

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.794.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛОКУЛЯНТОВ

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю.

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Применение синтетических полимерных флокулянтов является одним из перспективных направлений интенсификации процессов разделения тонкодисперсных суспензий, в том числе в водно-шламовых системах углеобогащительных фабрик. Цель работы заключается в анализе теории и практики и выявлении перспективных направлений совершенствования технологий разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов. Приведены сведения о современном состоянии теории взаимодействия флокулянтов с минеральными частицами, свойствах флокуляционных структур. Рассмотрены технологические аспекты применения флокулянтов в таких процессах разделения суспензий тонкодисперсных продуктов обогащения углей, как флокуляционное кондиционирование, сгущение, обезвоживание на вакуум-фильтрах и ленточных фильтр-прессах, центрифугирование. Приведены сведения по значениям расходов флокулянтов. Указаны значения технологических показателей сгущения отходов флотации и шламов. Отмечено, что для процессов обезвоживания фильтрованием под вакуумом характерно применение индивидуальных флокулянтов с расходом до 100 г/т и снижение удельного объёмного сопротивления осадка в 1,5-3 раза, для обезвоживания на ленточных фильтр-прессах – комбинаций анионоактивного и катионоактивного флокулянтов с суммарным расходом до 1000 г/т, что обусловлено необходимостью получения осадка с предельным статическим напряжением сдвига не менее 90 Па и удельным объёмным сопротивлением порядка $3 \cdot 10^{10} - 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$. Показано, что перспективными направлениями совершенствования технологий сгущения и обезвоживания продуктов обогащения углей с применением флокулянтов являются: оптимизация расходов флокулянтов и режимов их перемешивания с суспензиями; разработка способов и средств для контроля остаточного содержания флокулянтов в осветлённой воде; дробная подача флокулянтов; предварительная обработка суспензий коагулянтами, содержащими многозарядные катионы.

Ключевые слова: флокуляция, флокулянты, коагулянты, разделение суспензий, угольный флотационный концентрат, отходы флотации углей, сгущение, обезвоживание, фильтрование

© Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., 2024

Для цитирования

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 58-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

CURRENT STATE AND AREAS OF IMPROVING SEPARATION PROCESSES FOR SUSPENSIONS OF COAL ENRICHMENT PRODUCTS USING FLOCCULANTS

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu.

Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The use of synthetic polymer flocculants is one of the promising areas for intensifying separation processes for fine suspensions, including in the water-slurry systems of coal processing plants. The objective of the research is to analyze theory and practice and identify promising areas for improving technologies for separating suspensions of coal enrichment products using flocculants. The article describes the current state of the theory of interaction between flocculants and mineral particles, and the properties of flocculation structures. The authors describe technological aspects of using flocculants in processes of separating suspensions of fine coal enrichment products, such as flocculation conditioning; thickening; dehydration on vacuum filters and belt filter presses; centrifugation. The article contains values of flocculant flow rates, technological indicators for thickening of flotation waste and slurry. It has been noted that the processes of dehydration by filtration under vacuum are characterized by using individual flocculants with a flow rate of up to 100 g/t and a decrease in the volume resistivity of the sediment by 1.5-3 times, for dehydration on belt filter presses – combinations of anionic and cationic flocculants with a total flow rate of up to 1000 g/t, which is attributed to the need to obtain the sediment with a maximum static shear stress of at least 90 Pa and a volume resistivity of about $3 \cdot 10^{10}$ - $2 \cdot 10^{11}$ m⁻². It has been shown that promising areas for improving technologies for thickening and dehydration of coal enrichment products using flocculants are optimization of flocculant flow rates and modes of their mixing with suspensions; development of methods and means for controlling the residual content of flocculants in clarified water; a fractional supply of flocculants; pretreatment of suspensions with coagulants containing polyvalent cations.

Keywords: flocculation, flocculants, coagulants, separation of suspensions, coal flotation concentrate, coal flotation waste, thickening, dehydration, filtration

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Current State and Areas of Improving Separation Processes for Suspensions of Coal Enrichment Products Using Flocculants. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 58-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70>

Введение

Существующие технологии обогащения углей как для коксохимического производства, так и для энергетики требуют применения в качестве разделительной среды значительного количества воды, поэтому в технологических схемах обогащения углей важную роль играют водно-шламовые процессы, назначение которых заключается в обеспечении выделения тонкодисперсной твёрдой фазы, получении и циркуляции чистой оборотной воды. Интенсификация разделения твёрдой и жидкой фаз суспензий в этих процессах насущно необходима и обусловлена требованиями по технологической, экономической и экологической эффективности технологии обогащения. Одним из основных направлений решения этой проблемы является применение синтетических полимерных флокулянтов. Эти реагенты выпускаются химической промышленностью с середины XX века и получили широкое распространение в качестве реагентов для интенсификации разделения твёрдой и жидкой фаз в различных технологиях: переработке минерального сырья, очистке сточных вод, нефтедобыче и др. [1, 2]. В углеобогадательной подотрасли, для которой характерно ис-

пользование значительных объёмов воды (в среднем 3-4 м³ на тонну перерабатываемого угля), весьма существенное значение имеет рациональное использование воды. Для этого на обогатительных фабриках (ОФ) все более широкое распространение получают технологии с замкнутым водно-шламовым циклом, исключающие сброс загрязнённых вод в наружные илوناкопители. В настоящее время технологии сгущения и обезвоживания продуктов обогащения углей, в том числе с применением флокулянтов, постоянно совершенствуются, увеличивается доля ОФ с замкнутым водно-шламовым циклом. Это предусмотрено в «Программе развития угольной промышленности на период до 2035 г.».

Цель настоящей работы заключается в анализе теории и практики и выявлении перспективных направлений совершенствования технологий разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов.

В качестве флокулянтов применяют полимеры линейного строения, растворимые в воде, содержащие полярные функциональные группы. Получили широкое распространение следующие полимеры:

– анионоактивные и неионогенные: полиакрила-

мид, полиметакриламид и их производные; полиэтиленоксид и ряд других;

– в качестве катионоактивных – полимеры аммониевых, пиридиновых оснований, аминов и иминов.

Важнейшими параметрами, характеризующими флокулянты, являются молярная масса (ММ) и содержание заряженных функциональных групп. Значения этих параметров для выпускаемых в настоящее время анионоактивных флокулянтов составляют соответственно до $2,5 \cdot 10^7$ кг/кмоль и 0-80%; для катионоактивных флокулянтов – соответственно до $9 \cdot 10^6$ кг/кмоль и 0-90%. Таким образом, ассортимент выпускаемых флокулянтов весьма широк и позволяет выбрать эффективные реагенты для реализации процессов разделения разнообразных по свойствам суспензий. Согласно [3], флокулянты в широком ассортименте выпускаются отечественными и зарубежными химическими предприятиями, в том числе ЗАО «Соленис Технолоджис МСП» (ранее ЗАО «Ашленд МСП», г. Пермь); «SNF SA Floerger» (Франция); «BASF» (Германия); «Kemira» (Финляндия) и др.

Исследование теории процесса флокуляции

Теории процесса флокуляции посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов [4-7].

При добавлении к суспензии раствора флокулянта протекают следующие процессы:

- гомогенизация, заключающаяся в равномерном распределении макромолекул в объеме суспензии;
- адсорбция полимера на частицах твердой фазы;
- собственно флокуляция, заключающаяся в образовании мостиковых связей между частицами, росте флокул (возможно также образование агрегатов 2-го и более высоких порядков), изменении структуры флокул, механической деструкции и восстановлении разрушенных флокул, причем скорости двух последних процессов через определенный промежуток вре-

мени выравниваются, иными словами устанавливается динамическое равновесие.

Притяжение к поверхности частиц твердой фазы для неионогенных полимеров обусловлено действием сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобными взаимодействиями и образованием водородных связей; для ионогенных полимеров – прежде всего силами электростатического взаимодействия. Исследования, выполненные в Университете Новой Англии (Австралия), показали, что в зависимости от знака заряда поверхности и полимера последний может притягиваться либо потенциалопределяющими ионами поверхности, либо противоионами двойного электрического слоя, как это видно на рис. 1 [7].

В случае отталкивания сильных одноименных зарядов частицы и макромолекулы закрепление флокулянта на поверхности затруднено из-за потенциального барьера [5]. Этот эффект может быть использован для разделения системы из двух и более минералов различной природы методом селективной флокуляции.

Суммарное время протекания процессов гомогенизации, адсорбции и собственно флокуляции зависит от крупности частиц твердой фазы. Согласно [5], для частиц диаметром свыше 1 мкм определяющим является ортокINETический вариант процесса, по которому взаимное перемещение частиц и макромолекул происходит за счет конвективного массопереноса; при развитом турбулентном режиме расчетное время протекания процессов – несколько секунд. Для субмикронных частиц характерен перикинетический вариант: частицы и макромолекулы перемещаются относительно друг друга под действием броуновского движения. В этом случае характерное время указанных процессов существенно больше – несколько сотен секунд. Детальному изучению строения агрегатов частиц посвящен ряд работ, опубликованных в последние годы, например [7-9].

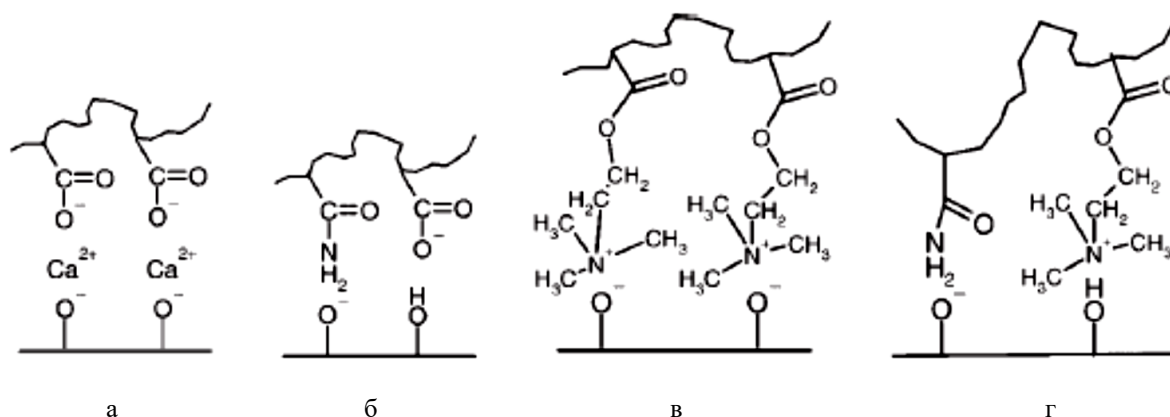


Рис. 1. Взаимодействие заряженных функциональных групп флокулянтов с твердой фазой, на поверхности которой преобладают гидроксильные группы [7]: а, б – анионоактивных; в, г – катионоактивных

Fig. 1. The interaction between charged functional groups of flocculants and solids, whose surface contains mostly hydroxyl groups [7]: а, б is anionic; в, г is cationic

Для эффективной реализации процессов перемешивания суспензий с флокулянтами и последующего транспортирования суспензий к аппаратам для сгущения и обезвоживания важно обеспечить сохранность флокул, другими словами, свести их механическую деструкцию к минимуму. Известно, что разрушение агрегатов происходит вследствие сдвиговых усилий, возникающих под действием турбулентных пульсаций среды, причём масштаб пульсаций сопоставим с диаметром флокул [10]. В работе [11] показано, что величина предельного динамического напряжения сдвига $\tau_{П}$, характеризующая прочность флокул, прямо пропорциональна расходу флокулянта в интервале от 25 до 300 г/т. С увеличением диаметра частиц твёрдой фазы значение $\tau_{П}$ снижается, но при значениях свыше 10-15 мкм практически не изменяется и при указанных значениях расхода флокулянта составляет 0,5-3,5 Па. Также в этой работе приведены уравнения для расчёта рационального значения скорости течения суспензии, обработанной флокулянтами, для обеспечения минимальной механической деструкции флокул.

Свойства флокул оказывают существенное влияние на результаты процессов разделения суспензий. По нашему мнению, наиболее важны крупность флокул, их прочность и содержание внутренней влаги.

Влажность флокул обусловлена тем, что в процессе флокуляции часть воды из объёма суспензии иммобилизуется в пространстве между частицами [12]. Согласно [5], некоторая часть этой воды может быть удалена за счёт неразрушающих механических воздействий. Это достигается при течении суспензии, обработанной флокулянтами, по криволинейной траектории; в результате на флокулы действует неуравновешенная система сил, приводящая к уменьшению расстояния между частицами с вытеснением части воды. Это, в свою очередь, позволяет снизить влажность осадка в процессах обезвоживания.

Данные, приведенные в работе [9], указывают на то, что зависимость среднего диаметра агрегатов частиц отходов флотации углей от расхода флокулянта – монотонно возрастающая, с насыщением. Также очевидно, что агрегирование частиц твёрдой фазы улучшает структуру образующихся осадков, так как удельное объёмное сопротивление осадка α_0 (величина, обратная проницаемости) обратно пропорциональна квадрату диаметра частиц (агрегатов). По нашему предположению, структура осадка зависит от структуры флокул, определяемой комбинированием применяемых флокулянтов, следующим образом (рис. 2):

- осадок индивидуальных частиц (рис. 2, а) имеет диаметр пор, сопоставимый с диаметром частиц (несколько микрон), значение α_0 находится в пределах от $5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ (угольный флотационный концентрат) до 10^{16} м^{-2} (отходы флотации углей);
- осадок из флокул первого порядка (рис. 2, б): применение одного флокулянта снижает значение α_0 примерно в 3-6 раз по сравнению с осадками индивидуальных частиц за счёт увеличения диаметра пор до нескольких десятков микрон, а также, возможно, уменьшения доли тупиковых пор;
- осадок из флокул второго порядка (рис. 2, в): последовательное применение двух флокулянтов различной природы снижает значение α_0 до $(2-10) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$, так как образуются агрегаты второго порядка, и характерные значения диаметра пор достигают нескольких сотен микрон, это особенно важно для обезвоживания суспензий дренированием на ленточных фильтр-прессах.

Приведенные выше сведения по теории процесса флокуляции являются основой для практической реализации технологий разделения суспензий с применением флокулянтов. Ниже рассмотрены основные аспекты этих технологий.

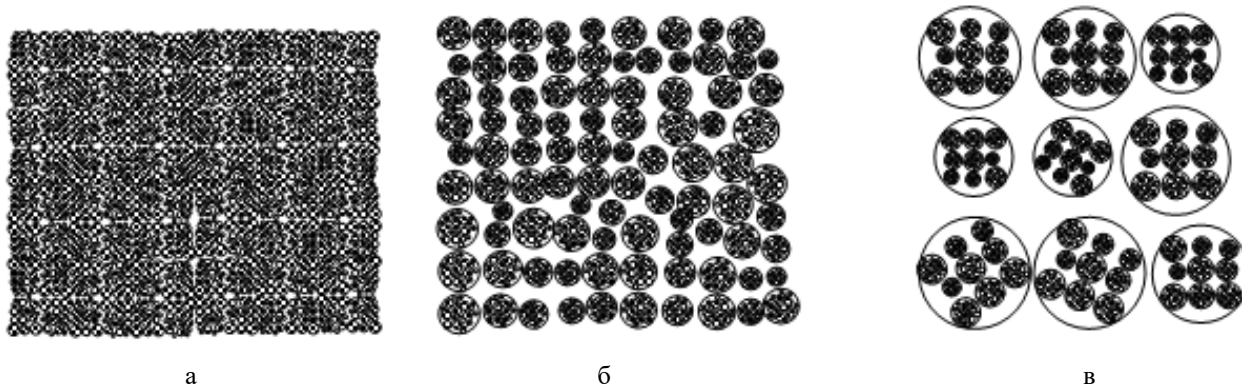


Рис. 2. Схемы осадков: а – индивидуальные частицы; б – флокулы 1-го порядка; в – флокулы 2-го порядка
Fig. 2. The structures of filter cakes: a is individual particles; б is flocs of the 1st order; в is flocs of the 2nd order

Технологии разделения суспензий с применением флокулянтов

Флокуляционное кондиционирование. Данный процесс включает операции, предшествующие сгущению и обезвоживанию суспензий: приготовление растворов флокулянтов, их дозирование, перемешивание с суспензиями, транспортирование суспензий к аппаратам для сгущения и обезвоживания. Концентрация рабочих растворов составляет, как правило, 0,02-0,07%.

Перемешивание суспензий с флокулянтами осуществляется в трубопроводах, статических смесителях и устройствах с вращающимися мешалками. Гидродинамический режим процесса должен обеспечить, с одной стороны, быстрое и эффективное протекание гомогенизации полимера и образования агрегатов частиц, для чего необходим развитый турбулентный режим. С другой стороны, механическая деструкция флокул должна быть сведена к минимуму. Это дает основание для предположения о том, что существует оптимальный гидродинамический режим, который создает возможность для наиболее эффективного обезвоживания суспензий с применением флокулянтов.

Для оценки эффективности применения флокулянтов в технологических процессах, кроме параметров скорости осаждения твёрдой фазы и прозрачности осветлённой воды [1], предложены также минимальное значение времени капиллярного всасывания [13] и минимальное значение α_0 [14]. В работе [15] показано, что зависимость значения α_0 от объёмного расхода суспензии (то есть фактически от скорости её течения) для отходов флотации углей при добавлении флокулянтов имеет минимум (рис. 3).

Сгущение суспензий небогатённых шламов и отходов флотации. Эту операцию осуществляют в сгустителях различной конструкции: радиальных, цилиндрических, пластинчатых. Главная задача –

обеспечить максимальную возможную скорость осаждения твёрдой фазы. Также существенное значение имеет достижение минимального возможного содержания твёрдой фазы в осветлённой воде (сливе). Анализ литературных данных дает основание полагать, что значение этого параметра в настоящее время имеет тенденцию к снижению и составляет, как правило, менее 3 кг/м³ [16, 17], в зарубежной практике углеобогащения – порядка 0,1 кг/м³ [18]. Последнее значение рекомендуется для процессов сгущения в технологиях обогащения некоторых руд, например свинцовых, цинковых, железных [19].

В углеобогащении применяют, как правило, высокомолекулярные анионоактивные флокулянты с расходом до 100 г/т. В то же время существенной проблемой, затрудняющей получение чистого слива, является тенденция к увеличению доли тонкодисперсных, в особенности глинистых частиц в твёрдой фазе небогатённых шламов и отходов флотации. При значительном содержании в твёрдой фазе исходной суспензии субмикронных глинистых частиц в некоторых случаях предусматривают подачу катионоактивного флокулянта после анионоактивного [20]. Также известен способ, заключающийся в добавлении к суспензии коагулянтов-электролитов или гетерокоагулянтов перед подачей флокулянтов [21]. Однако ввиду значительного расхода коагулянтов (до 5 кг/т) этот способ не получил распространения. Возможным направлением решения этой проблемы представляется применение коагулянтов, содержащих многозарядные катионы. По нашему мнению, несомненный интерес с этой точки зрения представляют коагулянты, содержащие ионы Ti^{4+} , разработанные в РХТУ им. Д.И. Менделеева, которые, согласно [22], способны обеспечить более высокую эффективность разделения суспензий по сравнению с алюминиевыми коагулянтами.

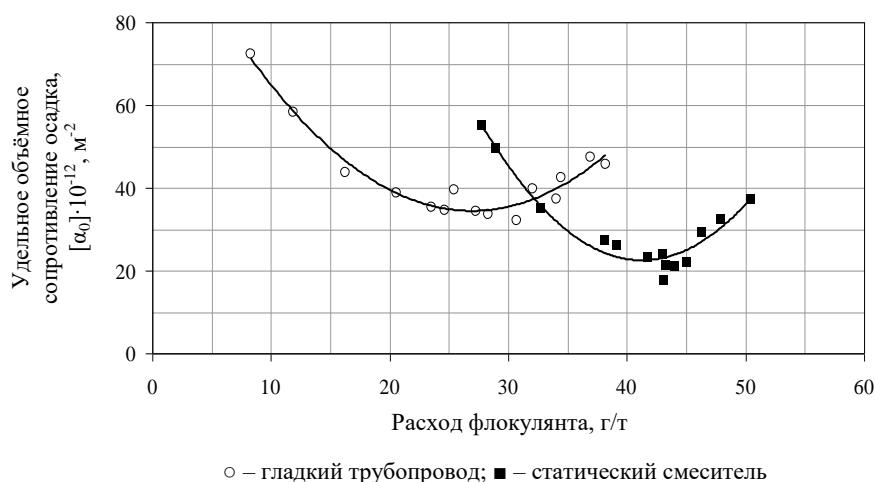


Рис. 3. Зависимость величины удельного объёмного сопротивления осадка α_0 от объёмного расхода суспензии [15]

Fig. 3. Dependence between volume resistivity of the sediment α_0 and the volume flow rate of the suspension [15]

Повышение удельной нагрузки примерно в 1,5-2 раза и снижение содержания твёрдой фазы в сливе без увеличения расхода флокулянтов достигается путём применения сгустителей со взвешенным слоем (как радиальных, так и цилиндрических). Принцип взвешенного слоя заключается в том, что загрузочное устройство заглублено в сгустительный чан. Поэтому частицы твёрдой фазы и образующиеся флокулы находятся во взвешенном состоянии в средней части аппарата. Таким образом, суспензия фильтруется через взвешенный слой, это обеспечивает высокую степень чистоты слива, а также возможность увеличения удельной нагрузки. В то же время наличие взвешенного слоя затрудняет получение сгущённой суспензии с высоким содержанием твёрдой фазы.

Селективная флокуляция угольных шламов.

Впервые возможность этого процесса показал Рид в 1971 году на примере суспензии, содержащей частицы гематита и кварца: при добавлении к этой суспензии сильного анионоактивного флокулянта кварц, в отличие от гематита, не флокулировался [23]. Согласно [24], в технологиях обогащения углей реализация этого процесса возможна в отдельных случаях, когда при взаимодействии отрицательно заряженных породных частиц и сильного анионоактивного флокулянта вследствие электростатического отталкивания между ними возникает потенциальный барьер высотой ориентировочно порядка $10 kT$, где k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

В России технология селективной флокуляции угольных шламов была реализована на обогатительной фабрике «Распадская» [25]. Суть процесса заключается в том, что исходная суспензия необогащённого угольного шлама крупностью ~ 200 мкм, зольностью порядка 18-28% и содержанием твёрдой фазы $10-20$ кг/м³ перемешивается с сильным анионоактивным флокулянтом, причем расход составляет порядка 30-36 г/т, и поступает в радиальный сгуститель. В сгущённый продукт извлекаются в основном угольные частицы: зольность твёрдой фазы составляет 10-15% (выход – около 90% от исходного шлама), что по условиям данной фабрики соответствует требованиям к качеству концентрата. В слив извлекаются преимущественно породные частицы (крупность менее 20 мкм, зольность около 80%, выход около 10%). До настоящего времени нет сведений о применении аналогичной технологии на других предприятиях по обогащению углей.

Обезвоживание флотационных концентратов и шламов фильтрованием под вакуумом. Этот процесс осуществляют, как правило, на фильтрах погружного типа: дисковых и барабанных. Для этого применяют индивидуальные флокулянты со сравнительно небольшим расходом, как правило до 30 г/т, в отдельных случаях – до 100 г/т. Анализ данных по эксплуатации дисковых вакуум-фильтров на углеобогастительных предприятиях Кузбасса [20] показывает, что применение флокулянтов снижает удельное сопротивление

осадка угольных флотационных концентратов примерно в 1,5-3 раза. Данные, приведенные в работе [26], указывают на то, что в процессе фильтрационного обезвоживания суспензии угольных частиц анионоактивные флокулянты по сравнению с катионоактивными при одинаковых значениях расхода обеспечивают более высокие значения толщины осадка h (следовательно, и удельной производительности по твёрдой фазе) и более низкую влажность осадка W . При этом зависимость значений названных параметров от расхода носит экстремальный характер: для h – с максимумом, для W – с минимумом (рис. 4).

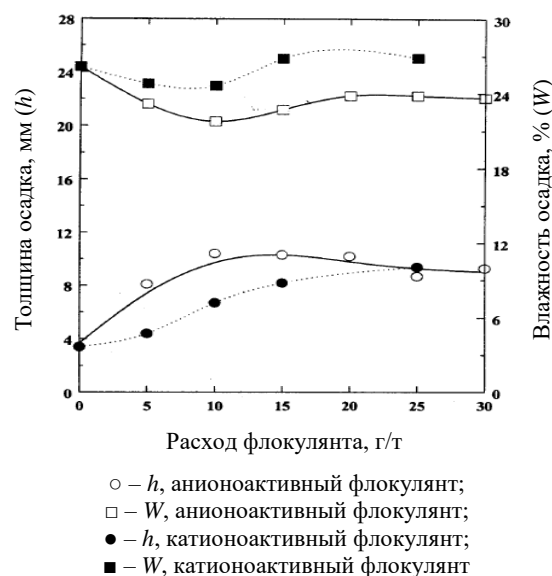


Рис. 4. Зависимость толщины и влажности осадка от расхода флокулянта [26]

Fig. 4. Dependence between thickness and moisture of the sediment and the flocculant flow rate [26]

Это подтверждается также сведениями, содержащимися в работе [27]. По нашему предположению, причина заключается в том, что с увеличением расхода возрастает диаметр флокул, следовательно, уменьшается удельное объёмное сопротивление осадка α_0 . Благодаря этому удельная производительность фильтров по твёрдой фазе возрастает примерно в 1,5-3 раза, а содержание твёрдой фазы в фильтрате снижается примерно в 2-3 раза.

При дальнейшем возрастании расхода возможно насыщение адсорбционного слоя на поверхности частиц твёрдой фазы макромолекулами флокулянта, что приводит к увеличению α_0 вследствие стерической стабилизации и возрастанию вязкости фильтрата за счёт появления в нем свободных макромолекул флокулянта. Значение W возрастает вследствие увеличения доли воды, иммобилизованной в пространстве между частицами во флокуле. Также избыточный расход флокулянта может привести к образованию сравнительно крупных флокул с высокой скоростью осаждения, что приводит к расслоению суспензии в ванне фильтра и нарушает нормальное течение про-

цесса обезвоживания. Поэтому, согласно [28], скорость осаждения твёрдой фазы суспензий для фильтров погружного типа не должна превышать 18 мм/с. Исходя из вышесказанного, для определения оптимальных значений расхода флокулянта в каждом конкретном случае целесообразно выполнение лабораторных экспериментальных исследований для определения наиболее эффективной марки флокулянта и его расхода q . По нашему мнению, оптимальное значение q находится в интервале между величинами, соответствующими минимальным значениям α_0 и W . При этом возможно снижение значения W (ориентировочно на величину до 2 абс.%) за счёт механических воздействий на суспензию, обработанную флокулянтами, при её течении по криволинейной траектории, например в трубопроводе с насадкой или в специальном барабане.

Существенной проблемой в технологии обезвоживания флотационных концентратов является необходимость обработки фильтрата, так как в нём содержатся частицы твёрдой фазы (до 20-30 кг/м³), причём их зольность выше по сравнению с зольностью концентрата. На некоторых углеобогатительных фабриках предусмотрена флотация фильтрата для извлечения угольных частиц [20], что, в свою очередь, приводит к усложнению технологической схемы, увеличению эксплуатационных затрат. Возможным решением проблемы получения на дисковом вакуум-фильтре чистого фильтрата, пригодного для направления в линию оборотного водоснабжения фабрики, представляется применение комбинаций анионоактивного и катионоактивного флокулянтов, чтобы обеспечить агрегирование всех частиц твёрдой фазы, в том числе самых тонких. При этом реагентный режим предлагается определять опытным путём исходя из следующих соображений:

- содержание твёрдой фазы в фильтрате – ориентировочно не более 1 кг/м³;
- достижение минимальных возможных значений влажности и удельного сопротивления осадка;
- скорость осаждения твёрдой фазы – не выше 18 мм/с.

Кроме того, в качестве материала фильтрующей перегородки представляется предпочтительным применение синтетических сеток с размерами отверстий не более 100-200 мкм, обладающих высокой прочностью, износостойкостью и способностью к эффективной регенерации промывкой.

Другой важной проблемой является отрицательное влияние флотационной пены на процесс обезвоживания. В работе [29] показано, что в случаях, когда при флотации образуется устойчивая пена, которая не полностью разрушается к моменту поступления суспензии концентрата на фильтр, пузырьки воздуха, содержащиеся в пене, удерживают часть воды и затрудняют обезвоживание. По нашему мнению, эффективное разрушение пены перед операцией обезвоживания может быть достигнуто путём орошения

пены раствором флокулянта. Это позволит совместить операции пеногашения и подачи флокулянта для обезвоживания.

В технологиях обогащения руд чёрных и цветных металлов флокулянты применяют на операциях сгущения и обезвоживания концентратов [30]. Закономерности применения как анионоактивных, так и катионоактивных флокулянтов в целом аналогичны. Также в НТЦ «Бакор» были выполнены исследования по совместному применению флокулянтов и ПАВ для одновременного снижения удельного сопротивления и влажности осадков железорудных концентратов [31].

Обезвоживание суспензий продуктов обогащения углей на ленточных фильтр-прессах. Данный процесс является одной из перспективных водно-шламовых технологий, получивших широкое распространение в отечественной и зарубежной практике обогащения углей с конца XX века. Для этой технологии обязательным условием является применение по крайней мере двух флокулянтов различной природы, как правило последовательно высокомолекулярного сильного анионоактивного и среднемолекулярного сильного катионоактивного [32]. Это связано с тем, что в зоне дренирования фильтра в течение сравнительно короткого промежутка времени (как правило, не более 1 мин) из исходной суспензии должна быть удалена свободная влага и образоваться осадок с определенной толщиной (не менее 6 мм, согласно [33]). Механическая устойчивость образующегося осадка должна обеспечивать его эффективное обезвоживание без растекания по ленте и выдавливания за пределы лент. Для этого осадок должен иметь определенное значение предельного статического напряжения сдвига $\tau_{п}$. Согласно [34], оптимальное значение $\tau_{п}$ составляет порядка 90 Па; согласно [5], эффективное значение этого параметра 100-200 кПа, при этом значение удельного объёмного сопротивления α_0 – в пределах $3 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{11}$ м². Поэтому целесообразен реагентный режим, обеспечивающий получение крупных флокул (второго и более высоких порядков), что и достигается последовательным применением двух флокулянтов различной природы (см. рис. 2, в).

Технологическая схема обезвоживания предусматривает последовательное перемешивание исходной суспензии, содержащей, как правило, не менее 200 кг/м³ твёрдой фазы, с растворами флокулянтов в гладком трубопроводе или в статических смесителях. Далее суспензия, обработанная флокулянтами, направляется на фильтр. В некоторых случаях осуществляется предварительное удаление части свободной влаги дренированием на ленточном гравитационном столе. В результате обезвоживания получают осадок с толщиной не менее 3-4 мм и влажностью от 30-35% (для низкосолевых продуктов) до 40-45% (для высокосолевых продуктов). Обезвоженный осадок направляют на дальнейшую обработку. Удельная производительность фильтров по твёрдой фазе достигает 3-4 т/ч на 1 м ширины ленты. Дальнейшее ис-

пользование фильтрата зависит от содержания в нем твёрдой фазы: при сравнительно высоком содержании порядка 10-30 кг/м³ – как правило, на повторное сгущение; при более низком возможно направление в линию оборотного водоснабжения предприятия или для промывки фильтрующих лент.

В настоящее время ленточные фильтр-прессы широко применяют на углеобогажительных фабриках России для обезвоживания отходов флотации и необогащённых высокозольных шламов. Низкозольные продукты, то есть концентрат и промежуточный продукт флотации, обезвоживают с применением ленточных фильтр-прессов только на обогатительной фабрике «Нерюнгринская». Значение суммарного расхода анионоактивного и катионоактивного флокулянтов для этой фабрики составляет 180-270 г/т [35]. С увеличением зольности твёрдой фазы суммарный расход флокулянтов возрастает и для высокозольных отходов флотации может достигать значения 1000 г/т. В некоторых случаях для обезвоживания суспензий с высоким содержанием тонких глинистых частиц наряду с флокулянтами применяют коагулянты, содержащие многозарядные катионы, например Al³⁺ [20].

Обезвоживание суспензий центрифугированием.

Известно о применении осадительных центрифуг со шнековой выгрузкой осадка для обезвоживания необогащённых тонкодисперсных шламов и отходов флотации [36], расход анионоактивного флокулянта – до 100 г/т. Этот способ обезвоживания не получил широкого распространения, так как значение влажности обезвоженного осадка существенно выше по сравнению с обезвоживанием фильтрованием и составляет 40-45%. Доля твёрдой фазы, извлекаемой в фугат, также выше по сравнению с обезвоживанием фильтрованием и составляет примерно 5-10%. Причины, на наш взгляд, заключаются в механической деструкции флюкул при течении суспензии с большими скоростями в роторе центрифуги, а также в измельчении осадка при его транспортировании шнеком. В работе [37] показано, что унос твёрдой фазы в фугат может быть сокращён путём применения коагулянтов.

С учётом вышеизложенного и на основании анализа современных технологических решений, представляются перспективными следующие направления совершенствования технологических процессов с применением флокулянтов:

1) Оптимизация расхода флокулянтов. До настоящего времени остается не вполне ясным вопрос о выборе критериев для оптимизации этого параметра. По нашему мнению, целесообразно обеспечивать значения расходов исходя из следующих соображений:

- для процессов сгущения – обеспечение максимальной возможной скорости осаждения твёрдой фазы и содержания этой фазы в сливе не более 1 кг/м³;
- для обезвоживания фильтрованием под вакуумом – достижение минимальных возможных значений влажности и удельного сопротивления осадка;
- для обезвоживания на ленточных фильтр-прессах – достижение минимального возможного

значения удельного сопротивления осадка при условии, что величина его предельного статического напряжения сдвига не менее 90 Па.

Исходя из этих соображений, для разработки критерия оптимизации также представляется логичным принимать во внимание остаточную концентрацию флокулянта в сливе или фильтрате. По нашему мнению, значение этой величины не должно превышать предел чувствительности метода порядка 10-50 мг/м³.

2) Уменьшение количества флокулянтов в осветлённых водах обогатительных фабрик, направляемых в линию оборотного водоснабжения и в природные водоёмы. Согласно [1], избыток флокулянтов в технологических водах фабрик приводит к увеличению себестоимости продукции и отрицательно влияет на эффективность обогатительных процессов. Также известно, что полиакриламид и его производные являются малотоксичными веществами, но их разложение в условиях природных водоёмов – неконтролируемый процесс, который может привести к образованию токсичных продуктов, в частности акриламида. В связи с этим представляется целесообразной разработка систем, позволяющих непрерывно контролировать остаточное содержание флокулянтов. Поэтому очевидно, что для уменьшения концентрации флокулянтов в осветлённых водах целесообразно осуществлять контроль названного параметра. В работе [38] предложен метод, основанный на нефелометрическом определении разности оптической плотности индикаторной суспензии в отсутствие и в присутствии флокулянта. Предполагаемая чувствительность метода – порядка 10-50 мг/м³.

3) Модифицирование макромолекул флокулянтов различными функциональными группами. Например, согласно [39], введение в макромолекулу полиакриламида третичных аминов позволило увеличить скорость осаждения твёрдой фазы водной суспензии каолина на 20-40% по сравнению с исходным полиакриламидом. Введение в макромолекулу флокулянта определённых функциональных групп обуславливает увеличение адсорбционного сродства к поверхности минеральных частиц. В то же время указанная химическая обработка флокулянтов повышает их цену, поэтому целесообразность модифицирования флокулянтов было бы логично определять на основе технико-экономического анализа.

4) Повышение эффективности растворения флокулянтов. Для обеспечения полного растворения флокулянтов в воде целесообразно разработать обоснованные рекомендации по параметрам режима растворения, контролю и гибкому регулированию процесса. Это, в свою очередь, позволит повысить эффективность применения флокулянтов и снизить их неоправданные потери.

5) Оптимизация режима перемешивания флокулянтов с суспензиями. На основании известных сведений о закономерностях этого процесса целесообразно определять режимы перемешивания суспензий

с флокулянтами для конкретных случаев с учётом применяемых технологий перемешивания. Для определения рациональных значений скорости потока суспензии в трубопроводе с учётом расхода флокулянта рекомендуем применять расчетные зависимости, приведенные в работе [11]. Для устройств с вращающимися мешалками целесообразно определять эффективное значение частоты вращения исходя из условия достижения максимального значения скорости осаждения твёрдой фазы или минимального значения α_0 . Также эффективность перемешивания суспензий с флокулянтами целесообразно повышать путём их дробного дозирования: согласно [40], при подаче растворов флокулянтов порциями по сравнению с единовременной подачей при одинаковых значениях расхода возможно снизить удельное сопротивление осадка на величину до 35%. В случаях обезвоживания флотационных концентратов с устойчивой пеной целесообразно осуществлять подачу растворов флокулянтов под давлением тонкими струями для разрушения пены.

б) Для повышения эффективности разделения суспензий необогащенных шламов и отходов флотации с высоким содержанием тонкодисперсных глинистых частиц целесообразно осуществлять предварительную добавку коагулянтов-электролитов или гетерокоагулянтов перед подачей флокулянтов. Это целесообразно, если последовательное применение анионоактивного и катионоактивного флокулянтов не обеспечивает требуемую скорость осаждения твёрдой фазы (для процессов сгущения) или значение удельного объёмного сопротивления осадка ниже $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$ (для обезвоживания на ленточном фильтр-прессе).

Заключение

Выполнен обзор современного состояния процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов, включая: флокуляционное кондиционирование; сгущение; обезвоживание на вакуум-фильтрах, ленточных фильтр-прессах и центрифугах. Показано их значение в технологическом комплексе обогащения углей и получении товарного продукта с учетом требований по обеспечению экологической безопасности производства. Показаны перспективные методы повышения эффективности применения флокулянтов в процессах разделения суспензий: оптимизация расходов флокулянтов и режимов их перемешивания с суспензиями; модифицирование макромолекул флокулянтов различными функциональными группами; повышение эффективности растворения флокулянтов; предварительная обработка суспензий коагулянтами.

Список источников

1. A Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry / Khazaie A., Samali B., Mazarji M., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Osborne D., Soldatov A.A. // *Water*. 2022, vol. 14, no. 6, 918.

2. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // *Трансформация экосистем*. 2023. Т. 6. №1. С. 168-187.
3. Обзор рынка полиакриламида (ПАА) в России. 3-е изд. М.: Инфолайн, 2023. 101 с.
4. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives / Nyrcz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M. // *Science of The Total Environment*. 2022, vol. 820, 153328.
5. Гольберг Г.Ю. Развитие теории образования и разрушения флокуляционных структур в процессах разделения суспензий тонкодисперсных продуктов обогащения углей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 48 с.
6. The Fractal Analysis of Aggregates Formed via a Bridging Flocculation Mechanism / Biggs S., Habgood M., Jameson G.J., Yao-de Yan // *Proceedings of the 26th Australian Chemical Engineering Conference (Chemeca 98)*, Port Douglas, Australia, 1998.
7. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into Bridging Flocculation // *Macromol. Symp.*, 2006, vol. 231, pp. 1-10.
8. Polymer Molecular Weight and Mixing Effects on Floc Compressibility and Filterability / Glover S.M., Yan Y.D., Jameson G.J., Biggs S. // *6th World Congress of Chemical Engineering*. Melbourne, 2001.
9. Gungoren C., Unver I.K., Ozdemir O. Investigation of flocculation properties and floc structure of coal processing plant tailings in the presence of monovalent and divalent ions // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 747-758.
10. A Review of Floc Strength and Breakage / Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., Parsons S.A. // *Water Research*. 2005, vol. 39, no. 14, pp. 3121-3137.
11. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019. №3. С. 106-112.
12. Liang Wen, Duoxi Yao. The Effect of Flocculants and Water Content on the Separation of Water from Dredged Sediment // *Water*. 2023, vol. 15, no. 13, 2462.
13. Ксенофонтов Б.С., Сазонов Д.В. Усовершенствование способа экспресс-контроля водоотдающих свойств осадков сточных вод // *Сантехника*. 2014. №2. С. 44-46.
14. Filtration of kaolinite and coal mixture suspension: Settling behavior and filter cake structure analysis / Yijiang Li, Yuting Chen, Wencheng Xia, Guangyuan Xie // *Powder Technology*. 2021, vol. 381, pp. 122-128.
15. Линев Б.И., Гольберг Г.Ю., Панфилов П.Ф. К вопросу об эффективности перемешивания суспензий с флокулянтами в статических перемешивающих устройствах. М.: МГТУ, 2005. Деп. в Горном информационно-аналитическом бюллетене 15.09.2005, №429/12-05.

16. Временные нормы технологического проектирования обогатительных фабрик ВНТП 3-92. М.: Министерство топлива и энергетики Российской Федерации, 1993. С. 52.
17. Соколова А.А. Оптимизация работы участков сгущения углеобогатительных фабрик // *Материалы международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2023)*, Москва, 02-05 октября 2023. М.: НИТУ «МИСиС», 2023. С. 347-349.
18. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailings // *The Coal Handbook: Towards Cleaner Coal Supply Chains (Second edition)*. Edited by Dave Osborne. Cambridge, US – Kidlington, UK: Woodhead Publishing Series in Energy, 2023, vol. 1, pp. 529-560.
19. Нормы технологического проектирования флотационных фабрик для руд цветных металлов ВНТП 21-86. М.: Министерство цветной металлургии СССР, 1986.
20. Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогатительных фабрик Кузнецкого бассейна. 2-е изд., перераб. и доп. Прокопьевск: Прокопьевское полиграфическое производственное объединение, 2007. 463 с.
21. Enhancement of the Efficiency of Flotation Tailings Dewatering on the Belt Presses using new Combinations of Flocculants and Coagulants / Lobanov F.I., Kanev N.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. // *Proc. XV International Coal Preparation Congress and Exhibition*. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006, vol. 2, pp. 537-544.
22. Азопков С.В. Комплексные титаносодержащие коагулянты: синтез и применение: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 18 с.
23. Read A.D. Selective flocculation separations involving hematite // *Institution of Mining and Metallurgy Transactions*. Section C. 1971, vol. 80, pp. 24-31.
24. Обоснование применения полиакриламидных флокулянтов для селективного разделения угольных шламов / Рубинштейн Ю.Б., Яровая О.В., Гольберг Г.Ю., Новак В.И. // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2011. №2. С. 97-102.
25. Новак В.И. Обоснование и разработка рациональной технологии флокуляционного разделения тонкодисперсных угольных шламов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 22 с.
26. Tao D., Groppo J.G., Parekh B.K. Enhanced Ultrafine Coal Dewatering using Flocculation Filtration Processes // *Minerals Engineering*. 2000, vol. 13, no. 2, pp. 163-171.
27. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics // *Vacuum*. 2015, vol. 114, pp. 50-57.
28. Барабанные вакуум-фильтры: сайт компании Intech GmbH LLC. URL: https://oil-filters.ru/drum_filters/ (дата обращения: 14.02.2024).
29. Na Zhang, Xumeng Chen, Yongjun Peng. Effects of froth properties on dewatering of flotation products – A critical review // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 155, 106477. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106477
30. Effects of Flocculant, Surfactant, Coagulant, and Filter Aid on Efficiency of Filtration Processing of Copper Concentrate: Mechanism and Optimization / Rezaei A., Abdollahi H., Gharabaghi M., Mohammadzadeh A.A. // *Journal of Mining and Environment*. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 119-141.
31. Влияние поверхностно-активных веществ на остаточную влажность продуктов фильтрования / Зимбовский И.Г., Погосян Э.С. // *Материалы международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2023)*, Москва, 02-05 октября 2023. М.: НИТУ «МИСиС», 2023. С. 353-354.
32. Mathewson D., Eschebach D. Belt Press Filter Handbook. Brisbane, Australia: Australian Coal Industry's Research Program (ACARP), 2022.
33. Calculation of sludge dewatering capacity of belt filter press: сайт Shandong Vinson Machinery Co., LTD. URL: http://www.zmmachinery.com/news_show.asp?id=12 (дата обращения: 14.02.2024).
34. Fester V., Werner R. Optimization of Polymer Dosing for Improved Belt Press Performance in Wastewater Treatment Plants. In: *Advances in Slurry Technology*. Ed. By Trevor Jones. London: Intech Open, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.108978.
35. Засядько А.В., Панфилов Ф.А., Гольберг Г.Ю. Опыт эксплуатации ленточных фильтр-прессов на операции обезвоживания концентратов и промпродуктов флотации коксующихся углей ОФ «Нерюн-гринская» // *Кокс и химия*. 2000. №9. С. 9-11.
36. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison // *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
37. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation / Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. // *Separation and Purification Technology*. 2021, vol. 259, no. 15, pp. 118-172.
38. Теоретическое обоснование способа измерения концентрации флокулянтов в технологических водах обогатительных фабрик / Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Гольберг Г.Ю., Резчикова П.С., Комарова С.Г. // *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: материалы 15-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов*, Москва, ИПКОН РАН, 25-28 октября 2021 г. М.: ИПКОН РАН, 2021. С. 252-255.
39. Адсорбционные и флокулирующие свойства модифицированного полиакриламида в водных дисперсиях каолина / Воробьев П.Д., Крутько Н.П.,

Чередниченко Д.В., Воробьева Е.В., Буча С.В., Липай Ю.В. // Вестні Національної академії наук Білорусі. Серія хімічних наук. 2022. Т. 58. №3. С. 273-279.

40. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Состояние процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2023. Т. 21. №3. С. 27-41.

References

1. Khazaie A., Samali B., Mazarji M., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Osborne D., Soldatov A.A. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*. 2022;14(6):918.
2. Ulrich E.V., Barkova A.S. Use of flocculants for wastewater treatment. *Ecosystem Transformation*. 2023;6(1):1-20.
3. Overview of the polyacrylamide (PAA) market in Russia. 3rd Edition. Moscow: Infomine, 2023, 101 p. (In Russ.)
4. Hyrycz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczyk S., Matuszak M. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives. *Science of the Total Environment*. 2022;820:153328.
5. Golberg G.Yu. *Razvitie teorii obrazovaniya i razrusheniya flokulyatsionnykh struktur v protsessakh razdeleniya suspenzii tonkodispersnykh produktov obogashcheniya uglei: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Development of the theory of the flocculation structure formation and destruction in the processes of separating suspensions of fine coal beneficiation products. Extended abstract of the doctoral thesis]. Moscow, 2019. 48 p.
6. Biggs S., Habgood M., Jameson G.J., Yao-de Yan. The fractal analysis of aggregates formed via a bridging flocculation mechanism. Proceedings of the 26th Australian Chemical Engineering Conference (Chemeca 98), Port Douglas, Australia, 1998.
7. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into bridging flocculation. *Macromol. Symp*. 2006;231:1-10.
8. Glover S.M., Yan Y.D., Jameson G.J., Biggs S. Polymer molecular weight and mixing effects on floc compressibility and filterability. The 6th World Congress of Chemical Engineering. Melbourne, 2001.
9. Gungoren C., Unver I.K., Ozdemir O. Investigation of flocculation properties and floc structure of coal processing plant tailings in the presence of monovalent and divalent ions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020;56(5):747-758.
10. Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., Parsons S.A. A review of floc strength and breakage. *Water Research*. 2005;39(14):3121-3137.
11. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Flow regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs. *Journal of Mining Science*. 2019;55(3):437-443.
12. Liang Wen, Duoxi Yao. The effect of flocculants and water content on the separation of water from dredged sediment. *Water*. 2023;15(13):2462.
13. Ksenofontov B.S., Sazonov D.V. Improving an express control method for water-output properties of wastewater sludges. *Santekhnika* [Sanitary Engineering]. 2014;(2):44-46. (In Russ.)
14. Yijiang Li, Yuting Chen, Wencheng Xia, Guangyuan Xie. Filtration of kaolinite and coal mixture suspension: Settling behavior and filter cake structure analysis. *Powder Technology*. 2021;381:122-128.
15. Linev B.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. Efficiency of mixing suspensions with flocculants in static mixers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2005, 429/12-05, 14 p. (In Russ.)
16. *Vremennye normy tekhnologicheskogo proektirovaniya obogatitelnykh fabrik VNTP 3-92* [Temporary regulations on production engineering of beneficiation plants VNTP 3-92]. Moscow: Ministry of Fuel and Power Engineering of the Russian Federation, 1993, 52 p. (In Russ.)
17. Sokolova A.A. Optimization of the operation of the thickening sections of coal processing factories. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i netraditsionnogo mineralnogo syrja» (Plaksin-skie chteniya-2023)* [Proceedings of the International Conference on Modern Problems of Integrated and Deep Processing of Natural and Non-Traditional Mineral Raw Materials (Plaksin Readings-2023)], Moscow, 02-05 October 2023. Moscow: National University of Science and Technology Moscow Institute of Steels and Alloys, 2023, pp. 347-349. (In Russ.)
18. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailing. The coal handbook: towards cleaner coal supply chains (Second edition). Edited by Dave Osborne. Cambridge, US – Kidlington, UK: Woodhead Publishing Series in Energy, 2023, vol. 1, pp. 529-560.
19. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya flotatsionnykh fabrik dlya rud tsvetnykh metallov VNTP 21-86* [Regulations on production engineering of flotation plants for non-ferrous metal ores VNTP 21-86]. Moscow: Ministry of Non-Ferrous Metallurgy of the USSR, 1986. (In Russ.)
20. Antipenko L.A. *Tekhnologicheskie reglamenty obogatitelnykh fabrik Kuznetskogo basseina* [Technological regulations on beneficiation plants of the Kuznetsk Basin]. Prokopenvsk: Prokopenvsk Polygraphic Production Association, 2007, 463 p. (In Russ.)
21. Lobanov F.I., Kanev N.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. Enhancement of the efficiency of flotation tailings dewatering on the belt presses using new combinations of flocculants and coagulants. Proceedings of the 15th International Coal Preparation Congress and Exhibition. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006, vol. 2, pp. 537-544.

22. Azopkov S.V. *Kompleksnyye titanosoderzhashchie koagulyanty: sintez i primeneniye: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Integrated titanium-containing coagulants: synthesis and application. Extended abstract of the Ph.D. thesis]. Moscow, 2023. 18 p.
23. Read A.D. Selective flocculation separations involving hematite. Institution of Mining and Metallurgy. Transactions. Section C. 1971;80:24-31.
24. Rubinshtein Yu.B., Yarovaya O.V., Golberg G.Yu., Novak V.I. Providing a rationale for using polyacrylamide flocculants for selective separation of coal sludge. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gorny zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2011;(2):97-102. (In Russ.)
25. Novak V.I. *Obosnovanie i razrabotka ratsionalnoy tekhnologii flokulyatsionnogo razdeleniya tonkodispersnykh ugolnykh shlamov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Providing a rational and development of rational technology for the flocculation separation of fine coal sludge. Extended abstract of the Ph.D. thesis]. Moscow, 2012. 22 p.
26. Tao D., Groppo J.G., Parekh B.K. Enhanced ultrafine coal dewatering using flocculation filtration processes. *Minerals Engineering*. 2000;13(2):163-171.
27. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics. *Vacuum*. 2015;114:50-57.
28. Drum vacuum filters. Available at: https://intechgmbh.ru/en/drum_filters-2/ (Accessed on February 14, 2024).
29. Na Zhang, Xumeng Chen, Yongjun Peng. Effects of froth properties on dewatering of flotation products – A critical review. *Minerals Engineering*. 2020;155: 106477. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106477
30. Rezaei A., Abdollahi H., Gharabaghi M., Mohammadzadeh A.A. Effects of flocculant, surfactant, coagulant, and filter aid on efficiency of filtration processing of copper concentrate: Mechanism and optimization. *Journal of Mining and Environment*. 2020;11(1):119-141.
31. Zimbovsky I.G., Pogosyan E.S. Effect of surfactants on residual moisture of filtration products. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i netraditsionnogo mineralnogo syrya» (Plaksinskie chteniya-2023)* [Proceedings of the International Conference on Modern Problems of Integrated and Deep Processing of Natural and Non-Traditional Mineral Raw Materials (Plaksin Readings-2023)], Moscow, 02-05 October 2023. Moscow: National University of Science and Technology Moscow Institute of Steels and Alloys, 2023, pp. 353-354 (In Russ.)
32. Mathewson D., Eschebach D. Belt press filter handbook. Brisbane, Australia: Australian Coal Industry's Research Program (ACARP), 2022.
33. Calculation of sludge dewatering capacity of belt filter press. Available at: http://www.zmmachinery.com/news_show.asp?id=12 (Accessed on February 14, 2024).
34. Fester V., Werner R. Optimization of polymer dosing for improved belt press performance in wastewater treatment plants. *Advances in Slurry Technology*. Ed. by Trevor Jones. London: Intech Open, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.108978
35. Zasyadko A.V., Panfilov F.A., Golberg G.Yu. Experience in the operation of belt filter presses used for dewatering concentrates and industrial products of flotation of coking coals at the Neryungrinskaya Coal Preparation Plant. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry]. 2000;(9):9-11. (In Russ.)
36. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison. *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
37. Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. *Separation and Purification Technology*. 2021;259(15):118-172.
38. Lavrinenko A.A., Kunilova I.V., Golberg G.Yu., Rezhikova P.S., Komarova S.G. Providing a rationale for the method of measuring the concentration of flocculants in process water of beneficiation plants. *Problemy osvoeniya nedr v XXI veke glazami molodykh: Materialy 15-i Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov* [Problems of mineral resources exploitation in the 21st century through the eyes of young people: Proceedings of the 15th International School of Young Scientists and Specialists]. Moscow: Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 252-255. (In Russ.)
39. Vorobiev P.D., Krutko N.P., Cherednichenko D.V., Vorobieva E.V., Bucha S.V., Lipai Yu.V. Adsorption and flocculation properties of modified polyacrylamide in water dispersions of kaolin. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series]. 2022;58(3):273-279. (In Russ.)
40. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Thickening and dewatering of coal flotation tailings. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(3):27-41. (In Russ.)

Поступила 19.02.2024; принята к публикации 25.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 19/02/2024; revised 25/03/2024; published 27/06/2024

Лавриненко Анатолий Афанасьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. Email: lavrin_a@mail.ru.

Гольберг Григорий Юрьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. Email: gr_yu_g@mail.ru.

Anatoly A. Lavrinenko – DrSc (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory, Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: lavrin_a@mail.ru.

Grigory Yu. Golberg – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: gr_yu_g@mail.ru.