейнера и все подготовительные операции для последующих исследований нативного угля: откалывание с поверхности кусков слоя контактировавшего с воздухом угля, сушку и удаление избыточной влаги, измельчение, рассев по классам крупности, взвешивание, смешивание порошка угля с КВг для ИК-спектрального анализа, упаковку образцов в ампулы и герметичную тару для дальнейших испытаний и др.

Отделенные с внешних торцов монолитных кусков слои угля извлекали из перчаточного бокса и использовали для пробоподготовки в условиях воздушной атмосферы лаборатории, близкой к стандартной ($T = 20 \pm 5^\circ\text{C}$, влажность воздуха $60 \pm 2\%$, ГОСТ 8719–90). Влажность пробы определяли согласно ГОСТ 3350302015 (ISO 11722:2013, ISO 5068-2:2007).

Кислородсодержащие группы анализировали рН-метрическим методом (рН-метр 150МИ): суммарную кислотность (ОН + СООН) — ионным обменом с гидроксидом натрия, карбонильные — по реакции с гидроксиламином солянокислым.

ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрометре «Люмекс Инфралюм ФТ-08» с приставкой диффузного отражения PIKE Easydiff в диапазоне $400 - 4000\text{ см}^{-1}$. ИК-спектральный параметр HI (индекс гидрофильности) расчи-

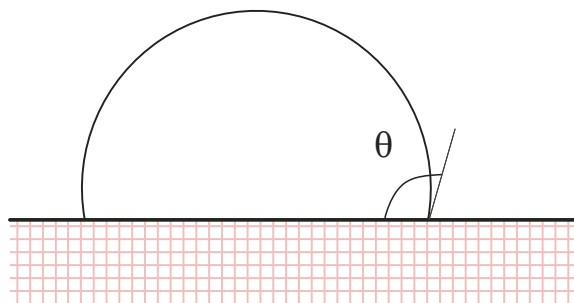


Рис. 1. Угол смачиваемости поверхности угля θ

Fig. 1. The wettability angle of the coal surface θ

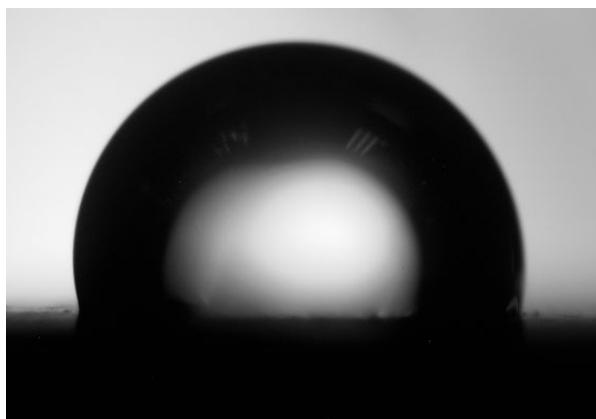


Рис. 2. Капля жидкости на гидрофобной поверхности угольного брикета

Fig. 2. A drop of liquid on the hydrophobic surface of a coal briquette

тывали по отношению суммы интенсивностей полос поглощения гидроксильных (3400 см^{-1}) и карбоксильных (1710 см^{-1}) групп к сумме интенсивностей полос поглощения СН-ароматических (3040 см^{-1}) и СН₂-алифатических (2920 см^{-1}) групп ($HI = (2D_{3400} + D_{1710}) / (D_{3040} + D_{2920})$) [5].

Пористую структуру углей исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота на объемной вакуумной статической установке Sorbi (Россия) для измерения удельной поверхности дисперсных и пористых материалов путем сравнения объемов газа-адсорбата, сорбируемого исследуемым образцом и стандартным образцом материала с известной удельной поверхностью. В качестве газа-адсорбата использовали азот, газ-носитель — гелий. Величину удельной поверхности углей получали из анализа изотерм адсорбции-десорбции азота при температуре -196°C . Для определения удельной поверхности использовали модель Brunauer-Emmett-Teller (BET) [14]. Предел допускаемой относительной погрешности измерения удельной поверхности — $\pm 5\%$ отн.

Смачиваемость поверхности угля оценивали с помощью определения краевого угла смачивания θ поверхности по капле жидкости с применением микроскопа с камерой высокого разрешения и проецированием изображения на экране компьютера [15], а также посредством определения скорости фильтрации жидкости через угольный порошок при непрерывном повышении давления на границе жидкость — газ в слое угля.

Для определения угла θ использовали способ приготовления поверхности образца угля прессованием порошкообразной пробы. Данный способ подготовки угля основан на его механическом измельчении до порошкообразного состояния с последующим прессованием под давлением 700 МПа в брикет цилиндрической формы (диаметр — 10 , высота — 5 мм). Для подготовки брикетов использовали угольные фракции с размером частиц $< 0,1\text{ мм}$. Угольный брикет закрепляли на предметном стекле, горизонтально выравнивали и через капилляр подводили к исследуемой поверхности каплю жидкости. Равновесную форму и краевой угол сцепления капли с поверхностью угля θ регистрировали с помощью микроскопа, снабженного видеокамерой, и далее рассчитывали с использованием программного обеспечения. Для воспроизводимости результатов использовали не менее пяти образцов угля и многократное закрепление капли. Относительная ошибка определения для разных способов подготовки поверхности составляла $5 - 10\%$.

Краевой угол смачивания θ — количественная характеристика смачиваемости поверхности — отсчитывается от касательной к свободной поверхности жидкости, проведенной в точке раздела трех фаз (жидкой, газообразной, твердой) в сторону жидкости (рис. 1) [6, 16]. Капля жидкости, находящаяся на границе газ — твердое тело, вытесняет с поверхности угля прослойку воздуха и образует сферическую форму (гидрофобная поверхность) (рис. 2) или растекается (гидрофильная поверхность).

В связи с технической сложностью определения краевого угла по предлагаемой методике для нативных углей сравнительную оценку смачиваемости их поверхности проводили косвенным способом по скорости фильтрации воды через пористый слой угля. При таких измерениях контакт образцов угля с воздухом минимален.

Оценку фильтрационных свойств осуществляли при постоянном изменении давления на границе жидкость — газ в слое угля [16]. Порошок угля (масса — 25 г) размещали в вертикальной трубке (диаметр — 40 мм), сообщаемой тонким гибким шлангом с емкостью, заполненной фильтруемой жидкостью (рис. 3). Поскольку визуально оценить высоту смачивания черного порошка угля водой затруднительно, оценивали

не высоту подъема жидкости в слое угля, а увеличение массы пробы угольного порошка.

Масса m жидкости, впитываемой исследуемым материалом в единицу времени t , определяется следующим образом [17]:

$$m^2 = \frac{c\rho_l^2\sigma_{\text{жг}}\cos\theta}{\mu_l}t,$$

где $c = \varepsilon^2 S^2 R_p$ — геометрическая переменная (S — площадь поперечного сечения слоя порошка; R_p — радиус частицы порошка; ε — пористость слоя); ρ_l — плотность жидкости; $\sigma_{\text{жг}}$ — межфазное натяжение на границе жидкость — газ; μ_l — коэффициент динамической вязкости жидкости.

Таким образом, скорость увеличения массы порошка (аналогично высоте впитываемого слоя жидкости) будет коррелировать с углом смачивания θ .

Напорное давление фильтруемой жидкости непрерывно повышали со скоростью 10 мм вод. ст./мин. Измерения массы угля при насыщении жидкостью регистрировали до достижения постоянной скорости изменения массы либо до полного его смачивания (просачивание жидкости над поверхностью порошка). Фильтрацию жидкости через слой угля осуществляли непосредственно после измельчения пробы в инертной или воздушной среде.

При фильтрации жидкости через слой непрессованного порошка поры между частицами рассматриваются как система тонких капилляров. При этом капиллярное давление в слое определяется согласно уравнению Лапласа [18]:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{\text{жг}}\cos\theta}{r_p} + \Delta\bar{P},$$

где ΔP — напорное давление жидкости; $\Delta\bar{P}$ — гидравлическое сопротивление; r_p — средний радиус пор.

В случае гидрофобности поверхности частиц при отсутствии напорного давления вода не проникает в слой порошка. Момент преодоления капиллярного сопротивления, обусловленного степенью гидрофобности материала порошка, определяет начальный градиент напора ΔP_n (пороговое значение давления жидкости) (рис. 4). Если условия эксперимента (крупность частиц, равномерность засыпки и уплотнения, высота слоя и др.) постоянны, то можно считать $\Delta P \approx a \cos\theta$, где $a = \text{const}$. Таким образом, начальный градиент напора ΔP_n наряду со скоростью увеличения массы порошка будет коррелировать со значением угла θ .

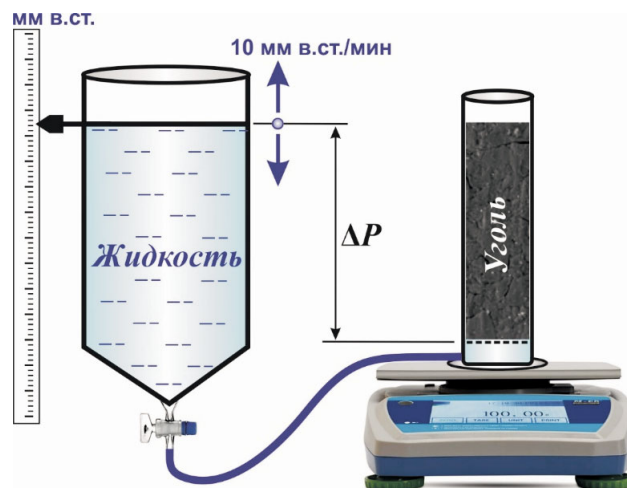


Рис. 3. Схема установки для определения смачиваемости поверхности фильтрованием жидкости через слой угля

Fig. 3. Setup for determining the wettability of the surface by filtering liquid through a layer of coal

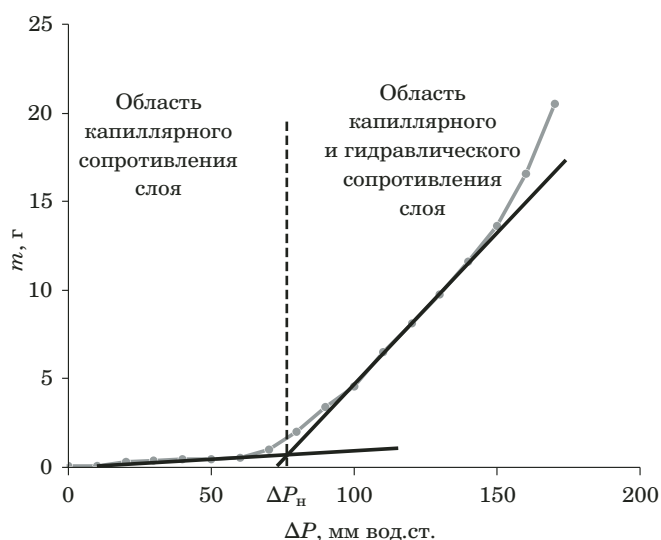


Рис. 4. Зависимость прироста массы угольного порошка m от напорного давления воды ΔP

Fig. 4. The dependence of the increment m of the coal powder mass on water pressure ΔP

После начала просачивания начинают одновременно действовать капиллярное и гидравлическое сопротивления слоя. Гидравлическое сопротивление можно представить линейным законом Дарси: $v_{\text{филт}} \approx b(\Delta P/h)$, где $v_{\text{филт}}$ — скорость фильтрации; ΔP — напорное давление; h — высота слоя; $b = \text{const}$. Поскольку в нашем случае напорное давление и высота смоченного слоя порошка одновременно увеличиваются, можно предположить на определенном участке экспериментальной кривой близкую к линейной зависимость скорости поглощения жидкости слоем порошка от напорного давления. Наклон прямой, в

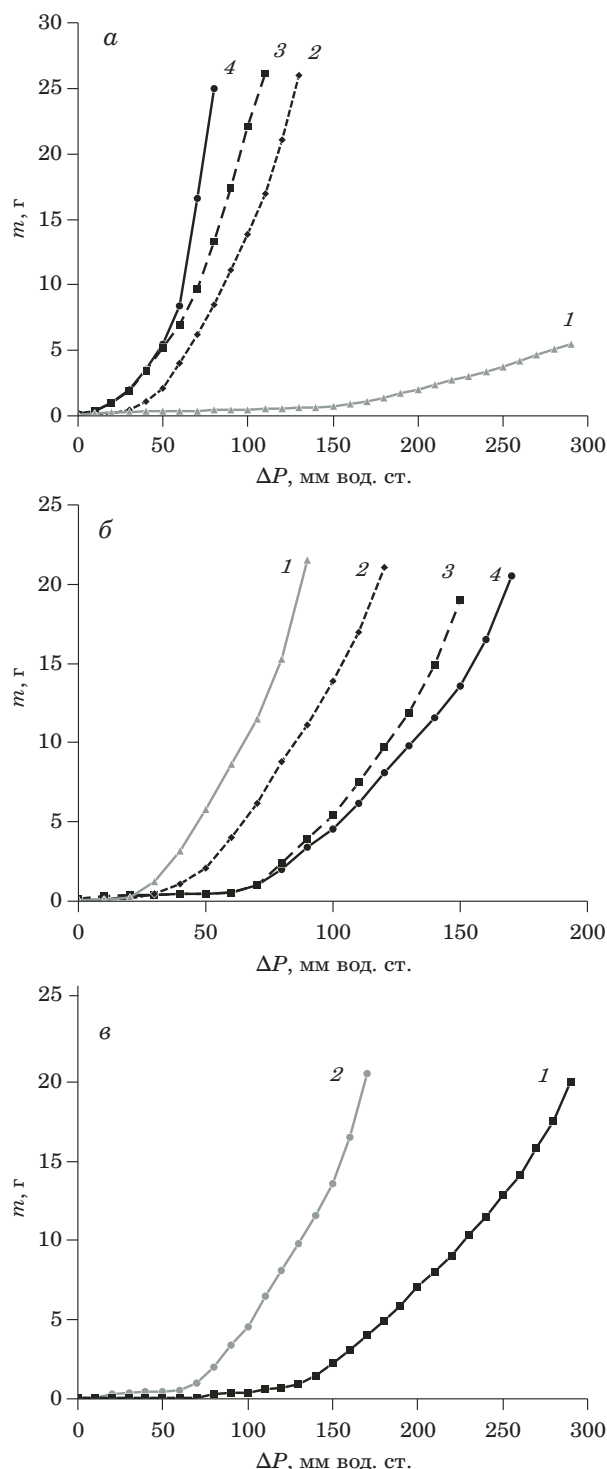


Рис. 5. Зависимости изменения массы угольного порошка от напорного давления воды для фракций $<0,1$ (1), $0,1 - 0,2$ (2), $0,2 - 0,5$ (3), $0,5 - 1,0$ мм (4) (а), образцов 1–4 (см. табл. 2) (б), слоя порошка нативного (1) и поверхностно-окисленного (2) угля (в)

Fig. 5. Dependence of the change in the mass of coal powder on the water pressure for fractions $<0,1$ (1), $0,1 - 0,2$ (2), $0,2 - 0,5$ (3), $0,5 - 1,0$ mm (4) (a), samples 1–4 (Table 2) (b), a layer of native (1) and surface oxidized (2) coal powder (c)

По результатам измерения скорости фильтрации жидкости через слой порошка возможна сравнительная оценка смачиваемости поверхности различных образцов. Однако наиболее информативным для оценки смачивающих свойств поверхности, по-видимому, следует считать начальный участок экспериментальной кривой скорости фильтрации (область капиллярного сопротивления) (см. рис. 4).

Для получения воспроизводимых результатов повторяемость опытов составляла не менее пяти раз. Расхождение параллельных экспериментов при соблюдении постоянства параметров пробы не превышало 7 % отн.

Фильтрационные свойства угольных порошков оценивали на основании расчета следующих параметров: начального градиента напора жидкости ΔP_n и средней скорости увеличения массы порошка на единицу площади поперечного сечения его слоя v_{cp} в начальный период действия капиллярного сопротивления слоя (v_{cp}^1) и после преодоления ΔP_n (v_{cp}^2). Среднюю скорость для каждой области сопротивления слоя рассчитывали как тангенс угла наклона касательной к экспериментальной кривой.

Обсуждение результатов

Скорость фильтрации жидкости в слое порошка во многом определяется степенью уплотнения и размером частиц. Для оценки влияния фракционного состава угольных частиц на смачиваемость угольного слоя водой испытывали серию образцов угля марки Д с размером частиц $<0,1$, $0,1 - 0,2$, $0,2 - 0,5$ и $0,5 - 1$ мм.

Начальная фаза фильтрации воды через пористый слой угля при отсутствии или малых значениях напорного давления характеризуется низкой скоростью, поскольку осуществляется посредством капиллярных сил. Дальнейшее продвижение воды через угольный слой происходит благодаря росту напорного давления. Интенсивность фильтрации воды возрастает с повышением крупности угольных частиц (более $0,1 - 0,2$ мм) в соответствии с увеличением размеров свободного пространства между ними (рис. 5, а). Начальный градиент давления при этом — 20–40 мм вод. ст.

В табл. 1 приведена средняя скорость фильтрации в зависимости от фракционного состава. Видно, что наименьшие интенсивность и скорость смачивания на начальном этапе процесса и далее характерны для мелкодисперсной фракции крупностью $<0,1$ мм. Для развития процесса фильтрации воды при данном размере частиц требуется начальное гидростатическое давление $\Delta P_n = 150$ мм вод. ст., что в 3,8–7,5 раза выше, чем для слоя, сложенного из более крупных час-

свою очередь, будет также определяться смачивающими свойствами поверхности материала.

тиц. Низкая проницаемость порошка мелкодисперсных частиц угля в данном случае обусловлена плотной упаковкой слоя, при которой микронные частицы пыли заполняют свободное пространство между более крупными зернами.

Изучение динамики фильтрации воды через слой угля, представленного частицами различных классов крупности, показывает, что использование особо мелких частиц ($<0,1$ мм) требует высокого гидростатического напора, что увеличивает продолжительность фильтрации, а слой из относительно крупных угольных зерен ($>0,2$ мм) имеет высокую проницаемость вследствие наличия пустот, сопоставимых с размерами частиц. Поэтому для дальнейших исследований фильтрации использовали размер частиц $0,1 - 0,2$ мм.

Повышенная влажность угольных частиц обуславливает исходную гидратацию поверхности — наличие вблизи нее адсорбционного слоя, удерживающего дипольно ориентированные молекулы воды. Наличие адсорбционного слоя способствует хорошему смачиванию поверхности и свободному перемещению фильтрационной воды от одной частицы угля к другой под действием молекулярных сил [19].

Эксперименты подтверждают, что интенсивность фильтрации воды через слой угля коррелирует с изменением влажности пробы. Уменьшение влажности угля сопровождается снижением средней скорости фильтрации $v_{\text{ср}}$ в диапазонах влияния капиллярного и гидростатического давлений, повышением краевого угла смачивания θ и начального градиента напора $\Delta P_{\text{н}}$ (рис. 5, б, табл. 2). Можно заключить, что удаление избы-

Таблица 1. Начальный градиент давления, средняя скорость фильтрации для проб различных фракций

Table 1. Initial pressure gradient, average filtration rate for samples of various fractions

Образец	Фракция, мм	Начальный градиент напора $\Delta P_{\text{н}}$, мм вод. ст.	Средняя скорость фильтрации $v_{\text{ср}}$, г/(см ² · мин)	
			$v_{\text{ср}}^1$	$v_{\text{ср}}^2$
1	$<0,1$	150	0,003	0,028
2	$0,1 - 0,2$	40	0,012	0,166
3	$0,2 - 0,5$	20	0,035	0,169
4	$0,5 - 1$	25	0,042	0,220

точной влаги из угля способствует повышению гидрофобности поверхности и снижению его фильтрационных свойств. Кроме того, гидратный слой, сформированный вблизи поверхности наиболее влажных частиц угля, способствует свободному продвижению потока воды в поровом пространстве слоя.

Избыточная влага повышает гидратированность поверхности частиц и, как следствие, смачивающие и фильтрационные свойства угольного слоя по отношению к воде. Поэтому для исключения влияния влажности на оценку параметров смачиваемости поверхности и фильтруемости слоя угля следует использовать угольные пробы, доведенные до воздушно-сухого состояния.

Известно, что взаимодействие активной поверхности с теми или иными газами может способствовать как ее гидрофобизации, так и гидратированности [12, 20]. Установлено, что пробоподготовка в инертной среде (азот) предотвраща-

Таблица 2. Начальный градиент напора, средняя скорость фильтрации, краевой угол смачивания для образцов различной влажности (фракция $0,1 - 0,2$ мм)

Table 2. Initial pressure gradient, average filtration rate, wetting edge angle for samples of different humidity (fraction $0.1 - 0.2$ mm)

Образец	Влажность W^a , %	Начальный градиент напора $\Delta P_{\text{н}}$, мм вод. ст.	Средняя скорость фильтрации $v_{\text{ср}}$, г/(см ² · мин)		Краевой угол смачивания θ , град.
			$v_{\text{ср}}^1$	$v_{\text{ср}}^2$	
1	10	30	0,021	0,257	55
2	6,8	40	0,020	0,194	64
3	5,5	65	0,006	0,132	81
4	3,8	70	0,006	0,104	88

Таблица 3. Характеристики образцов угля, полученных при различных условиях подготовки проб

Table 3. Characteristics of coal samples obtained under various sample preparation conditions

Среда пробоподготовки	Содержание О-групп, мг-экв/г		Удельная поверхность $S_{\text{ВЕТ}}$, см ² /г	Индекс гидрофильности HI , отн. ед.
	(ОН + СООН)	С=О		
Азот	0,39	1,88	26,57	2,41
Воздух	0,45	1,50	25,81	3,25

Таблица 4. Начальный градиент напора и средняя скорость фильтрации для образцов угля, полученных при различных условиях пробоподготовки (влажность пробы $W^a = 3,8\%$, фракция 0,1 – 0,2 мм)

Table 4. Initial pressure gradient and average filtration rate for coal samples obtained under various sample preparation conditions (sample moisture $W^a = 3.8\%$, fraction 0.1 – 0.2 mm)

Среда пробоподготовки	Начальный градиент напора ΔP_n , мм вод. ст.	Средняя скорость фильтрации v_{cp} , г/(см ² · мин)	
		v_{cp}^1	v_{cp}^2
Азот	130	0,005	0,049
Воздух	70	0,007	0,088

ет развитие окислительных преобразований поверхностного слоя и способствует сохранению естественной гидрофобности угля [20]. Характеристики образцов угля, полученных при различных способах пробоподготовки, приведены в табл. 3.

Изменения содержания кислородсодержащих функциональных групп и значений удельной поверхности исследуемых образцов показывают, что даже стандартные процедуры пробоподготовки (измельчение, рассев) в воздушной среде приводят к изменению соотношения кислородных групп в ОМУ. Так, количество гидрофильных групп кислого характера (гидроксильных и карбоксильных) возрастает, а количество нейтральных карбонильных групп убывает по сравнению с подготовкой пробы в инертной среде, о чем также свидетельствуют повышенные значения ИК-спектрального показателя гидрофильности HI (см. табл. 3). Иными словами, наблюдается гидрофилизация поверхности угля. Отметим, что снижение удельной поверхности $S_{вет}$ наблюдалось и ранее у окисленных образцов углей [21]. По-видимому, это обусловлено блокировкой адсорбционных центров на внутренних стенках пор угля физически адсорбированным кислородом, а также стерическими препятствиями, создаваемыми газу-сорбату (азоту) продуктами хемосорбции — поверхностными кислородсодержащими группами.

Важная характеристика преобразования химического состава поверхности угля при переходе от нативного состояния к поверхностно-окисленному — ее чувствительность к смачиваемости водой. Фильтрация воды через слой нативного угля протекает с меньшей интенсивностью и нуждается в большем напоре жидкости по сравнению с поверхностно-окисленным образцом (рис. 5, в, табл. 4). Это можно объяснить естественной гидрофобностью поверхности угля, не контактировавшего ранее с кислородной средой.

Можно констатировать, что угол смачивания нативных образцов углей будет заметно больше

угла смачивания поверхностно-окисленных. Однако для количественной оценки угла смачивания на основании данных по фильтрации необходимо стандартизовать экспериментальные условия, установить статистически обоснованную корреляционную зависимость начального градиента напора ΔP_n со значением угла θ , т.е., собственно, разработать аттестованную методику определения угла смачивания фильтрацией жидкости через пористый слой образца.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что условия пробоподготовки (фракционный состав, влажность, газовая среда) влияют на смачивающие и фильтрационные свойства пористого слоя угля. Избыточная влага, превышающая значения воздушно-сухого состояния (аналитическая влага), способствует росту гидратированности поверхности частиц и, как следствие, повышению смачивающих и фильтрационных свойств угольного слоя по отношению к воде. Установлено, что окислительная активация угольной поверхности при подготовке угольной пробы в воздушной среде сопровождается образованием полярных О-групп (гидроксильных, карбоксильных) и способствует повышению гидрофильности контактирующего слоя и одновременно фильтрационной способности угля.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в выполнении физико-химических методов анализа Т. А. Папиной, А. В. Аникиной, Е. С. Непеиной (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН), С. Ю. Лырщикову (ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН).

ЛИТЕРАТУРА

- Liao X., Wang B., Wang L., et al. Experimental study on the wettability of coal with different metamorphism treated by surfactants for coal dust control / ACS Omega. 2021. Vol. 6(34). P. 21925 – 21938. DOI: 10.1021/acsomega.1c02205
- Xu Ch., Wang D., Wang H., et al. Effects of chemical properties of coal dust on its wettability / Powder Technology. 2017. Vol. 318. P. 33 – 39. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.05.02
- Коршунов Г. И., Корнев А. В., Ерзин А. Х., Сафина А. М. Исследование влияния степени метаморфизма и физико-химических свойств добываемых углей на смачиваемость образующейся пыли / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S6. С. 3 – 10.
- Ping A., Xia W., Peng Ya., Xie G. Comparative filtration and dewatering behavior of vitrinite and inertinite of bituminous coal: Experiment and simulation study / Int. J. Mining Sci. Technol. 2021. Vol. 31(2). P. 233 – 240. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.12.026
- Jena M. S., Biswal S. K., Rudramuniyappa M. V. Study on flotation characteristics of oxidised Indian high ash sub-bituminous coal / Int. J. Miner. Process. 2008. Vol. 87. P. 42 – 50. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.01.004
- Laskowski J. S. Coal flotation and fine coal utilization. — Amsterdam: Elsevier, 2001. — 368 p.

7. МIRONENKO В. А., РУМЫНИИ В. Г., УЧАЕВ В. К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. — Л.: Недра, 1980. — 320 с.
8. ЮТЯЕВ Е. П., САДОВ А. П., МЕШКОВ А. А. и др. Оценка фильтрационных свойств угля в гидродинамических испытаниях дегазационных пластовых скважин / Уголь. 2017. № 11. С. 24 – 27. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-11-24-27
9. ПЛАКСИН М. С., РОДИН Р. И., ГОРНОСТАЕВ В. С. Основы высокоэффективного метода гидрообработки угольного пласта при проведении подготовительных выработок / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № S49. С. 226 – 234. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-226-234
10. LI J., LI Z., YANG Y., et al. Inhibitive effects of antioxidants on coal spontaneous combustion / Energy Fuels. 2017. Vol. 31(12). P. 14180 – 14190. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02339
11. DREBENSTEDT C., ARGIMBAEV K. Korkinsk brown coal open pit as a case study of endogenous fires / Int. J. Eng. 2021. Vol. 34(1). P. 292 – 304. DOI: 10.5829/ije.2021.34.01a.32
12. САРАНЧУК В. И. Окисление и самовозгорание угля. — Киев: Наукова думка, 1982. — 166 с.
13. VAN KREVELEN DIRK W. Coal: typology, physics, chemistry, constitution. — Amsterdam: Elsevier, 1993. — 979 p.
14. КАРНАУХОВ А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. — Новосибирск: Наука, 1999. — 470 с.
15. ПАТРАКОВ Ю. Ф., УСАНИНА А. С. Влияние кислотно-щелочного состава воды на смачиваемость углей разной степени метаморфизма / Химия твердого топлива. 2016. № 2. С. 58 – 60. DOI: 10.7868/S0023117716020080
16. ЗИМОН А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. — М.: Химия, 1974. — 416 с.
17. CHANDER S., HOGG R., FUERSTENAU D. Characterization of the wetting and dewetting behavior of powders / KONA. 2007. N 25. P. 56 – 75.
18. ГУДОК Н. С. Изучение физических свойств пористых сред. — М.: Недра, 1970. — 208 с.
19. МИРОНЕНКО В. А. Динамика подземных вод. — М.: МГУ, 2001. — 519 с.
20. ПАТРАКОВ Ю. Ф., СЕМЕНОВА С. А., МАЙОРОВ А. Е. Исследование влияния пробоподготовки на химический состав и гидрофобность поверхности каменного угля / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 4. С. 42 – 47. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-42-47
21. СЕМЕНОВА С. А., ПАТРАКОВ Ю. Ф., ЯРКОВА А. С. и др. Изменение свойств нативного низкометаморфизованного угля при контакте с воздухом / Химия твердого топлива. 2022. № 3. С. 3 – 11. DOI: 10.31857/S0023117722030082
- wettability of the dust formed / Mining information and analytical bulletin. 2015. N S6. P. 3 – 10 [in Russian].
4. PING A., XIA W., PENG YA., XIE G. Comparative filtration and dewatering behavior of vitrinite and inertinite of bituminous coal: Experiment and simulation study / Int. J. Mining Sci. Technol. 2021. Vol. 31(2). P. 233 – 240. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.12.026
5. JENA M. S., BISWAL S. K., RUDRAMUNIYAPPA M. V. Study on flotation characteristics of oxidised Indian high ash sub-bituminous coal / Int. J. Miner. Process. 2008. Vol. 87. P. 42 – 50. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.01.004
6. LASKOWSKI J. S. Coal flotation and fine coal utilization. — Amsterdam: Elsevier, 2001. — 368 p.
7. MIRONENKO V. A., RUMYNII V. G., UCHAEV V. K. Protection of groundwater in mining areas. — Leningrad: Nedra, 1980. — 320 p. [in Russian].
8. YUTYAEV E. P., SADOV A. P., MESHKOV A. A., et al. Evaluation of filtration properties of coal in hydrodynamic tests of degassing reservoir wells / Ugol'. 2017. N 11. P. 24 – 27 [in Russian]. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-11-24-27
9. PLAKSIN M. S., RODIN R. I., GORNOSTAEV V. S. Fundamentals of a highly efficient method of hydrotreating a coal seam during preparatory workings / Gorn. Inf.-Analit. Byull. 2018. N S49. P. 226 – 234 [in Russian]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-226-234
10. LI J., LI Z., YANG Y., et al. Inhibitive effects of antioxidants on coal spontaneous combustion / Energy Fuels. 2017. Vol. 31(12). P. 14180 – 14190. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02339
11. DREBENSTEDT C., ARGIMBAEV K. Korkinsk brown coal open pit as a case study of endogenous fires / Int. J. Eng. 2021. Vol. 34(1). P. 292 – 304. DOI: 10.5829/ije.2021.34.01a.32
12. SARANCHUK V. I. Oxidation and spontaneous combustion of coal. — Kiev: Naukova dumka, 1982. — 166 p. [in Russian].
13. VAN KREVELEN DIRK W. Coal: typology, physics, chemistry, constitution. — Amsterdam: Elsevier, 1993. — 979 p.
14. KARNAUKHOV A. P. Adsorption. The texture of dispersed and porous materials. — Novosibirsk: Nauka, 1999. — 470 p. [in Russian].
15. PATRAKOV YU. F., USANINA A. S. Effect of the acid-base composition of water on the wettability of coals of different ranks / Khimiya Tv. Topl. 2016. Vol. 50. N 2. P. 127 – 129 [in Russian]. DOI: 10.3103/S0361521916020087
16. ZIMON A. D. Adhesion of liquid and wetting. — Moscow: Khimiya, 1974. — 416 p. [in Russian].
17. CHANDER S., HOGG R., FUERSTENAU D. Characterization of the wetting and dewetting behavior of powders / KONA. 2007. N 25. P. 56 – 75.
18. GUDOK N. S. The study of the physical properties of porous media. — Moscow: Nedra, 1970. — 208 p. [in Russian].
19. MIRONENKO V. A. Dynamics of underground waters. — Moscow: Izd. MGU, 2001. — 519 p. [in Russian].
20. PATRAKOV YU. F., SEMENOVA S. A., MAJOROV A. E. Study of the effect of sample preparation on the chemical composition and hydrophobicity of the coal surface / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2022. Vol. 88. N 4. P. 42 – 47 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-42-47
21. SEMENOVA S. A., PATRAKOV YU. F., YARKOVA A. S., et al. Changes in the properties of native low-metamorphosed coal in contact with air / Khimiya Tv. Topl. 2022. Vol. 56. N 3. P. 157 – 165 [in Russian]. DOI: 10.3103/S0361521922030089

REFERENCES