

Микропузырьковая безреагентная гидрофобизация поверхности угля

Ю.Ф. Патраков✉, С.А. Семенова

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация
✉ yupat52@gmail.com

Резюме: Описаны методические особенности гидрофобизации угольной поверхности с использованием микропузырьковой газожидкостной среды для интенсификации процесса флотационного обогащения угля. Микропузырьки воздуха генерировали методом декомпрессии насыщенной под давлением воздуха жидкости. Установлено влияние давления насыщения воды газом на размер микропузырьков и их стабильность в течение времени. Показано, что добавка микропузырьков приводит к образованию на поверхности угля промежуточного гидрофобного воздушного слоя, который является основой для закрепления пузырей флотационного размера. Приведены результаты флотации коксующихся углей с использованием микропузырьковой газожидкостной смеси. Посредством метода дифференциального гранулометрического анализа установлена предпочтительная флотация микропузырьками воздуха мелкодисперсных угольных частиц размером < 50 мкм. Установлено, что для малозольных углей эффективность безреагентной микропузырьковой флотации может быть сопоставима с результатами обогащения с использованием традиционных нефтехимических реагентов. При реагентном режиме закрепление микропузырьков осуществляется на гидрофобизированной маслом поверхности мелких частиц с образованием углевоздушных комплексов.

Ключевые слова: каменный уголь, микропузырьковая газовая среда, смачиваемость поверхности, гидрофобизация поверхности, флотация

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы» (рег. №АААА-А21-121012290021-1).

Авторы выражают благодарность за помощь в выполнении физико-химических методов анализа: вед. инж. Папиной Т.А., Харлампенковой Ю.А. (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН), к.ф.-м.н. Созинову С.А. (ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН).

Для цитирования: Патраков Ю.Ф., Семенова С.А. Микропузырьковая безреагентная гидрофобизация поверхности угля. *Горная промышленность*. 2023;(S2):53–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-53-58>

Microbubble reagentless hydrophobization of the coal surface

Yu.F. Patrakov✉, S.A. Semenova

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation
✉ yupat52@gmail.com

Abstract: The paper describes methodological features of coal surface hydrophobization the using a microbubble gas-liquid medium to intensify the process of flotation concentration of coal. Air microbubbles were generated using decompression of liquid saturated under air pressure. The influence of water saturation pressure with gas on the size of the bubbles and their stability over time has been established. It is shown that addition of microbubbles leads to formation of an intermediate hydrophobic air layer on the surface of coal, which is the basis for catching bubbles of the flotation size. The results of coking coals flotation using a microbubble gas-liquid mixture are presented. By means of the method of differential particle size analysis, the preferred flotation of fine coal particles < 50 microns in size by micro-bubbles of air was established. It was found that for low-ash coals, the efficiency of reagentless microbubble flotation can be comparable with the results of concentration using traditional petrochemical reagents. In the reagent mode, the micro-bubbles are attached to the oil-hydrophobized surface of small particles with the formation of carbon-air complexes.

Keywords: coal, microbubble gas medium, surface wettability, surface hydrophobization, flotation

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2021-0002 'Development of efficient technologies of coal mining by robotic mining complexes operating without permanent presence of personnel in mining zones, design of control systems and methods to assess their technical condition and operating life as well as justification of the mineral resource base reproduction' (Reg. No. АААА-А21-121012290021-1).

The authors express their gratitude for assistance in performing physical and chemical tests to Lead Engineer T.A. Papina, Yu.A.

Kharlampenkova (Coal Institute of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), Candidate of Physical and Mathematical Sciences S.A. Sozinov (Coal Institute, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Patrakov Yu.F., Semenova S.A. Microbubble reagentless hydrophobization of the coal surface. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):53–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-53-58>

Введение

Флотация – заключительный этап в технологической цепочке обогащения угля мелкого класса крупности (0–0,5 мм). Разделение твердых частиц в процессе пенной флотации основано на различиях физико-химических свойств поверхности органических и минеральных составляющих угля. Процесс флотации начинается со столкновения и прилипания гидрофобных частиц к воздушным пузырькам с последующей их транспортировкой и удалением из верхней части флотационного аппарата, в то время как гидрофильные частицы остаются в пульпе, оседают и выгружаются в виде хвостов. Результат разделения частиц пенной флотацией зависит от эффективного захвата гидрофобных частиц воздушными пузырьками, включающего этапы столкновения, присоединения и отделения. Нижний предел размера флотируемых частиц (10 мкм) обусловлен низкой вероятностью столкновения пузырька воздуха и угольной частицы, а верхний (200 мкм) – высокой вероятностью отрыва частиц от поверхности пузырьков [1–3].

Для повышения эффективности флотационного обогащения шламов и ультрадисперсных углей в последнее время получили развитие методы, основанные на использовании микро- и нанопузырьковых газовых сред (МГС) [4–6]. Образование микропузырьков, представляющих собой крошечные полости размером менее 1 мкм, в условиях колонной флотации основано на принципе кавитации, возникающей при движении жидкости в турбулентном потоке [7]. Применение технологии микропузырьковой флотации при обогащении тонких классов углей не только позволяет существенно сократить количество полезного продукта в отходах обогатительных фабрик, но и обеспечивает решение экологической проблемы утилизации и переработки шламовых накопителей и отвалов.

Впервые технология колонной циклично-микропузырьковой флотации была запатентована Китайским университетом горного дела и технологии в 1996 г. [8; 9]. С тех пор в мире установлено более 40 подобных установок на 30 угольных обогатительных фабриках. В Кузбассе аналогичная технология внедрена на Анжерской обогатительной фабрике. Эксплуатация установок микропузырьковой флотации продемонстрировала, что эта технология требует меньших капитальных и эксплуатационных затрат и показывает лучшие результаты, чем механические флотационные машины [3]. Обогащению могут подвергаться высокозольные дисперсные шламы ($A^d > 50\%$) с получением сверхчистого угольного продукта зольностью до 1,5%.

В теоретических основах процесса флотации [1; 2] особая роль отводится изучению физико-химических свойств поверхности угля, а также взаимодействию угольных частиц с флотационными агентами – пузырьками воздуха и реагентами, содействующими их гидрофобизации и эффективному извлечению в пенный продукт.

Поскольку сведения, касающиеся микродисперсных газожидкостных технологий, представляют коммерческий

интерес, публикации в этой области знаний весьма ограничены. Учитывая непрерывно возрастающий спрос на технологии подобного рода, необходимо изучать эти явления с целью развития научных основ технологий использования МГС.

Цель работы: исследовать влияние МГС, генерированной посредством декомпрессии находящейся под давлением жидкости, на изменение смачиваемости поверхности и флотационную активность углей.

Методы исследования

Для генерации микропузырьков использовали дистиллированную воду, насыщенную воздухом под давлением 1–3 атм. Жидкость подвергалась резкому уменьшению давления (декомпрессии), в результате чего образовывалась микропузырьковая газожидкостная суспензия.

Изучение дисперсности микропузырьков в суспензии, а также порошкообразных проб углей проводили на экспериментальной установке, состоящей из лазерного дифракционного микроанализатора для автоматического гранулометрического экспресс-анализа ANALYSETTE 22 COMFORT производства компании FRITSCH GmbH, Laborgerätebau (Германия). Действие анализатора основано на использовании принципа дифракции электромагнитных волн, при котором параллельный свет лазера рассеивается под фиксированными пространственными углами, зависящими от размера и оптических свойств частиц. Перед измерением гранулометрических характеристик угля для улучшения смачивания твердых частиц в ванну анализатора добавляли пептизирующий агент 0,1%-ный р-р пирофосфата натрия и смачиватель СП-01 (ТУ 2481-002-95498669-2008).

Оценка дисперсного состава частиц основывалась на определении следующих параметров: среднестатистического размера частиц d , мкм, распределения частиц по размерам Q , %, дифференциальной функции – плотности распределения частиц $d(Q)$, %/мкм, среднеарифметического диаметра d_{cp} , мкм и моды $Md(d)$, мкм, которая соответствует величине наиболее распространенного диаметра частиц в составе смеси [10].

Для характеристики гидрофобности поверхности угля использовали краевой угол контакта (смачиваемости) θ между поверхностью угля и пузырьком воздуха, который отсчитывали от касательной, проведенной в точке раздела трех фаз (жидкой, газообразной, твердой) в сторону жидкости [1; 2]. Для эксперимента использовали монолитные кусочки угля с отшлифованной поверхностью исследуемой грани, которую предварительно очищали от угольной пыли напорной струей воды. Образец угля закрепляли на предметном стекле, помещали в кювету с дистиллированной деионизированной водой сколом в воду и подводили к поверхности угля пузырек воздуха. Равновесную форму и краевой угол сцепления воздушного пузырька с поверхностью угля регистрировали с помощью снабженного видеокамерой микроскопа с проецированием изображения на экран компьютера [11].

Таблица 1
Химико-технические характеристики испытываемых углей

Table 1
Chemical and technical characteristics of the tested coals

Марка угля	Технический анализ угля, %			Петрографический анализ угля, %					
	Влага W^a	Зольность A^d	Выход летучих веществ V^{daf}	Показатель отражения витринита R_o	Витринит Vt	Семивитринит Sv	Липтинит L	Инертинит I	Сумма фюзенизированных компонентов ΣOK
ГЖО	2,1	13,0	28,0	0,86	63	4	1	32	34
ОС	0,4	6,0	24,5	1,30	55	13	1	31	39

Микропузырьковую флотацию осуществляли на лабораторной флотационной машине объемом 1 л. В камеру флотационной машины добавляли водоугольную суспензию с расчетным количеством угля. Снизу камеры подводили находящуюся под давлением газожидкостную смесь, содержащую микропузырьки воздуха, доводя ее объем до необходимого. Суспензию непрерывно перемешивали при низких оборотах. Затем, постепенно увеличивая мощность импеллера, включали подачу воздуха и флотировали в обычном режиме в течение 2 мин.

Исследуемые образцы углей (Кузнецкий бассейн) – рядовой уголь марки ГЖО (зольность $A^d_u = 13\%$) и малозольный уголь марки ОС ($A^d_u = 6\%$), отобранный в качестве модельного образца, с высоким содержанием органической компоненты для минимизации вклада в гидратированность поверхности минеральной составляющей угля. Характеристика угольных образцов приведена в табл. 1.

Для сравнительного анализа результатов обогащения углей наряду с безреагентной микропузырьковой флотацией использовали флотацию с традиционными реагентами типа собиратель (керосин марки ТС) и пенообразователь (гетерополярный реагент на основе отходов производства бутиловых спиртов КОБС), а также совместную флотацию с микропузырьками и реагентами. В последнем случае введение МГС осуществляли непосредственно в пульпу с диспергированным реагентом, находящуюся в объеме флотационной камеры в соответствии со схемой: реагент + уголь + микропузырьки + флотационные пузыри. С целью изучения влияния МГС на результаты реагентной флотации в экспериментах использовали минимальные количества традиционных реагентов собирателей и вспенивателей (керосин марки ТС – $0,95 \pm 0,05$ кг/т, КОБС – $0,15 \pm 0,02$ кг/т), стараясь сохранить их значения во всех опытах постоянными. Условия перемешивания реагента – 20 с при 3000 об/мин.

Результаты опытов оценивали по выходу концентрата γ_k и отходов γ_o , зольности концентрата A^d_k и отходов A^d_o , извлечению горючей массы в концентрат E_k и селективности процесса $K_{сел}$:

$$E_k = \gamma_k (100 - A^d_o) / (100 - A^d_u),$$

$$K_{сел} = (A^d_o - A^d_k) / (100 - A^d_u),$$

где A^d_o , A^d_k и A^d_u – зольность отходов, концентрата и исходного угля соответственно.

Результаты исследования

Согласно данным лазерного дисперсионного анализа пузырьки, генерируемые методом декомпрессии воздуха, относятся преимущественно к микроразмерному типу (рис. 1, а). Изменение давления при насыщении воды воздухом оказывает влияние на размеры и свойства генерируемых микропузырьков. Так, при давлении 1 атм максимум распределения размеров пузырьков соответствует ~ 110 мкм, среднеарифметический диаметр ~ 98 мкм. При повышении давления до 3 атм средние размеры пузырьков газа уменьшаются почти втрое, достигая 33 мкм, сужается плотность распределения. В составе газожидкостной смеси исчезают пузырьки размером более 50 мкм, возрастает доля наноразмерных пузырьков < 1 мкм.

Размеры микропузырьков также в значительной степени определяются продолжительностью их существования. Так, при увеличении нахождения МГС в ванне анализатора с момента ее введения до 2 мин максимум распределения размеров смещается в макроразмерную область (> 300 мкм), среднестатистические размеры пузырьков увеличиваются более чем втрое (рис. 1, б). Установленные закономерности изменения геометрических характеристик микропузырьков воздуха в зависимости от продолжительности их существования свидетельствуют о возможности столкновения, коалесценции стенок микроразмерных пузырьков и образовании более крупных агрегатов флотационного размера. Таким образом, можно полагать, что использование

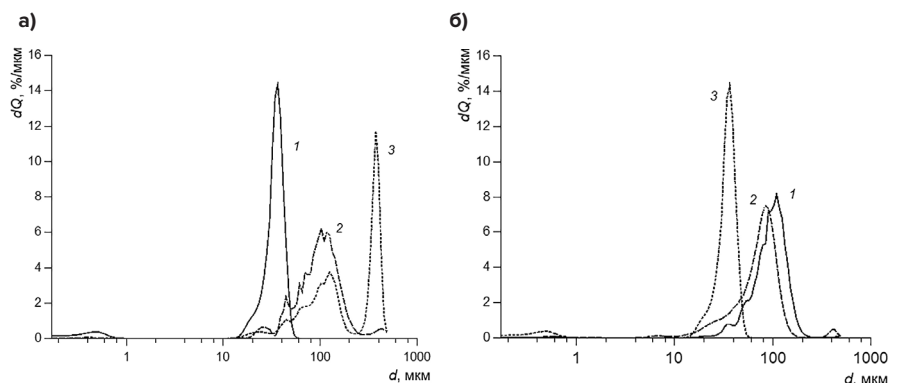


Рис. 1 Плотность распределения микропузырьков воздуха по размерам в газожидкостной смеси при давлении насыщения воздухом 1 (1), 2 (2) и 3 (3) атм (а) и в зависимости от продолжительности дисперсионного анализа 0 (1), 1 (2), 2 (3) мин при давлении насыщения воздухом 3 атм (б)

Fig. 1 The density of the air microbubble distribution by size in a gas-liquid mixture at the air saturation pressure of 1 (1), 2 (2) and 3 (3) atm (a) and depending on the duration of the dispersion analysis for 0 (1), 1 (2), 2 (3) min at the air saturation pressure of 3 atm (b)

Таблица 2
Результаты определения краевого угла смачивания на различных типах поверхностей угля

Вид поверхности угля	Естественная	Обработанная керосином	Естественная с микропузырьками	Обработанная керосином и микропузырьками
Краевой угол смачивания θ , град	43	62	65	87

Table 2
Results of determining the contact wetting angle for various types of coal surfaces

микропузырьков воздуха для гидрофобизации поверхности угольных частиц следует осуществлять на начальном этапе акта флотации, т.е. до запуска флотомашин.

Использование слабоминерализованного угля марки ОС (табл. 1) для изучения гидрофобизации поверхности посредством МГС предполагает наличие у него повышенной гидрофобности. Низкая зольность угля (5,0 %), вероятно, обеспечена присутствием материнских минеральных веществ, сосредоточенных в сростках с гелефицированным основным веществом и в полостях фюзенизированных компонентов угля, сформированных в результате окислительного травления органических отложений [12].

Угол смачивания θ исходной рабочей поверхности угля имеет весьма невысокие значения ~ 43 град (табл. 2), что обусловлено особенностями экспериментальной методики (погружение образца угля в гидрофильную среду (воду) и подведение к смоченной поверхности пузырька воздуха) [1; 2]. В случае дополнительной обработки угля эмульсией керосина краевой угол смачивания возрастает до ~ 62 град, что указывает на повышение гидрофобности поверхности.

Аналогичные с обработкой аполярным углеводородным реагентом результаты наблюдаются при введении МГС в кювету с образцом угля. Микропузырьки активно закрепляются и растекаются на естественно гидрофобной поверхности угля, образуя плотный монослой. Закрепление пузырьков воздуха флотационного размера (3 мм) на покрытой микропузырьками поверхности угля характеризуется более прочным прилипанием контура пузыря, чем в отсутствие МГС (рис. 2, а, б). При этом наблюдается слияние и увеличение размеров пузырей, обусловленное поглощением микроразмерных пузырьков в объем флотационных. Отметим, что угол смачивания, определенный по касательной между контуром микропузырька и поверхностью угля, превышает 90 град и составляет 120–130 град, приближаясь и превышая по величине θ сугубо гидрофобные поверхности, например, парафин (~110 град). Краевой угол смачивания поверхности угля по флотационному пузырьку при этом возрастает с 42 до 65 град, достигая значений θ для поверхности, обработанной керосином (рис. 2, б, в; табл. 2). Можно полагать, что образование микропузырьковой воздушной прослойки способствует «зачистке» угольной поверхности от гидратного водного слоя, аналогично действию аполярных масляных реагентов [1; 2], что обеспечивает ей безреагентную псевдогидрофобизацию.

Взаимодействие с МГС образца угля, обработанного керосином, способствует получению поверхности, приближающейся по гидрофобности к полимерам. Флотационный пузырь сплющивается и растекается по покрытой микропузырьками поверхности угля (рис. 2, г). Краевой угол смачивания в данном случае достигает ~ 87 град (см. табл. 2).

Для оценки влияния микропузырьков газа на гидрофобизацию поверхности угля использовали метод флотационного обогащения. Отличительной особенностью флотации малозольного угля ОС является возможность дополнительного концентрирования горючей массы без использования

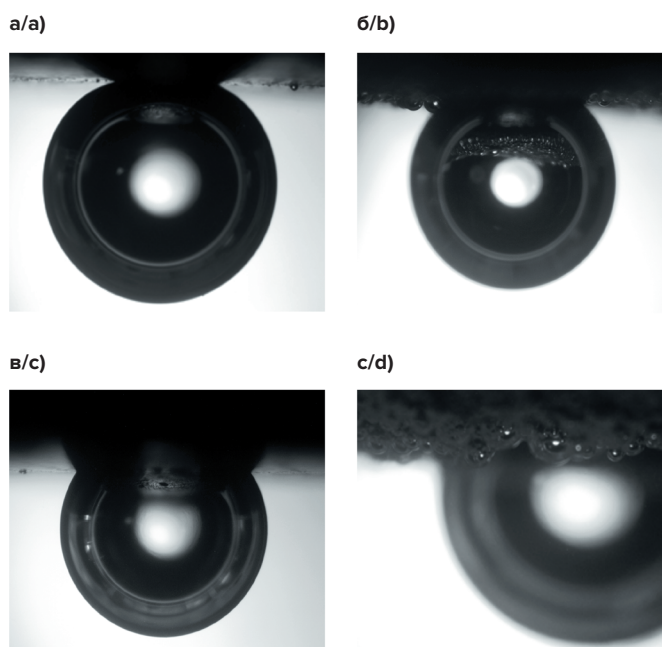


Рис. 2
Микрофотографии флотационных пузырей на поверхности угля: естественной (а), покрытой микропузырьками воздуха (б), обработанной керосином (в), последовательно обработанной керосином и микропузырьками воздуха (г)

Fig. 2
Microphotographs of flotation bubbles on the coal surface: natural (a), covered with micro-bubbles of air (b), treated with kerosene (c), successively treated with kerosene and micro-bubbles of air (d)

органических реагентов (табл. 3). Выход концентрата также существенно возрастает при подаче в водоугольную суспензию МГС. В зависимости от фракционного состава исходного продукта выход чистого угля и селективность процесса могут быть увеличены вдвое по сравнению с безреагентным режимом флотации. Полученные результаты сопоставимы с эффективностью реагентной флотации с использованием традиционных реагентов типа собиратель (керосин) + вспениватель (КОБС). Наилучшие результаты достигнуты при использовании в питании флотации угля наименьшей фракции (< 0,1 мм).

Рядовой уголь марки ГЖО без добавки в пульпу реагентов не флотируется. В случае добавки аполярного реагента керосина выход всплывшей фракции составил 4,0–23,2% в зависимости от крупности угля (см. табл. 3). Добавка МГС в омасленную керосином угольную пульпу приводит к увеличению выхода концентрата в 1,5–9 раз без заметного изменения его зольности. Эффективность добавки МГС возрастает для фракций угля в ряду (0,1–0,2 мм) < (–0,2 мм) < (–0,1 мм). Полученные результаты свидетельствуют, что закрепление микропузырьков воздуха при реагентном режиме также осуществляется на сугубо гидрофобных (в данном случае омасленных керосином) участках поверхности угольных частиц наименьшего размера.

Таблица 3
Результаты флотационного обогащения исследуемых углей

Table 3
Results of flotation concentration of the studied coals

Условия флотации	Концентрат			A ^d _{отх} , %	K _{сел}
	γ _к , %	A ^d _к , %	E _к , %		
Уголь марки ОС, зольность 6%					
Без реагентов; фракция < 0,2 мм	40,0	3,1	40,8	6,7	0,04
Без реагентов с МГС; фракция < 0,2 мм	75,2	3,8	76,2	9,8	0,06
Без реагентов с МГС; фракция 0,1–0,2 мм	69,5	3,7	70,5	8,9	0,05
Без реагентов с МГС; фракция < 0,1 мм	82,6	4,0	83,5	12,1	0,08
Керосин ТС+КОБС, фракция < 0,2 мм	92,9	4,5	93,4	13,0	0,09
Уголь марки ГЖО, зольность 13%					
Керосин, фракция < 0,2 мм	23,20	6,6	24,77	13,5	0,08
Керосин + МГС, фракция < 0,2 мм	40,20	5,5	43,48	17,8	0,14
Керосин, фракция 0,1–0,2 мм	18,80	4,9	19,91	10,2	0,05
Керосин + МГС, фракция 0,1–0,2 мм	27,36	5,1	28,66	11,3	0,07
Керосин, фракция < 0,1 мм	4,0	5,3	4,23	12,0	0,07
Керосин + МГС, фракция < 0,1 мм	36,0	6,7	37,49	14,0	0,08

Пример взаимодействия МГС с гидрофобизированными керосином частицами угля представлен на рис. 3. Можно отметить, что при контакте с микропузырьками омасленные мелкие частицы угля стремятся к формированию более крупных агломератов, которые далее могут легко закрепляться на воздушных пузырях флотационного размера. Таким образом, микропузырьки, адсорбированные на поверхности угля до начала процесса флотации, могут быть важным промежуточным звеном в технологической цепочке уголь + реагент-собиратель + флотационный пузырь → концентрат.

Образцы модельного малозольного угля марки ОС аналитической крупности < 0,2 мм до и после микропузырьковой флотации исследовали методом дифференциального распределения крупности частиц. Анализ распределения частиц по крупности (табл. 4) показывает, что в результате флотации угольной пробы фракцией < 0,2 мм в составе

всплывшего угля возрастает доля частиц мелкого размера < 50 мкм и уменьшается доля частиц с размером 50–200 мкм. Величины модальных значений диаметров частиц в интервале 50–200 мкм для исходного угля и концентрата совпадают и соответствуют 79,4 мкм с одинаковой плотностью распределения, равной 4,9%/мкм. Значение моды в интервале частиц меньшего размера 20–50 мкм после микропузырьковой флотации снижается – от 41,6 до 30,8 мкм. Также существенно уменьшается среднеарифметический диаметр частиц – от 72,3 до 53,4 мкм. Полученные результаты указывают на предпочтительную флотацию микропузырьками угольных частиц размером менее 50 мкм. Частицы с размером 50–200 мкм, по-видимому, флотируются с участием группы закрепившихся микропузырьков. Более минерализованные и крупные (> 200 мкм) угольные частицы в микропузырьковой безреагентной флотации не участвуют.

Заключение

Образование микропузырьковой воздушной прослойки на поверхности угля способствует уменьшению толщины или сдвигу гидратного водного слоя аналогично действию аполярных масляных реагентов в процессе флотации. Наличие микропузырьков на угольной поверхности является площадкой для закрепления воздушных пузырей флотационного размера, обеспечивая угольным частицам безреагентную псевдогидрофобизацию. При этом увеличивается угол смачивания, площадь контакта и размер флотационных пузырей. Можно полагать, что одновременное присутствие в пульпе микропузырьков и аполярных реагентов позволяет еще более повысить гидрофобность частиц и способствовать еще большему повышению эффективности обогащения.

Микропузырьки диаметром < 50 мкм не обладают длительной стойкостью и стремятся к слиянию с другими до образования пузырьков диаметром 300 мкм. Поэтому для

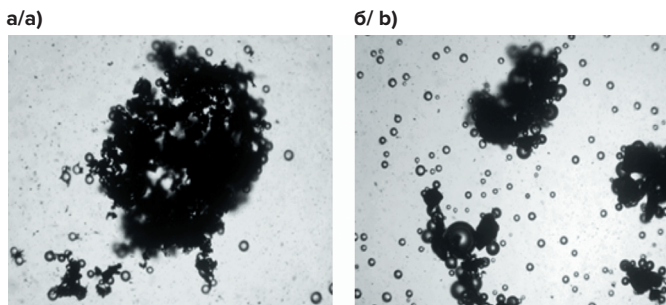


Рис. 3
Микрофотография акта реагентной флотации с участием МГС с образованием агломератов омасленных керосином угольных частиц крупностью < 0,1 мм (а) и 0,1–0,2 мм (б)

Fig. 3
Microphotographs of the reagent flotation process involving a microbubble gas-liquid mixture with the formation of agglomerates of kerosene-oiled coal particles with the size of < 0,1 mm (a) and 0,1–0,2 mm (b)

Таблица 4
Численные характеристики фракционного состава исходной угольной пробы (фракция < 0,2 мм) и концентрата, полученного в результате микропузырьковой флотации

Table 4
Numerical characteristics of the fractional composition of the initial coal sample (fraction < 0.2 mm) and the concentrate obtained as the result of microbubble flotation

Марка угля	Доля частиц в составе пробы с размером (мкм), % отн.				Среднеарифметический диаметр d _{ср} , мкм	Мода M _d , мкм	Плотность распределения частиц, dQ, %/мкм
	<20	20–50	50–200	>200			
Исходный	14,62	24,65	59,09	1,64	72,29	41,56/79,36	2,05/4,93
Концентрат	17,35	34,36	48,29	0	53,4	30,08/79,36	2,70/4,94

улучшения гидрофобизации поверхности угольных частиц обработку микропузырьками воздуха следует проводить на стадии подготовки водоугольной суспензии до или в начале основного режима флотации.

Флотация малозольных углей может осуществляться в присутствии МГС без использования аполярных собирателей и гетерополярных пенообразователей. Закрепление

микропузырьков газа происходит предпочтительно на естественно гидрофобной поверхности угольных частиц наиболее мелкого размера. При реагентном режиме возможно образование флотационных комплексов в виде омасленных мелких частиц, поверхность которых является площадкой для закрепления микропузырьков воздуха с созданием углевоздушных агломератов.

Список литературы

1. Классен В.И. *Флотация углей*. М.: Гос. науч.-тех. изд-во по горному делу, 1963. 380 с.
2. Laskowski J.S. *Coal flotation and fine coal utilization*. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 368 p.
3. Абрамов А.А. *Собрание сочинений: Т. 4: Флотационные методы обогащения*. М.: Горная книга; 2017. 597 с.
4. Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation. *Minerals Engineering*. 2017;112:19–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.020>
5. Tao D.E. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles – A review. *Separation Science and Technology*. 2004;39(4):741–760. <https://doi.org/10.1081/SS-120028444>
6. Patrakov Yu.F., Semenova S.A. Intensification of coal flotation by means of air microbubbles. *Coke and Chemistry*. 2021;64(2):64–68. <https://doi.org/10.3103/S1068364X21020046>
7. Gao Ya. Dashliborun A.M., Zhou J.Z., Zhang X. Formation and stability of cavitation microbubbles in process water from the oilsands industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021;60(7):3198–3209. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04795>
8. Liu J. *Self-absorbing Microbubble Generator*. CN2227985Y, 1996.
9. Li B., Tao D., Ou Z., Liu J. Cyclo-microbubble column flotation of fine coal. *Separation Science and Technology*. 2006;38(5):1125–1140. <https://doi.org/10.1081/SS-120018127>
10. Zhang R., Liu Sh., Zheng S. Characterization of nano-to-micron sized respirable coal dust: Particle surface alteration and the health impact. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;413:125447. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125447>
11. Patrakov Yu.F., Semenova S.A., Kharlampenkova Yu.A., Sozinov S.A. Determining the Wettability of Coal Surfaces. *Coke and Chemistry*. 2019;62(12):545–551. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19120081>
12. Артемьев В.Б., Еремин И.В., Гагарин С.Г. *Петрография углей и их эффективное использование*. М.: Недра; 2000. 334 с.

References

1. Klassen V.I. *Coal flotation*. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo po gornomu delu; 1963. 380 p. (In Russ.)
2. Laskowski J.S. *Coal flotation and fine coal utilization*. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 368 p.
3. Abramov A.A. *Collected works, Vol. 4, Flotation methods of enrichment*. Moscow: Gornaya kniga; 2017. 597 p. (In Russ.)
4. Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation. *Minerals Engineering*. 2017;112:19–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.020>
5. Tao D.E. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles – A review. *Separation Science and Technology*. 2004;39(4):741–760. <https://doi.org/10.1081/SS-120028444>
6. Patrakov Yu.F., Semenova S.A. Intensification of coal flotation by means of air microbubbles. *Coke and Chemistry*. 2021;64(2):64–68. <https://doi.org/10.3103/S1068364X21020046>
7. Gao Ya. Dashliborun A.M., Zhou J.Z., Zhang X. Formation and stability of cavitation microbubbles in process water from the oilsands industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021;60(7):3198–3209. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04795>
8. Liu J. *Self-absorbing Microbubble Generator*. CN2227985Y, 1996.
9. Li B., Tao D., Ou Z., Liu J. Cyclo-microbubble column flotation of fine coal. *Separation Science and Technology*. 2006;38(5):1125–1140. <https://doi.org/10.1081/SS-120018127>
10. Zhang R., Liu Sh., Zheng S. Characterization of nano-to-micron sized respirable coal dust: Particle surface alteration and the health impact. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;413:125447. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125447>
11. Patrakov Yu.F., Semenova S.A., Kharlampenkova Yu.A., Sozinov S.A. Determining the Wettability of Coal Surfaces. *Coke and Chemistry*. 2019;62(12):545–551. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19120081>
12. Artemiev V.B., Eremin I.V., Gagarin S.G. *Petrography of coals and their effective use*. Moscow: Nedra; 2000, 334 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Патраков Юрий Федорович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией научных основ технологий обогащения углей, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: yupat52@gmail.com

Семенова Светлана Александровна – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: semlight@mail.ru

Information about the authors

Yury F. Patrakov – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Laboratory of Scientific Bases of Coal Preparation Technologies, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: yupat52@gmail.com

Svetlana A. Semenova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Leading Research Associate, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: semlight@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.07.2023

Поступила после рецензирования: 14.08.2023

Принята к публикации: 17.08.2023

Article info

Received: 21.07.2023

Revised: 14.08.2023

Accepted: 17.08.2023