

УДК 622.765.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ РЕАГЕНТОВ  
РАЗЛИЧНОГО ГРУППОВОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
ПРИ ФЛОТАЦИИ УГОЛЬНОГО ШЛАМА ТРУДНОЙ ОБОГАТИМОСТИ**

**Т. А. Хамзина С. А. Кондратьев**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: kondr@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Выполнен поиск критериев собирательной активности реагентов-собирателей для флотации угольного шлама. Исследовалась собирательная способность керосина, солярового масла, термогазойля, КЭТГОЛа и ФЛОТЭКа. Определены показатели флотации угольного шлама указанными реагентами и найдены скорости движения фронта их пленок по поверхности воды. Установлена корреляционная связь скорости растекания флотационных реагентов-собирателей с показателями флотационного обогащения угольного шлама. Предложена новая концепция элементарного акта флотации и критерий флотационной активности реагентов для флотации угля.

*Флотация, угольный шлам, керосин, соляровое масло, термогазойль, КЭТГОЛ, ФЛОТЭК, собирательная активность реагента*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210412

---

Один из путей повышения рентабельности и доходности угледобывающей промышленности России в настоящее время — разработка технологий глубокой переработки углей, обеспечивающих максимальный выход из них товарной продукции. Решение этой задачи требует внедрения новых технологий в сферу переработки углей и получения продуктов с высокой добавленной стоимостью. В области флотационного обогащения важнейшей задачей является поиск новых селективных реагентов-собирателей, обеспечивающих получение низкосолевых концентратов, отвечающих требованиям потребителей. Современное состояние проблемы флотационных реагентов в угольной промышленности, несмотря на широкое их применение, нельзя признать удовлетворительным. Изучению механизма работы реагентов-собирателей для флотации угольного шлама посвящено большое число исследований, но разработка научных основ их выбора далека от завершения. Применяемые методы выбора флотационных реагентов основаны на экспериментальных исследованиях. Этим в значительной степени можно объяснить невысокие показатели флотации угольного шлама на многих обогатительных фабриках. Поэтому одна из главных научных проблем в области флотации угольного шлама — раскрытие зависимости флотационной активностью реагентов-собирателей от их физико-химических параметров и разработка выбора активных реагентов.

В качестве собирателей при флотации угольного шлама используются аполярные реагенты: керосин, дизельное топливо, каталитический газойль, РСО, фракция  $C_{10+}$  высших ароматических углеводородов и др. [1, 2]. Аполярные реагенты представлены неполярными молекулами, взаимодействие которых осуществляется дисперсионными силами Ван-дер-Ваальса. К этой группе можно отнести реагенты, состоящие из дипольных молекул, но с увеличенным количеством атомов углерода в углеводородной цепи.

Примером таких реагентов являются средние и высшие спирты, карбоновые кислоты. Данные вещества не растворяются в воде и ведут себя аналогично реагентам-собирателям, состоящим из аполярных молекул. Ассортимент аполярных масел довольно широк. По своему химическому составу — это ациклические, нафтеновые, терпеновые и ароматические углеводороды, в которых отсутствуют полярные гидратированные группы. Они слабо взаимодействуют с диполями воды. В молекулах аполярных соединений атомы имеют небольшую разницу электроотрицательностей и между ними действуют только ковалентные связи. Из-за отсутствия полярных групп аполярные реагенты-собиратели не могут формировать на поверхности минералов ориентированные адсорбционные слои, их закрепление происходит по правилу уравнивания полярностей граничащих сред.

Предполагается, что аполярные реагенты оказывают влияние на образование флотационных комплексов и их сохранность в турбулентных потоках пульпы. Они гидрофобизируют поверхность, усиливают прочность закрепления угольных частиц на пузырьках, регулируют пенообразование. Общие представления о гидрофобизации поверхности аполярным реагентом изложены в [3].

Сохранность флотационных комплексов в турбулентных потоках пульпы объясняют явлениями гистерезиса [1, 4]. Гистерезисный механизм работы аполярных реагентов-собирателей вызывает повышение крупности извлекаемых частиц реагентами повышенной вязкости с изменением скорости перемещения линии смачивания по поверхности угля. В динамических условиях отрыва частиц от пузырька снижение скорости стягивания периметра контакта трех агрегатных состояний обусловлено увеличением вязкостных сил, препятствующих движению периметра.

Ряд исследователей считает, что упрочнение контакта “частица–пузырек” при добавках углеводородов происходит в результате уменьшения капиллярного давления в пузырьке [5, 6]. Отрывающая сила, равная произведению площади контакта на давление в пузырьке, уменьшается. Дополнительно в динамических условиях происходит увеличение капиллярной силы в результате растяжения поверхности пузырька, прилегающей к угольной частице. Концентрация собирателя вдоль периметра контакта трех агрегатных состояний снижается. Восстановление поверхностного натяжения по периметру контакта увеличивает флотационную силу.

Во флотации углей широкое распространение получили гетерополярные собиратели, обладающие одновременно высокими собирательными и пенообразующими свойствами, так называемые комплексные реагенты. Об их флотационной активности можно судить по расходу на тонну угля, если для аполярных реагентов он составляет 1000–3000 г, то для гетерополярных — 30–250 г. [7]. Принято считать, что преимущество гетерополярных реагентов заключается в их способности к закреплению на энергетически неоднородных центрах поверхности угля [8]. Закрепление полярного атома или функциональной группы гетерополярного собирателя осуществляется за счет водородных, координационных или донорно-акцепторных связей. Предполагается, что такие реагенты более предпочтительны для использования во флотации углей низкой степени метаморфизма. Их применение обеспечивает большую сорбцию, гидрофобизацию поверхности угля и эффективность флотации. Необходимость достаточно длинного ( $C \sim 8-14$ ) углеводородного радикала объясняется дополнительной гидрофобизацией поверхности угольного шлама.

В [9] запатентован комплексный реагент-собирающий КЭТГОЛ (кубовые остатки производства изооктилового спирта, 2-этилгексанола), содержащий в своем составе спирты и альдегиды с длиной углеводородной цепи С 8–11. Реагент обладает высокой собирающей способностью и поверхностной активностью по отношению к границе раздела “газ–жидкость”, т. е. может установить энергетическую связь с гидрофобной поверхностью угля и с полярными молекулами жидкости. На угле, находящемся в воде, реагент не растекается и находится на нем в форме микрокапель.

Связь поверхностной активности комплексных реагентов собирающих-пенообразователей с их флотационной активностью исследовалась в [10]. Все реагенты, обладающие повышенной активностью по отношению к границе раздела “газ–жидкость” и умеренной пенообразующей способностью, показали высокую флотационную эффективность. Авторы установили, что наиболее флотоактивные реагенты-собирающие должны обладать достаточно высокой поверхностной активностью (не менее 0.005 Дж·м/кг) и оптимальной пенообразующей способностью.

Зависимость собирающей активности от длины аполярного фрагмента химически чистых углеводородов предельного, непредельного и ароматического ряда изучена в [11]. Для алканов оптимальное количество атомов углерода в углеводородной цепи составило 8, 9; для олефинов и аренов 11, 12. Собирающий с таким количеством атомов является поверхностно-активным по отношению к границе раздела “газ–жидкость”, обладает способностью растекаться по указанной границе и адсорбироваться на гидрофобных поверхностях.

В [12, 13] исследовался механизм работы физически сорбированных форм собирающего в флотации рудных минералов. Показано, что основное назначение указанной формы сорбции собирающего — удаление прослойки жидкости, заключенной между минеральной частицей и пузырьком воздуха. Наиболее флотационно активные собирающие — соединения, обладающие высокой активностью по отношению к границе раздела “газ–жидкость” и скоростью растекания по ней, слабой растворимостью.

Цель работы — определение связи поверхностно-активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” свойств реагентов-собирающих с их собирающей способностью, поиск критерия, связывающего флотационные свойства углеводородов с их физико-химическими характеристиками.

#### МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Определение скорости растекания флотационных реагентов по поверхности воды методом скоростной съемки проводилось на установке, представляющей собой кювету с дистиллированной водой (рис. 1).



Рис. 1. Установка по определению скорости растекания аполярных и гетерополярных реагентов-собирающих по поверхности воды

Кювета устанавливалась под камерой, которая могла записывать видеофайл растекания реагентов. Определялись скорости растекания керосина, солярового масла, термогазойля, КЭТГОЛа и ФЛОТЭКа. Для этого флотационные реагенты на кончике иглы переносились на поверхность воды, находящейся в кювете. Съемка выполнялась высокоскоростной камерой evercam 4000-16-с. Видео записывалось в разрешении 1280×304 со скоростью 3845 кадр/с.

Групповой химический состав флотационных реагентов представлен ниже, %:

• *аполярные реагенты:*

— предельные углеводороды:

ароматические — керосин 15.0; соляровое масло 10.0; термогазойль 50.0;

парафиновые: термогазойль 10.0;

нафтеновые: керосин 33.0; соляровое масло 35.0; термогазойль 10.0;

алифатические: керосин 50.0; соляровое масло 53.0; термогазойль 27.5;

— непредельные углеводороды: керосин 2.0; соляровое масло 2.0; термогазойль 2.5;

• *гетерополярные реагенты:*

— смесь первичных спиртов алифатического и этиленового ряда (2-этилгексанол): КЭТГОЛ — 15.0; ФЛОТЭК — нет;

— смесь высокомолекулярных спиртов  $C_9-C_{12}$ : КЭТГОЛ — 85.0; ФЛОТЭК — нет;

— смесь алифатических спиртов, сложных и простых эфиров, углеводородов и присадок: КЭТГОЛ — нет; ФЛОТЭК — 100.

Физико-химические свойства реагентов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-химические свойства флотационных реагентов

Реагент	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup> , не менее	Температура кипения, °С	Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с
Керосин	0.850	200	3
Соляровое масло	0.880	240–400	4
Термогазойль	0.915	200–500	6
КЭТГОЛ	0.800	120–290	8
ФЛОТЭК	0.915	160–370	11

Флотационные эксперименты выполнялись на угольном шламе технологической марки СС, пласт Волковский ОФ “Барзасская”. Флотация угольного шлама осуществлялась в лабораторной флотационной машине ФМП-Л1 объемом 0.75 л. Крупность флотируемого материала 0–0.5 мм. Расход реагентов-собирателей во флотационных экспериментах постоянный 1300 г/т угольного шлама. Для проведения экспериментов на угольном шламе отобраны представительные пробы класса 0–0.5 мм от шихты рядовых углей и реального питания флотации, перерабатываемого на ОФ “Барзасская”. Зольность угольного шлама 26.20 %, категория обогатимости шлама — трудная.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С помощью установки (рис. 1) найдена скорость растекания исследуемых реагентов по поверхности воды. На рис. 2 показаны изменения движения фронта пленки в зависимости от времени. Флотационные эксперименты проводились для оценки собирательной активности исследуемых реагентов и сопоставления ее со скоростью растекания по границе раздела “газ–жидкость”. Использовалась лабораторная флотационная машина с объемом камеры 0.75 л, скоростью вращения импеллера 1500 об/мин при постоянной температуре пульпы в пределах

19–20 °С согласно методике [14]. Плотность исходного питания 100 г/л, время флотации 5 мин. Проведено пять опытов с реагентами. После флотации пенный и камерный продукт сушили и взвешивали. В качестве технологических показателей флотации определялись: выход флотоконцентрата  $\gamma_k$ , зольность флотоконцентрата  $A_k^d$ , извлечение горючей (полезной) массы в концентрат  $E_{г.м}$ , зольность остатков (отходов) флотации  $A_{отх}^d$ .

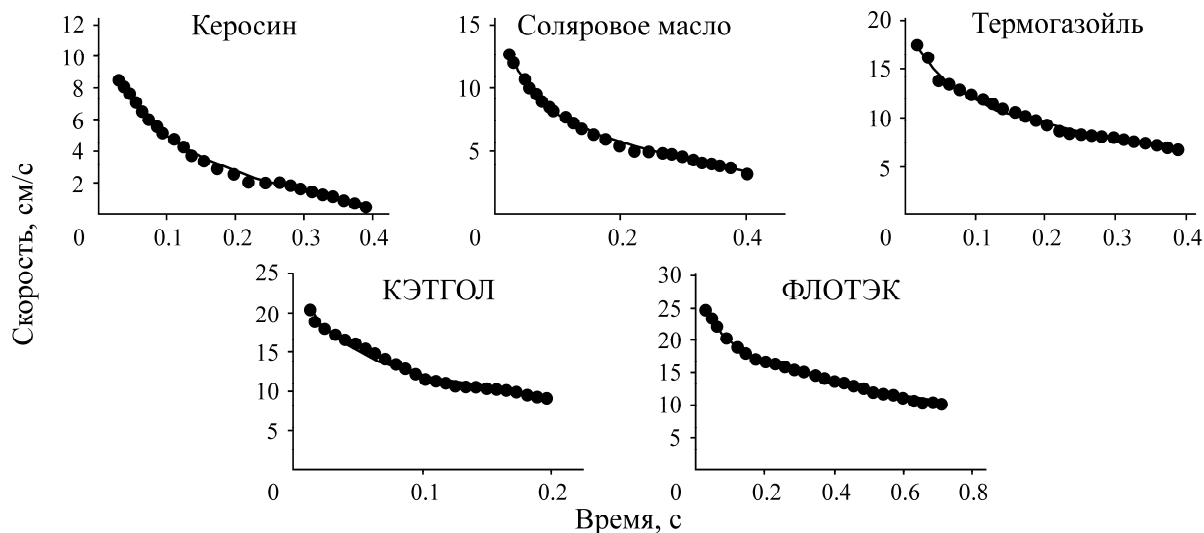


Рис. 2. Скорость растекания аполярных и гетерополярных реагентов-собираателей по поверхности воды в зависимости от времени

Расчеты выполнялись по формулам:

$$A_k^d = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}, \quad (1)$$

здесь  $m_1$  — масса прокаленной лодочки, г;  $m_2$  — масса лодочки с навеской угля, г;  $m_3$  — масса лодочки с остатком после прокаливания, г;

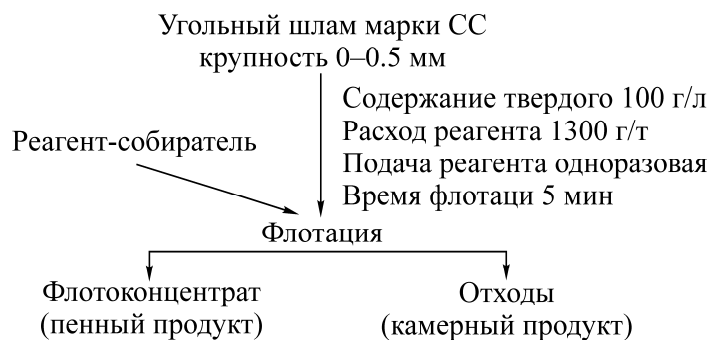
$$E_{г.м} = \gamma_k \frac{100 - A_k^d}{100 - A_{исх}^d}, \quad (2)$$

$A_{исх}^d$  — зольность исходного угольного шлама, %;

$$A_{отх}^d = \frac{100A_{исх}^d - \gamma_k A_k^d}{\gamma_{отх}}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{отх}$  — выход отходов флотации, %.

Схема флотационного эксперимента:



В табл. 2 приведены результаты флотации угольного шлама исследуемыми реагентами-собирателями.

ТАБЛИЦА 2. Результаты флотации угольного шлама, %

Номер опыта	Собиратель	Расход собирателя, г/т	Исходная зольность угольного шлама	Концентрат		Отходы		Извлечение горючей массы в концентрат $E_{Г.М.}$
				Выход	Зольность	Выход	Зольность	
1	Керосин	1300	26.20	59.60	16.31	40.40	40.30	67.59
2	Соляровое масло	1300	26.20	69.26	12.44	30.74	56,55	82.17
3	Термогазойль	1300	26.20	73.62	9.40	26.38	72.33	90.38
4	КЭТГОЛ	1300	26.20	74.30	9.12	25.70	74.80	91.50
5	ФЛОТЭК	1300	26.20	77.77	8.71	22.23	86.49	96.20

Извлечение горючей массы в концентрат и скорость растекания аполярных и гетерополярных реагентов-собирателей отражены на рис. 3.



Рис. 3 Извлечение горючей массы в концентрат (1) и скорость растекания флотационных реагентов-собирателей (2)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлена корреляционная связь между извлечением горючей массы в концентрат и скоростью растекания исследованных собирателей по поверхности воды (рис. 6). Из этого следует, что реагенты-собиратели угольного шлама выполняют функцию физически сорбированных собирателей, механизм которых раскрывается в [12, 13]. Показано, что указанная форма сорбции собирателя на поверхности минеральных частиц необходима для снятия кинетического ограничения образованию флотационного контакта. Под снятием кинетического ограничения подразумевается удаление прослойки жидкости, заключенной между объектами взаимодействия. Необходимость использования физически сорбированных собирателей для флотации гидрофобных или гидрофобизированных частиц доказана в [14]. Количественная характеристика смачивания поверхности определяется косинусом краевого угла  $\cos \theta = (\sigma_{SG} - \sigma_{SL}) / \sigma_{LG}$ . Для

перемещения периметра контакта трех агрегатных состояний и осушения минеральной поверхности под пузырьком необходимо уменьшить разность поверхностных натяжений  $\sigma_{SG} - \sigma_{SL}$ . Во флотации рудных минералов это достигается повышением  $\sigma_{SL}$  за счет применения реагента гидрофобизатора. Одновременно происходит понижение  $\sigma_{SG}$  до значения, близкого к поверхностному натяжению углеводородов. Осушение минерала реализуется при выполнении неравенства  $\sigma_{SG} - \sigma_{SL} < \sigma_{LG} \cos \theta_R^D$ , которое происходит при достижении контактным углом  $\theta$  значения  $\theta_R^D$  динамического отступающего угла. Повышение степени гидрофобности целевых минералов (рост  $\sigma_{SL}$  и понижение  $\sigma_{SG}$ ) одновременно приводит к увеличению  $\theta$  и уменьшению значения  $\cos \theta$ . На природно-гидрофобной поверхности угля значение  $\cos \theta$  и разность поверхностных натяжений  $\sigma_{SG} - \sigma_{SL}$  изначально сравнительно малы. Самопроизвольного осушения поверхности не происходит, для этого необходимо уменьшение  $\theta$  до значения динамического отступающего угла. Физически переход от  $\theta$  к  $\theta_R^D$  означает поворот вектора силы, обусловленной поверхностным натяжением на границе раздела “газ – жидкость”, к грани частицы угля. Задачу удаления жидкости из прослойки после ее локального прорыва и поворот вектора силы, действующей на границе раздела “газ – жидкость”, выполняет физически сорбированный собиратель. Следовательно, физически сорбируемый собиратель должен обладать активностью по отношению к границе раздела “газ – жидкость” и высокой скоростью растекания по ней.

Наиболее высокие показатели флотации угольного шлама получены с использованием реагента ФЛОТЭК. При равном расходе реагентов применение реагента ФЛОТЭК позволило увеличить выход концентрата с 59.60 % (керосин) до 77.77 % (ФЛОТЭК). Повышенные показатели флотации с реагентом ФЛОТЭК обусловлены его высокой скоростью растекания по поверхности воды — 24.3 см/с и малой растворимостью. Аполярные собиратели имеют меньшую скорость растекания по границе раздела “газ – жидкость” и меньшую собирательную способность. Для получения необходимого извлечения требуется увеличение расхода собирателя.

Механизм работы физически сорбированного собирателя в элементарном акте флотации дает новый взгляд на известные экспериментальные факты. Гидрофобизация угольной поверхности аполярным реагентом в результате слипания отдельных микрокапель подтверждена экспериментально. Площадь, покрытая аполярным реагентом до слипания микрокапель, соответствует площади после их слипания, т. е. растекания реагента-собирателя по угольной поверхности в воде не наблюдается. Для гидрофобизации потребуется плотное покрытие всей поверхности угля микрокаплями реагента.

Механизм работы физически сорбированных форм собирателя свободен от такого требования, как объединение микрокапелек и покрытие частичек угля толстой (измеряемой микронами) углеводородной пленкой. Достаточно одной или нескольких микрокапелек на поверхности угля для формирования флотационного контакта — закрепления частицы на пузырьке.

Необходимость высокой поверхностной активности по отношению к границе раздела “газ – жидкость” (не менее 0.005 Дж·м/кг) для эффективных реагентов комплексного действия экспериментально доказана в [10]. Высокая поверхностная активность собирателя позволяет получить необходимую для высокого извлечения скорость растекания пленки собирателя по поверхности воды и поверхностное давление. Указанные тензометрические характеристики поверхностной пленки собирателя достигаются при соответствующей сорбции реагента на поверхности угля и использовании “свежих” пузырьков. Значительно меньший расход гетерополярных собирателей в сравнении с аполярными связаны с их более высокой скоростью расте-

кания (рис. 2). Утверждение, что флотационно активны аполярные соединения с асимметричным строением молекул и дипольным моментом больше нуля, объясняется необходимостью их взаимодействия с молекулами воды. Только в этом случае реагент, попадая с минерала на границу раздела “газ–жидкость”, растекается по ней, захватывает в свое движение жидкость и удаляет ее из прослойки, находящейся между угольной частицей и пузырьком газа. Как результат, происходит поворот вектора силы, обусловленной поверхностным натяжением на границе раздела “газ–жидкость”, к грани частицы угля. Силы, связанные с поверхностными натяжениями на границах раздела “газ–жидкость” и “уголь–жидкость”, складываются и приводят к перемещению линии смачивания. Соединения с неполярными молекулами не растекаются по поверхности воды и не могут снять кинетическое ограничение образованию флотационного контакта.

Гистерезисный механизм действия аполярных собирателей, объясняющий повышение крупности извлекаемых частиц угля, предполагает, что силы отрыва частиц от пузырьков в присутствии аполярных реагентов неизменны. В реальности попадание собирателя с минеральной частицы на пузырек приводит к растеканию реагента по границе раздела “газ–жидкость”. Поверхностные колебания пузырька и инерционные силы отрыва частиц, вызванные этими колебаниями, снижаются, что и является основной причиной увеличения крупности флотируемых частиц. Увеличение вязкости реагента, снижение его растворимости приводят к увеличению модуля упругости пленки и уменьшению амплитуды и частоты поверхностных колебаний пузырьков. Таким образом, не увеличение прочности закрепления частиц на пузырьках в случае применения вязких аполярных реагентов (масел), а снижение инерционных сил отрыва способствует увеличению размера извлекаемых угольных частиц. Наличие аполярного реагента снижает флотационную силу — реакцию сил поверхностного натяжения, приложенных к частице и распределенных по периметру смачивания флотационного комплекса, на отрыв частицы от пузырька. Уменьшение инерционной силы отрыва частицы от пузырька превышает снижение флотационной силы в присутствии аполярных и гетерополярных соединений, что приводит к увеличению крупности флотируемого материала.

Увеличение вязкости собирателя оказывает влияние не только на скорость сокращения периметра контакта трех агрегатных состояний при деминерализации пузырьков, но и на его расширение в момент образования флотационного комплекса. Замедление скорости перемещения линии смачивания и замедление увеличения площади “сухого” пятна после локального прорыва прослойки неизбежно приведет к снижению скорости флотации. Слабая собирательная способность многокольчатых углеводов объясняется их повышенной вязкостью [7]. Поэтому рекомендуемая кинематическая вязкость аполярных реагентов при 20 °С находится в пределах  $(2-4) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Увеличение крупности извлекаемых частиц упрочнением контакта “частица–пузырек”, происходящее в результате уменьшения капиллярного давления в пузырьке, также нельзя признать значимым. Уменьшение силы отрыва, обусловленное изменением капиллярного давления в пузырьке, составляет несколько процентов от флотационной силы и не может существенно повлиять на размер частиц в пенном слое.

В [7, 11] установлено оптимальное количество атомов углерода в углеводородной цепи для ряда индивидуальных химических соединений, опробованных в качестве собирателей угольного шлама. Гетерополярные соединения с найденным количеством атомов являются поверхностно-активными по отношению к границе раздела “газ–жидкость”, обладают способностью



растекаться по указанной границе и адсорбироваться на гидрофобных поверхностях. Это соединения, которые могут выполнять функцию физически сорбированных собирателей — снимать кинетическое ограничение образованию флотационного контакта. Увеличение количества атомов углерода в углеводородном фрагменте приведет к увеличению сил когезии и снижению скорости растекания собирателя, собирательной способности. Уменьшение количества атомов снизит адсорбцию и градиент концентрации собирателя при переходе с поверхности угля на пузырек в момент прорыва прослойки жидкости.

Широкое распространение гетерополярных собирателей обусловлено не их возможностью более прочно закрепляться на поверхности угля, в частности на углях низкой степени метаморфизма, а их активностью по отношению к границе раздела “газ–жидкость”. Мощность поверхностного потока пленки собирателя на указанной границе раздела, равная произведению поверхностного потока на поверхностное давление в пленке, определит потенциальную собирательную активность реагента. Установленная экспериментально корреляционная связь извлечения органической массы в концентрат и скорости растекания флотационных реагентов по поверхности воды подтверждает эту зависимость (рис. 6). Получение необходимого поверхностного потока собирателя достигается при определенной его сорбции на частицах угля, т. е. при определенном расходе и достаточной длине углеводородного фрагмента молекулы собирателя. По этой причине 8–12 атомов углерода в углеводородной цепи молекулы собирателя (спирта) являются оптимальными. Если реагент — комплексный собиратель-пенообразователь, то диапазон атомов углерода в углеводородной цепи молекул, входящих в состав собирателя, необходимо расширить: 4.6–13.

#### ВЫВОДЫ

Установлена корреляционная связь скорости растекания аполярных и гетерополярных реагентов по поверхности воды с извлечением горючей массы в концентрат. Обоснован механизм работы физически сорбированного собирателя во флотации угольного шлама. Экспериментально доказано, что для угольных шламов трудной категории обогатимости при подборе реагентов необходимо использовать соединения, хорошо сорбируемые углем и имеющие высокую скорость растекания на поверхности воды. Применение таких реагентов позволяет повысить технико-экономические показатели флотации угольного шлама.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чупрова Л. В.** Изучение механизма действия реагентов при флотационном обогащении угольных шламов // *Международ. журн. прикл. и фундамент. исследований.* — 2016. — № 11. — С. 939–942.
2. **Мин Р. С., Бессараб Н. А., Басарыгин В. И., Иванов Г. В.** Флотационная активность нефтяных реагентов для обогащения угольных шламов // *Химия в интересах устойчивого развития.* — 2001. — № 9. — С. 575–580.
3. **Плаксин И. Н., Классен В. И., Власова Н. С.** Основы действия реагентов при флотации каменных углей // *Обогащение полезных ископаемых: избр. тр.* — М.: Наука, 1970. — С. 62–68.
4. **Байченко А. А., Батушкин А. Н.** Влияние аполярного реагента на прочность закрепления частиц на пузырьке воздуха при флотации // *Вестн. КГТУ.* — 2005. — № 4.1. (48). — С. 60–62.
5. **Мелик-Гайказян В. И., Плаксин И. Н., Ворончихина В. В.** К механизму действия аполярных собирателей и некоторых поверхностно-активных веществ при пенной флотации // *Докл. АН СССР.* — 1967. — Т. 173. — № 4. — С. 883–886.

6. Мелик-Гайказян В. И., Емельянова Н. П., Глазунова З. И. О капиллярном механизме упрочнения контакта частица – пузырек при пенной флотации // Обогащение руд. — 1976. — № 1. — С. 25–31.
7. Хан Г. А., Габриелова Л. И., Власова Н. С. Флотационные реагенты и их применение. — М.: Недра, 1986. — С. 266.
8. Чупрова Л. В., Муллина Э. Р., Мишурина О. А. О влиянии органических и неорганических соединений на флотацию углей низкой стадии метаморфизма // Совр. проблемы науки и образования: электрон. журн. — 2013. — № 4. — С. 1–6.
9. А.с. 1071320 СССР, МКИ В 03Д 1/02. Реагент для флотации угля / И. Х. Дебердеев, Г. А. Пиккат-Ордынский // Обубл. в БИ. — 1984. — № 5. — С. 19.
10. Федосеева С. О., Морозов О. А. Влияние поверхностной активности и пенообразующей способности гетерополярных реагентов на их флотационные свойства // Обогащение полезных ископаемых. — 2012. — Вып. 50 (91).
11. Осина Н. Ю., Горохов А. В., Лахтин С. Н. Исследование влияния группового химического состава реагентов собирателей на эффективность флотации каменных углей // ГИАБ. — 2006. — № 2. — С. 393–396.
12. Chanturiya V. and Kondratiev S. Contemporary understanding and developments in the flotation theory of non-ferrous ores, Miner. Proc. and Extractive Metallurgy Review, 2019, DOI: 10.1080/08827508.2019.1657863.
13. Кондратьев С. А. Обоснование механизма работы физически сорбированного собирателя в элементарном акте флотации // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 118–136.
14. А. с. 1263354 СССР, МКИ В 03Д 1/02. Способ флотации угольных шламов / И. М. Кузнецов, А. П. Тутубалина, Н. Ф. Чепенко // Опубл. в БИ. — 1986. — № 38. — С. 23.
15. Кондратьев С. А. Собирательная сила и избирательность флотационного реагента // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 133–147.

*Поступила в редакцию 28/VI 2021*

*После доработки 29/VI 2021*

*Принята к публикации 30/VI 2021*