

УДК 662.749:622.765.063

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-840-847

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ НА ИХ ФЛОТИРУЕМОСТЬ

В.Н. Петухов, Н.Ю. Свечникова, О.В. Куклина, А.С. Пузина, Т.Н. Ахметзянов, Я.В. Гаврюшина

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: natasha-svechnikova@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 04.06.19, принята к печати 16.07.19

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Петухов В.Н., Свечникова Н.Ю., Куклина О.В., Пузина А.С., Ахметзянов Т.Н., Гаврюшина Я.В. Изучение влияния тонкодисперсных угольных шламов на их флотирруемость // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 840–847 doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-840-847

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследовано влияние физико-химических свойств тонкодисперсных угольных шламов ООО «ММК-УГОЛЬ» на их флотирруемость. **Метод.** Петрографический анализ углей осуществлялся с помощью анализатора петрографических свойств каменных углей SIAMS 620. Для выявления наличия основных функциональных групп в макромолекуле органической массы углей использован метод автоматизированного анализа углей по инфракрасным спектрам отражения. Электропроводность пульпы с измельченной пробой угля определялась с помощью анализатора жидкости АНИОН 4100. Флотационные исследования проводились в лабораторной флотационной машине типа ФМЛ-1 (НПК «Механобр-Техника», Россия). **Основные результаты.** Выявлен механизм действия новых реагентов при флотации тонкодисперсных угольных шламов. Установлено флокулирующее действие на минеральные частицы тонкодисперсных угольных шламов нового реагента «Синтерол», что значительно улучшает селективность процесса флотации. В лабораторных условиях разработан оптимальный режим флотации тонких угольных шламов, который позволит повысить ресурсоэффективность технологического процесса обогащения угля за счет снижения потери органической массы с отходами на 33 %. При этом расход потребляемых реагентов снижается в 3 раза. **Практическая значимость.** Эффективность реагента-флокулянта «Синтерол» была подтверждена промышленными испытаниями на ООО «ММК-УГОЛЬ» (Россия). При подаче реагента-флокулянта «Синтерол» в процесс флотации в количестве 0,001–0,003 кг/т и одновременном снижении общего расхода реагентов в среднем на 13,0 % с 3,000 до 2,613 кг/т выход концентрата увеличился на 2,5–8,5 %, зольность концентрата снизилась на 2,7–3,0 %, при этом зольность отходов увеличилась на 2,9–12,3 %.

### Ключевые слова

флотация, мелкодисперсные угольные частицы, адсорбция, физико-химические свойства, флокуляция

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-840-847

## EFFECT OF FINELY-DISPERSED COAL SLUDGES ON THEIR FLOATABILITY

V.N. Petukhov, N.Yu. Svechnikova, O.V. Kuklina, A.S. Puzina, T.N. Akhmetzyanov, Ya.V. Gavryushina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation  
 Corresponding author: natasha-svechnikova@yandex.ru

### Article info

Received 04.06.19, accepted 16.07.19

Article in Russian

**For citation:** Petukhov V.N., Svechnikova N.Yu., Kuklina O.V., Puzina A.S., Akhmetzyanov T.N., Gavryushina Ya.V. Effect of finely-dispersed coal sludges on their floatability. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 840–847 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-840-847

### Abstract

**Subject of Research.** We study the effect of physical and chemical properties of finely-dispersed coal sludges of “MMK-UGOL” on their floatability. **Method.** Petrographic analysis of coal was carried out using the analyzer of petrographic properties of SIAMS 620 coal. To identify the presence of the main functional groups in the macromolecule of the organic mass of coal, the method of automated analysis of coal by infrared reflection spectra (IR-spectrum) was used. The electrical conductivity of the pulp with a crushed coal sample was determined by ANION 4100 liquid analyzer. Flotation studies were carried out in

laboratory flotation machine of FML-1 type (Research and Production Company “Mechanobr-Technika”, Russia). **Main Results.** The action mechanism of new reagents in the flotation of finely-dispersed coal sludges has been identified. The flocculating action of “Sinterol” new reagent on the mineral particles of finely-dispersed coal sludges has been elucidated, that improves significantly the selectivity of the flotation process. The optimum flotation mode of thin coal sludges has been developed on the basis of laboratory researches, which increases resource efficiency of coal enrichment technological process due to the decrease in organic weight loss with waste by 33%. Thus, the consumption of the consumed reagents is reduced by 3 times. **Practical Relevance.** The efficiency of “Sinterol” reagent-flocculant has been confirmed by industrial tests on JSC MMK-COAL (Russia). Thus when applying “Sinterol” reagent-flocculant in the flotation process in an amount of 0.001–0.003 kg/t and simultaneously reducing the total consumption of reagents by an average of 13.0% from 3.000 to 2.613 kg/t, the concentrate yield has increased by 2.5–8.5%, the ash content of the concentrate has decreased by 2.7–3.0%, while the ash content of waste has increased by 2.9–12.3%.

#### Keywords

flotation, fine-dispersed coal particles, adsorption, physicochemical properties, flocculation

## Введение

В настоящее время проблема образования, накопления, хранения и утилизации отходов является для России крайне острой и затрагивает практически все ее регионы. В результате деятельности угольных обогатительных фабрик по разным причинам теряется с отходами до 960 тыс. т. угля в год.

Так, при добыче и обогащении углей образуются обводненные шламы, которые резко ухудшают показатели обогащения угольной мелочи, что приводит к значительному увеличению отходов обогащения.

Потребность в улучшении физико-механических свойств дисперсных угольных систем, составляющих шламы, обусловлена тем, что они обладают низкими адгезионными свойствами [1–4].

При наличии в пульпе тонких шламов наблюдаются следующие процессы:

1) загрязнение пенного продукта мелкими фракциями пустой породы;

2) увеличение расхода реагентов;

3) уменьшение скорости флотации;

4) в ряде случаев ухудшение флотации более крупных зерен и снижение качества хвостов вследствие низкой селективности флотации тончайших зерен.

В связи с этим разработка новых технологических решений, направленных на эффективную переработку шламов с целью получения товарного продукта с улучшенными потребительскими свойствами, что также позволит повысить ресурсоэффективность технологического процесса обогащения угля, является актуальной и имеет большое практическое значение [5, 6].

## Физико-химические свойства

В работе нами исследована проба исходного питания флотации ООО «ММК-УГОЛЬ», содержащей более 30 % тонкодисперсного угольного шлама. Определен технический<sup>1</sup> и петрографический анализ углей. Петрографический анализ осуществлялся в условия НТЦ ПАО «ММК» (г. Магнитогорск Челябинской обл.) с помощью анализатора петрографических свойств каменных углей SIAMS 620.

Технический анализ включал определение следующих показателей пробы исходного питания флотации углей: зольность ( $A^d$ ), содержание серы ( $S^d$ ), выход летучих веществ ( $V^{daf}$ ), а петрографический анализ: содержание витринита ( $Vt$ ), семивитринита ( $Sv$ ), иниргинита ( $I$ ), сумму отошающих компонентов ( $\Sigma OK$ ).

В табл. 1, 2 приведены технический, петрографический и ситовый анализ пробы, где видно, что распределение по классам крупности неравномерное, что оказывает отрицательное влияние на качественно-количественные показатели флотации и их нестабильность. При этом следует отметить, что содержание класса менее 0,05 мм составляет 34,0 %, причем данный класс более высокозольный, обуславливающий снижение селективности флотационного процесса.

Таблица 1. Показатели технического и петрографического анализа исходного питания флотации  $A^d$

Исходное питание флотации	Показатели, %						
	$A^d$	$V^{daf}$	$Vt$	$Sv$	$I$	$S^d$	$\Sigma OK$
	26,1	25,8	72	2	26	0,34	27

Для выявления наличия основных функциональных групп в макромолекуле органической массы углей, а также отдельных видов связей, определяющих энергетическую неоднородность поверхности исследуемых углей, был использован метод автоматизированного анализа углей по инфракрасным спектрам отражения (ИК-спектр) (рис. 1).

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53357-2013 (ИСО 17246:2010) Топливо твердое минеральное. Технический анализ. Введен. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2014. 9 с.

Таблица 2. Ситовый анализ питания флотации  $A^d = 26,1\%$ 

Класс, мм	Выход, %	Зольность, %	Суммарные показатели, %	
			Выход	Зольность
0,5–0,25	24,0	18,0	24,0	18,0
0,25–0,1	31,6	18,5	55,6	18,3
0,1–0,05	10,4	23,1	66,0	19,0
Менее 0,05	34,0	39,8	100,0	26,1
Итого	100,0	26,1	—	—

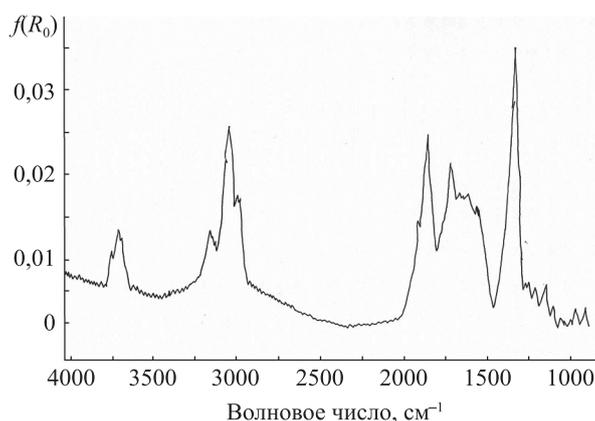


Рис. 1. Инфракрасный спектр исходного питания флотации

Полоса поглощения (максимум в спектре функции Кубелки–Мунка)  $f(R_0)$  в области  $3550\text{--}3750\text{ см}^{-1}$  соответствует С–ОН группам на поверхности угля, в области  $3050\text{--}3000\text{ см}^{-1}$  соответствует С–Н-группам в ароматических структурах, на  $3000\text{--}2750\text{ см}^{-1}$  соответствует С–Н-группам в алифатических структурах на поверхности угля, максимум на  $1600\text{ см}^{-1}$  — внутри плоскостным колебаниям С=C атомов углерода в графитоподобных системах, широкие полосы поглощения на  $1500\text{--}1000\text{ см}^{-1}$  — неоднозначное отнесение, но часть из них обусловлена валентными колебаниями С–Н атомов водорода в содержащих данные структуры [7].

По данным ИК-спектра можно сделать выводы о гетерополярности угольной поверхности, ее энергетической неоднородности, что оказывает существенное влияние на смачиваемость угольной поверхности и способность флотироваться.

Для изучения физико-химических свойств тонких угольных шламов и их влияния на показатели флотации проба исходного питания флотации была измельчена на дисковом истирателе до крупности менее  $70\text{ мкм}$ , так как данный класс считается наиболее труднообогатимым.

Известно, что снижение показателей флотации шламовых частиц обусловлено их повышенной удельной поверхностью. В работе удельная поверхность шлама была определена калориметрическим методом, основанным на измерении теплоты смачивания пробы водой с использованием лабораторного комплекса «Термостат». Установлено, что удельная поверхность шлама в 3,5 раза больше по сравнению с пробой крупностью менее  $0,5\text{ мм}$  (табл. 3).

Таблица 3. Определение удельной поверхности исследуемых проб

Исследуемый образец	Удельная поверхность $\times 10^{-3}$ , $\text{м}^2/\text{кг}$
Исходная проба (менее $0,5\text{ мм}$ )	19,81
Измельченная проба (менее $0,07\text{ мм}$ )	70,75

Адсорбционные свойства шламов определяли методом, основанным на способности поверхности твердых адсорбентов избирательно поглощать и концентрировать отдельные компоненты раствора.

Теоретически известно, что чем выше удельная поверхность адсорбента, тем больше величина адсорбции, однако авторами в работе было выявлено, что исследуемая проба угольного шлама имеет поглощательную способность ниже, чем проба исходного угля.

Это объясняется тем, что микропузырьки воздуха, адсорбированные на поверхности частиц, препятствуют контакту поверхности с реагентом, что приводит к закупорке тонких пор, а также вследствие плохой смачиваемости частицы угольного шлама образуют флоккулы более крупного размера, чем исходный уголь, что также затрудняет контакт реагента с углем.

Это также подтвердилось изучением электропроводности угольной пульпы. Известно, что при контакте угольных частиц с водой в ней растворяются минеральные примеси, содержащиеся в угле, что несколько увеличивает электропроводность пульпы.

Однако электропроводность пульпы с измельченной пробой угля, определенной с помощью анализатора жидкости АНИОН 4100, снизилась с 156,3 до 121 мкСм/см по сравнению с исходным углем, что также подтверждает флокуляцию и плохую смачиваемость угольных шламов.

### Флотационные свойства

Одним из явлений, связанных с наличием большого количества тонких угольных шламов, является пониженная скорость флотации шламовых частиц, которая связана с их большой удельной поверхностью. Флотация протекает медленно, часть тонких шламов не успевает сфлотироваться и теряется в хвостах.

Флотационные исследования проводили в лабораторной флотационной машине типа ФМЛ-1 (НПК «Механобр-Техника») с объемом камеры 0,5 дм<sup>3</sup>, число оборотов импеллера 15–40 Гц при температуре 20°С.

По результатам флотации определяли следующие характеристики:

- $A_{\text{к}}^d, A_{\text{исх}}^d, A_{\text{отх}}^d$  — зольность концентрата, исходного угля и отходов соответственно, %;
- $\gamma_{\text{к}}, \gamma_{\text{отх}}$  — выход концентрата и выход отходов соответственно, %;
- зольность отходов флотации:  $A_{\text{отх}}^d = (100 \times A_{\text{исх}}^d - \gamma_{\text{к}} \times A_{\text{к}}^d) / \gamma_{\text{отх}}$ ;
- извлечение горючей массы в концентрат:  $\varepsilon_{\text{г.м.}} = \gamma_{\text{к}} \times (100 - A_{\text{к}}^d) / (100 - A_{\text{исх}}^d)$ ;
- коэффициент селективности:  $\eta_{\text{с}} = (A_{\text{отх}}^d - A_{\text{к}}^d) / (100 - A_{\text{исх}}^d)$ .

Относительная ошибка зольности<sup>1</sup> определялась по пяти параллельным опытам при доверительной вероятности 0,95 и не превышала 0,5 %.

Исследование флотуемости угольной мелочи позволило установить пониженную скорость флотации угольного шлама (рис. 2).

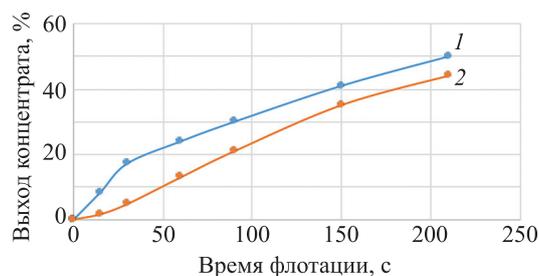


Рис. 2. Кинетика флотации угольной мелочи.

Расход собирателя 2,3 кг/т; расход вспенивателя 0,15 кг/т: 1 — крупность угля менее 0,5 мм; 2 — крупность угля менее 0,07 мм

Кроме того, тонкие шламовые частицы в силу большой удельной поверхности поглощают из пульпы гораздо большее количество реагентов, чем крупные, что ухудшает показатели флотации.

Так, при флотации пробы, содержащей 20 % измельченного до менее 0,07 мм угля с применением используемого традиционного режима, выход отходов увеличивается с 23,6 до 53,0 %, при этом резко снижается качество концентрата (табл. 4), поэтому использование традиционных реагентных режимов нецелесообразно.

Таблица 4. Результаты флотации тонкодисперсного угольного шлама

Проба угля	Расход реагентов, кг/т			Показатели флотации				
	Собиратель «Флотек»	Вспениватель «Флотек»	Общий	Продукты флотации	Выход, %	Зольность, %	Извлечение горючей массы в концентрат, %	Коэффициент селективности
Исходный на флотацию (менее 0,5 мм)	2,3	0,15	2,45	Концентрат	76,4	6,8	88,3	0,662
				Отходы	23,6			
80 % исходного + 20 % измельченного (менее 0,07 мм)	2,3	0,15	2,45	Концентрат	47,0	15,2	50,7	0,154
				Отходы	53,0			

<sup>1</sup> ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности (с Изменением N 1). Введен. 01.01.1997. М.: Стандартинформ, 2006. 8 с.

Для предотвращения отрицательного влияния тонких шламов на флотацию в работе были исследованы следующие методы:

- 1) использование более эффективных реагентов-собирателей;
- 2) добавление флокулянтов, с целью образования макрохлопьев (флокул) из взвешенных в угольной пульпе частиц;
- 3) применение более разбавленных пульп, уменьшающее переход тонких частиц пустой породы в пену.

Использование более эффективного реагента-собирателя ТПД (тяжелый полимер дистиллят) [8], продукта нефтяной переработки, в количестве 1–1,5 кг/т увеличивает выход концентрата до 85,2 %, однако зольность концентрата при этом неудовлетворительная (табл. 5), это объясняется снижением селективности флотации мелкодисперсных угольных частиц.

Таблица 5. Результаты флотации тонкодисперсного угольного шлама с использованием ТПД

Расход реагентов, кг/т				Показатели флотации			
Собиратель ТПД	Собиратель «Флотек»	Вспениватель «Флотек»	Общий	Продукты флотации	Выход, %	Зольность, %	Извлечение горючей массы в концентрат, %
—	2,3	0,15	2,45	Концентрат	47,0	15,2	50,7
				Отходы	53,0	39,3	
1,0	—	0,15	1,15	Концентрат	84,5	15,2	91,4
				Отходы	15,5	97,7	
1,5	—	0,15	1,65	Концентрат	85,2	15,9	91,4
				Отходы	14,8	97,6	

Исследования осаждения тонкодисперсной угольной мелочи в воде позволило установить значительное повышение скорости осаждения угольных частиц при добавке в процесс флокулянта за счет флокуляции тонкодисперсных минеральных частиц угля (рис. 3). В качестве флокулянта исследовали технический продукт нефтехимии «Синтерол», выпускаемый на «Салаватнефтеоргсинтез» (республика Башкортостан) [9–14].

Увеличение скорости осаждения шламовых частиц при подаче «Синтерола» указывает на значительный рост флокул, что оказывает положительное влияние на показатели флотации угольной мелочи.

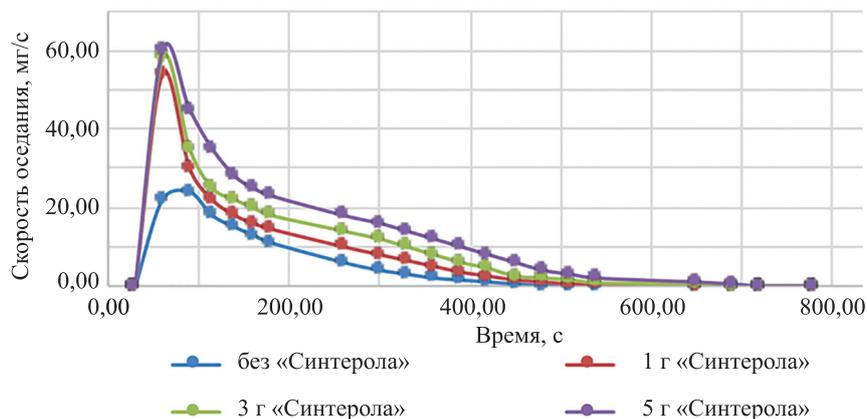


Рис. 3. Влияние реагента «Синтерол» на флокуляцию минеральных частиц угольной мелочи

Одним из важных факторов, влияющих на флотацию, является содержание в пульпе твердого, при чрезмерном увеличении плотности пульпы резко ухудшается аэрация пульпы, что ухудшает качество концентрата. Флотация разбавленных пульп позволяет обычно получать более чистые концентраты, но извлечение при этом снижается.

Изучения влияния плотности пульпы на показатели флотации пробы, содержащей 20% угольного шлама, показали, что при разбавлении со 100 до 60 кг/м<sup>3</sup> выход отходов уменьшается в два раза, при этом зольность концентрата снижается на 1,3 % (табл. 6).

В результате лабораторных исследований методов предотвращения отрицательного влияния тонких шламов на флотацию, таких как использование более эффективных реагентов-собирателей, добавление

флокулянтов и применение более разбавленных пульп в работе был подобран реагентный режим, позволяющий получить концентрат, удовлетворяющий требованиям коксохимического производства (табл. 7).

Таблица 6. Влияние плотности пульпы на показатели флотации пробы, содержащей 20 % измельченного до менее 0,07 мм исходного угля

Плотность пульпы, кг/м <sup>3</sup>	Расход реагентов, кг/т					Продукты флотации	Показатели флотации		
	Собиратель		Вспениватель		Общий		Выход, %	Зольность, %	Извлечение горючей массы в концентрат, %
100	ТПД	1,0	«Флотек»	0,15		1,15			
					Отходы		41,4	46,1	
70					Концентрат		62,8	14,0	75,0
					Отходы		37,2	51,6	
60					Концентрат		77,7	13,9	92,9
					Отходы		22,3	77,1	

Так, при плотности исходного питания 60 кг/м<sup>3</sup> использование эффективного реагента собирателя ТПД в количестве 0,7 кг/т и модификатора «Синтерол» в количестве 0,001 кг/т позволило увеличить выход концентрата до 80,0 % при удовлетворительной зольности концентрата 12,5 %.

Таблица 7. Оптимальный режим флотации пробы, содержащей угольный шлам

Плотность пульпы, кг/м <sup>3</sup>	Расход реагентов, кг/т				Показатели флотации				
	Собиратель		Вспениватель «Флотек»	Модификатор «Синтерол»	Общий	Продукты флотации	Выход, %	Зольность, %	Извлечение горючей массы в концентрат, %
100	«Флотек»	2,3	0,15	—					
					Отходы	53,0	27,3		
60	ТПД	0,7		0,001	0,851	Концентрат	80,1	12,5	97,3
						Отходы	19,9	90,3	

## Заключение

В работе изучены физико-химические свойства тонкодисперсных угольных шламов ООО «ММК-УГОЛЬ».

Для предотвращения отрицательного влияния тонких шламов на флотацию исследовано добавление флокулянтов, применение более разбавленных пульп.

Установлено флокулирующее действие на минеральные частицы тонкодисперсных угольных шламов нового реагента «Синтерол», что значительно улучшает селективность процесса флотации.

В лабораторных условиях подобран оптимальный режим флотации тонких угольных шламов, который позволит повысить ресурсоэффективность технологического процесса обогащения угля за счет снижения потери органической массы с отходами на 33 % при снижении расхода потребляемых реагентов в 3 раза.

Промышленные испытания, проведенные на ООО «ММК-УГОЛЬ», подтвердили эффективность реагента-флокулянта «Синтерол». При расходе реагента-флокулянта «Синтерол» в процессе флотации в количестве 0,001–0,003 кг/т и одновременном снижении общего расхода реагентов с 3,000 до 2,613 кг/т выход концентрата увеличился на 2,5–8,5 %, зольность концентрата снизилась на 2,7–3,0 %, при этом зольность отходов увеличилась на 2,9–12,3 %.

## Литература

- Li H., Afacan A., Liu Q., Xu Z. Study interactions between fine particles and micron size bubbles generated by hydrodynamic cavitation // *Minerals Engineering*. V. 84. P. 106–115. doi: 10.1016/j.mineng.2015.09.023
- Thomas J., Hajdukova J., Malikova P., Jiří V., Matúšková V. The study of the interaction between flotation tailings and flocculants

## References

- Li H., Afacan A., Liu Q., Xu Z. Study interactions between fine particles and micron size bubbles generated by hydrodynamic cavitation. *Minerals Engineering*, vol. 84, pp. 106–115. doi: 10.1016/j.mineng.2015.09.023
- Thomas J., Hajdukova J., Malikova P., Jiří V., Matúšková V. The study of the interaction between flotation tailings and

- in separation process of coal // *Inzynieria Mineralna*. 2014. V. 15. N 1(33). P. 259–268.
3. Kumar S., Bhattacharya S., Mandre N.R. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. V. 114. N 11. P. 945–949.
  4. Orug F., Sabah E. Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings // *Proc. 23<sup>rd</sup> International Mineral Processing Congress, IMPC 2006*. Istanbul, Turkey, 2006. P. 1192–1197.
  5. Петухов В.Н. Основы теории и практика применения флотационных реагентов при обогащении углей для коксования. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016. 454 с.
  6. Свечникова Н.Ю., Петухов В.Н., Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Изучение влияния технологических параметров процесса флотации на качественно-количественные показатели продуктов флотации угля // *Сборник тезисов докладов VII международного российско-казахстанского симпозиума «Углекислотная и экология Кузбасса»*. Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2018. С. 84–85.
  7. Бехтерев А.В. Колебательные состояния в конденсированном углероде и наноуглероде. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2007. 210 с.
  8. Петухов В.Н., Захаров И.В., Сирченко А.С., Азнабаева Г.В., Осина Н.Ю., Рахимова И.М., Юдин В.П. Способ флотации угля. Патент RU 2306982 C1. Бюл. 2007. № 27.
  9. Свечникова Н.Ю., Кухаренко О.Г., Куклина О.В., Хасанзянова А.И. Изучение физико-химических свойств тонкодисперсных угольных шламов // *Сборник тезисов докладов 76-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»*. Т. 2. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. С. 9–10.
  10. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Кунилова И.В., Раджабов М.М., Дормидонтова В.Н., Свечникова Н.Ю., Басарыгин В.И., Басарыгин М.В. Ступение отходов флотации углей различного состава с применением анионоактивных и катионоактивных флокулянтов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № 12. С. 248–259.
  11. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Свечникова Н.Ю., Агарков И.И. Совершенствование технологий ступения и обезвоживания отходов флотации углей с применением флокулянтов // *Сборник тезисов докладов 76-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»*. Т. 2. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. С. 6–7.
  12. Петухов В.Н., Сирченко А.С., Юнаш А.А., Саблин А.В. Применение полимерных соединений различной структуры в качестве реагентов-модификаторов при флотации каменноугольной мелочи // *Башкирский химический журнал*. 2007. Т. 14. № 2. С. 108–112.
  13. Саблин А.В., Петухов В.Н. Об изменениях в структуре воды, вызванных реагентом флотации ПАВ-1 // *Кокс и химия*. 2009. № 3. С. 31–36.
  14. Петухов В.Н., Смирнов А.Н., Харченко В.Ф., Степанов Е.Н. Способ обогащения угля. Патент RU № 2620503 C1. Бюл. 2017. № 15.
  - flocculants in separation process of coal. *Inzynieria Mineralna*, 2014, vol. 15, no. 1(33), pp. 259–268.
  3. Kumar S., Bhattacharya S., Mandre N.R. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2014, vol. 114, no. 11, pp. 945–949.
  4. Orug F., Sabah E. Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings. *Proc. 23<sup>rd</sup> International Mineral Processing Congress, IMPC 2006*. Istanbul, Turkey, 2006, pp. 1192–1197.
  5. Petukhov V.N. *Basics on the theory and practice of using flotation reagents in the enrichment of coal for coking*. Magnitogorsk, Novos Magnitogorsk State Technical University, 2016, 453 p. (in Russian)
  6. Svechnikova N.Yu., Petukhov V.N., Smirnov A.N., Alekseev D.I. Investigation on the influence of technological parameters of the flotation process on the qualitative and quantitative indicators of coal flotation products. *Proc. VII International Russian-Kazakhstan Symposium “Coal Chemistry and Ecology of Kuzbass”*. Kemerovo, FIC UUH SB RAS, 2018, pp. 84–85. (in Russian)
  7. Bekhterev A.V. *Vibrational states in condensed carbon and nanocarbon*. Magnitogorsk, Novos Magnitogorsk State Technical University, 2007, 210 p. (in Russian)
  8. Petukhov V.N., Zakharov I.P., Sirchenko A.S., Aznabaeva G.V., Osina N.J., Rakhimova I.M., Judin V.P. Coal flotation process. *Patent RU 2306982 C1*, 2007. (in Russian)
  9. Svechnikova N.Yu., Kukhareno O.G., Kuklina O.V., Khasanzyanova A.I. The study of the physicochemical properties of finely divided coal sludge. *Actual problems of modern science, technology and education: abstracts of the 76<sup>th</sup> international scientific and technical conference. Vol. 2*. Magnitogorsk, Novos Magnitogorsk State Technical University, 2018, pp. 9–10. (in Russian)
  10. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Kunilova I.V., Radzhabov M.M., Dormidontova V.N., Svechnikova N.Yu., Basarygin V.I., Basarygin M.V. Thickening of fine coal tailings with different composition using anionic and cationic flocculants. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2016, no. 12, pp. 248–259. (in Russian)
  11. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Svechnikova N.Yu., Agarkov I.I. Improving the technology of thickening and dewatering coal flotation waste using flocculants. *Actual problems of modern science, technology and education: abstracts of the 76<sup>th</sup> international scientific and technical conference. Vol. 2*. Magnitogorsk, Novos Magnitogorsk State Technical University, 2018, pp. 6–7. (in Russian)
  12. Petukhov V.N., Sirchenko A.S., Yunash A.A., Sablin A.V. Application of polymeric substances of various structures as reagents modifiers at flotation of a slack coal. *Bashkir chemistry journal*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 108–112. (in Russian)
  13. Sablin A.V., Petukhov V.N. Changes in the structure of water induced by PAV-1 flotation reagent. *Coke and Chemistry*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 116–120. doi: 10.3103/S1068364X09030065
  14. Petukhov V.N., Smirnov A.N., Kharchenko V.F., Stepanov E.N. Method of coal improvement. *Patent RU 2620503*, 2017. (in Russian)

**Авторы**

**Петухов Василий Николаевич** — доктор технических наук, профессор, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация, Scopus ID: 7102541807, ORCID ID: 0000-0002-5585-1174, chief.petuhov2013@yandex.ru  
**Свечникова Наталья Юрьевна** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация, Scopus ID: 36173610800, ORCID ID: 0000-0001-9821-3183, natasha-svechnikova@yandex.ru

**Authors**

**Vasily N. Petukhov** — D.Sc., Full Professor, Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation, Scopus ID: 7102541807, ORCID ID: 0000-0002-5585-1174, chief.petuhov2013@yandex.ru

**Natalia Yu. Svechnikova** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation, Scopus ID: 36173610800, ORCID ID: 0000-0001-9821-3183, natasha-svechnikova@yandex.ru

**Куклина Ольга Валерьевна** — студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9922-1713, olechkakuklina@yandex.ru

**Пузина Арина Сергеевна** — студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5201-3845, rina\_puzina@mail.ru

**Ахметзянов Тимур Наилевич** — студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4051-2890, ahmetzyanovtimur3@gmail.ru

**Гаврюшина Яна Витальевна** — студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1450-7668, manadona83@yandex.ru

**Olga V. Kuklina** — student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9922-1713, olechkakuklina@yandex.ru

**Arina S. Puzina** — student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5201-3845, rina\_puzina@mail.ru

**Timur N. Akhmetzyanov** — student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4051-2890, ahmetzyanovtimur3@gmail.ru

**Yana V. Gavryushina** — student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1450-7668, manadona83@yandex.ru