

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО УГЛЯ ИЗ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ УЛЬТРАФЛОКУЛЯЦИЕЙ**Рулёв Н.Н.**, д.хим.н.,*Институт биокolloидной химии им. Ф.Д. Овчаренко НАНУ*

rulyovnn@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6895-2460

Небеснова Т.В., к.хим.н., доцент,*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

vig@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0001-7462-8931

Аннотация. Исследованы основные закономерности процесса ультрафлокуляционного разделения фаз хвостов флотационного углеобогащения с последующим их сгущением и прессфильтрацией и показана его высокая эффективность. Установлено, что применение предварительной ультрафлокулярной гидродинамической обработки угольно-минеральных суспензий позволяет в 1,25 раза повысить производительность сгустительного оборудования и уплотняемость осадка, в 1,5 – 2 раза увеличить скорость фильтрации и в 2 раза увеличить степень осветления воды по сравнению с «традиционной флокуляцией». Концентрация твердого в очищенной воде не превышает 3 г/л, что позволяет повторно ее использовать в качестве рабочей среды в технологическом процессе обогащения угля.

Ключевые слова: хвосты флотационного углеобогащения, сепарация, ультрафлокуляция, градиент скорости среды.

Введение. Переработка угля с выделением ценных компонентов в товарную продукцию сопровождается образованием жидких промышленных отходов в виде хвостов флотационного углеобогащения.

Данная система представляет собой тонкодисперсную гетерогенную устойчивую минеральную суспензию, не поддающуюся разделению традиционными методами. Малоэффективная работа аппаратов по сепарации и сгущению хвостов флотационного обогащения угля [1] приводит к повышению содержания твердого в оборотной воде, и как следствие, к снижению эффективности работы основного углеобогатительного оборудования, а также к интенсивному загрязнению окружающей среды.

Известно, что флокуляция представляет собой один из наиболее эффективных методов интенсификации процессов сепарации тонкодисперсных суспензий. В отечественной и зарубежной практике водоочистки широко используют водорастворимые полимеры, с целью связывания взвешенных в воде частиц в компактные крупные агрегаты для ускорения дальнейшего отделения их от воды седиментацией, фильтрацией и центрифугированием. Несмотря на продолжительное промышленное применение флокулянтов, их возможности используются не более, чем на 50%. Поэтому практическую ценность представляет собой определение оптимальных условий флокулярной обработки хвостов флотационного углеобогащения при его сепарации и поиск новых эффективных флокулянтов.

В работах [2-4] было показано, что эффективность флокуляции может быть увеличена в несколько раз путем использования соответствующей гидродинамической обработки (ГО) суспензии сразу после введения в нее флокулянта. Эти работы явились научным базисом для развития технологии, получившей название «Ультрафлокуляция» (УФ). В работе [5] на примере различных суспензий показано, что максимум эффективности флокулярного процесса в неоднородном турбулентном потоке соответствует максимуму силы сцепления (парной энергии связи) частиц, которая определяется их природой, а также типом и дозой флокулянта.

В последнее время УФ успешно применяется для сепарации разбавленных (концентрация менее 1-3 г/л) суспензий и эмульсий при очистке промышленных стоков и техногенных растворов [6-9].

В качестве примера разработана промышленная установка ТФС – 017/117, предназначенная для сепарации отработанных смазочно-охлаждающих эмульсий [8], главным элементом которой, является ультрафлокулятор, производительностью 1 куб.м/ч.

В работе [9] представлена флокуляционно-флотационная установка для очистки промышленных вод, образующихся при удалении нефтяных и масляных загрязнений с поверхности различных резервуаров.

Из развитой в работах [2-4, 10] теории следует, что УФ позволяет как минимум в 1,5-2 раза повысить эффективность сепарации не только разбавленных, но и концентрированных суспензий, образующихся в рудно-обогажительной промышленности. В последнее время эта проблема стала особенно актуальна в связи с истощением богатых месторождений и вовлечением в производство бедных и тонковкрапленных минералов, требующих более тонкого измельчения, что порождает проблемы сепарации, как концентрата, так и хвостов обогащения.

В работе [11] теоретически доказано целесообразность применения метода УФ при сепарации угольных суспензий, а также возможность эффективного использования флокулянта KANFLOCK – 130A.

Традиционным методом сепарации хвостов флотационного углеобогащения является сгущение и фильтрпрессование. Использование флокуляции в данном процессе позволяет существенно увеличить производительность сгустительного и обезвоживающего оборудования при одновременном снижении влажности шлама и остаточной концентрации взвешенных частиц в фильтрате.

Целью данной работы является повышение эффективности процесса пресс-фильтрационного разделения фаз устойчивых концентрированных угольно-минеральных суспензий предварительной ультрафлокуляцией путем исследования основных закономерностей данного процесса и определения рациональных условий его ведения.

Материалы и методика исследований. Объектом исследования в данной работе служили хвосты флотационного углеобогащения, полученные от угольной обогажительной фабрики. Концентрация суспензии составила 50 г/л, размер частиц дисперсной фазы колебался от 0,1 до 10 мкм. В качестве интенсификатора процесса агрегирования частиц взвеси использовали высокомолекулярный анионный флокулянт KANFLOCK – 130A (рабочая концентрация 1 г/л). В эксперименте использовали фильтрующую полиамидную ткань.

Методы исследования – экспериментальным методом исследовали:

- размер частиц дисперсной фазы суспензии – микроскопическим методом с помощью камеры Горяева;
- концентрацию дисперсной фазы суспензии – спектрофотометрически;
- влажность образующегося осадка – весовым методом.

Ультрафлокулярная обработка суспензии осуществлялась на лабораторной установке производительностью 3,5 л/ч [10]. В процессе обработки исследуемая суспензия и 0,1% раствора флокулянта с помощью соответствующих дозирующих перистальтических насосов непрерывно подавались непосредственно на вход проточного цилиндрического ультрафлокулятора, диаметр и высота ротора которого составляли 30 мм, а зазор между поверхностью цилиндра и стенками корпуса – 2 мм. Изменяя скорость вращения ротора, изменяли среднее значение градиента скорости среды G , в диапазоне от 0 до 10000 с⁻¹. Концентрацию флокулянта в суспензии изменяли путем изменения подачи соответствующего насоса. Общее время обработки суспензии в УФ составляло, примерно, 6 секунд. В экспериментах без УФ-гидродинамической обработки смесь суспензии и флокулянта по смесительной трубке подавалась непосредственно в приемную емкость.

В качестве лабораторного сгустителя непрерывного действия использовали установку, показанную на рис. 1. Сгуститель представлял собой вертикально расположенную стеклянную трубку 1 высотой 40 см и внутренним диаметром 3,5 см, закрытую с обоих концов резиновыми пробками 2, 3. В нижней пробке 2 было установлено две трубки 4, 5, по одной из которых непосредственно от ультрафлокулятора обрабатываемая суспензия

поступала на висоту 10 см от дна сгустителя, а через вторую трубку 5 с помощью перистальтического насоса откачивался осадок. В верхней пробке 3 также была установлена трубка 6, по которой из сгустителя выходила осветленная вода. Поскольку расход суспензии составлял примерно 1мл\с, осредненная скорость суспензии в сгустителе составляла, примерно, 6 см/мин, а полное время пребывания в сгустителе – 7 мин.

С целью определения влияния УФ-гидродинамической обработки на качество осветления воды в вертикальном сгустителе, образцы хвостов углеобогащения с концентрацией твердого 50 г/л сразу же после обработки в ультрафлокуляторе пропускали через описанный выше (рис. 1) лабораторный сгуститель, после чего осветленную воду анализировали на светопропускание и оптическую плотность с помощью оптического анализатора ФЭК – 3.

В качестве лабораторного пресс-фильтра использовали прибор, показанный на рис. 2, состоящий из ресивера 1 с герметичной крышкой 2 и соединенной с ним трубкой 3 разъемной капсулы 4. Внутри капсулы 4, удерживаемой в закрытом состоянии с помощью струбцины 5, располагалось кольцевое резиновое уплотнение 6 и фильтрующая салфетка 7, прижимаемая к рифленной съемной крышке капсулы 8, имеющей выход для фильтрата 9. В процессе эксперимента ресивер 1 заполняли сгущенным осадком, закрывали крышкой 2 и подсоединяли через клапан 10, выполненный в крышке 2, к компрессору (не показанному). Отфильтрованная вода собиралась в мерный цилиндр 11. По окончании эксперимента струбцину 5 снимали, капсулу 4 раскрывали и кек, сформированный внутри кольцевого уплотнения, а также салфетку извлекали.

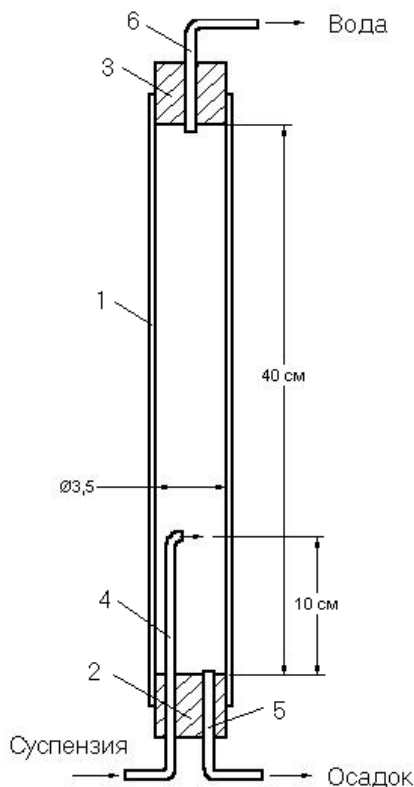


Рис. 1. Лабораторный вертикальный сгуститель непрерывного действия:
1 – стеклянная трубка; 2, 3 – резиновые пробки; 4 – трубка для ввода суспензии; 5 – трубка для отвода осадка; 6 – трубка для выпуска воды

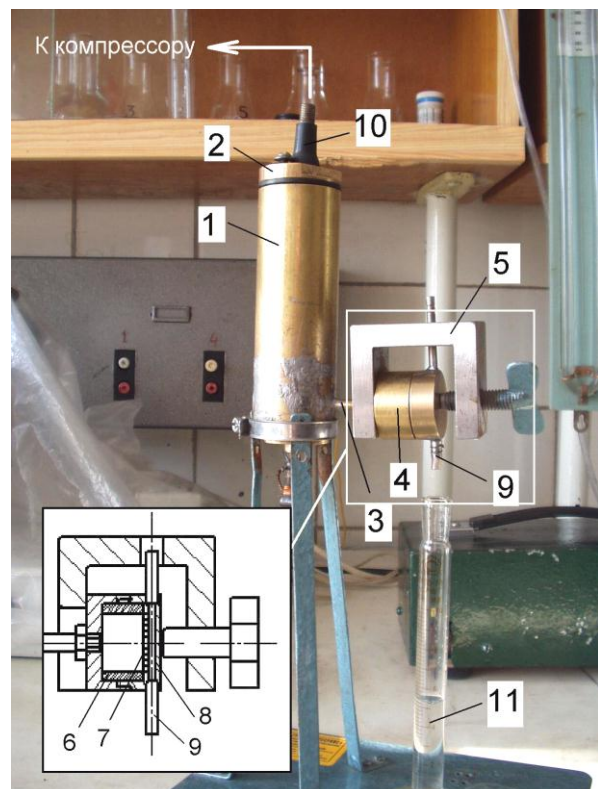


Рис. 2. Лабораторный пресс-фильтр:
1 – ресивер; 2 – крышка; 3 – соединительная трубка; 4 – разъемная капсула; 5 – струбцина; 6 – резиновое уплотнение; 7 – фильтрующая салфетка; 8 – рифленная крышка; 9 – выход для фильтрата; 10 – клапан; 11 – мерный цилиндр

Результаты исследований. Как известно, обязательным условием успешного проведения флокуляции является достаточно хорошая гидродинамическая обработка суспензии [5] после введения в нее флокулянта с целью равномерного распределения его молекул по объему суспензии, ускорения их адсорбции флокулируемыми частицами и увеличения частоты столкновения последних. Сепарация хвостов флотационного углеобогащения осуществляется стандартным методом – сгущение на вертикальном сгустителе и обезвоживание осадка на пресс-филт্রে. Непосредственно перед подачей в сгуститель в хвосты по обычной схеме подается анионный флокулянт марки KANFLOC-130A. Несмотря на то, что флокулянт способствует довольно быстрому осаждению основной массы взвеси, тем не менее, возникают две основные проблемы: высокая мутность осветленной воды и быстрое (через 300-500 циклов) закупоривание тканевых фильтров. Обе проблемы имеют одну и ту же причину – после введения флокулянта суспензия не подвергается необходимой гидродинамической обработке, при которой бы флокулянт равномерно распределялся по всему объему суспензии, а частицы взвеси имели бы возможность, многократно сталкиваясь, образовать плотные агрегаты, в которых наиболее мелкие частицы были надежно прикреплены к относительно крупным частицам. Именно наличие большого количества свободных тонкодисперсных частиц приводит к быстрому закупориванию межволоконного пространства тканевых фильтров.

Как следует из результатов измерений, представленных на рис. 3, 4, хвосты, обработанные в ультрафлокуляторе, отдают воду, которая, при дозах флокулянта более 30 г/т, в 2 раза более прозрачная, чем не обработанная. Следует также отметить, что при дозировках флокулянта более 50 г/т качество осветления очень высокое.

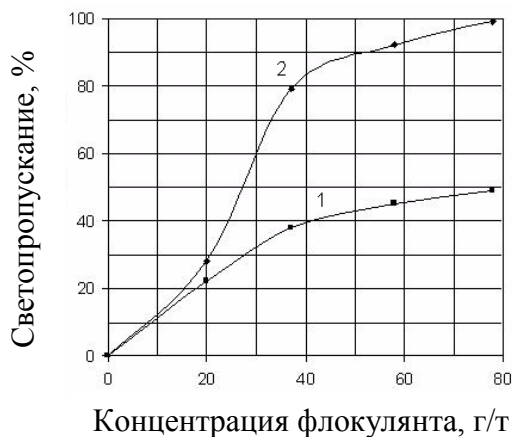


Рис. 3. Зависимость прозрачности осветленной воды на выходе сгустителя от расхода флокулянта: 1 – без предварительной гидродинамической обработки; 2 – с предварительной УФ-гидродинамической обработкой; градиент скорости среды $G=2500 \text{ c}^{-1}$; продолжительность обработки $t=6 \text{ c}$

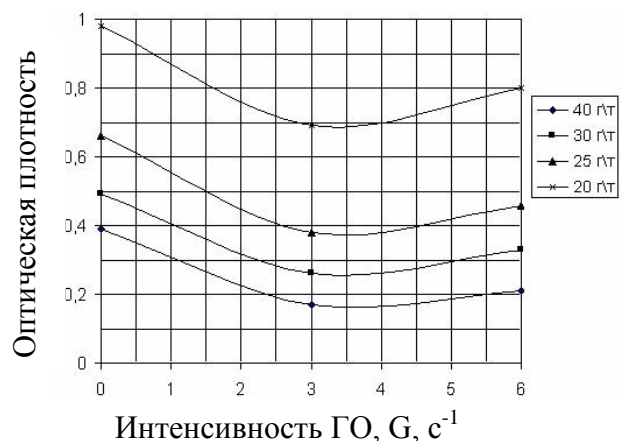


Рис. 4. Зависимость оптической плотности осветленной воды на выходе сгустителя от расхода флокулянта и интенсивности гидродинамической обработки (G); продолжительность обработки $t=6 \text{ c}$

Для определения оптимального режима ГО были также измерены зависимости оптической плотности осветленной воды (которая пропорциональна остаточной концентрации взвеси) от осредненного градиента скорости среды в ультрафлокуляторе при различных концентрациях флокулянта. Из данных, приведенных на рис. 3, 4 следует, что оптимальное значение G составляет примерно 2500 c^{-1} , причем при концентрации флокулянта 25 г/т УФ-гидродинамическая обработка дает те же результаты, что и при концентрации флокулянта 40г/т, но без ГО. С другой стороны, при концентрации флокулянта

40 г/т ГО позволяет снизить остаточное содержание взвеси более чем в два раза.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что в начальные моменты седиментации скорость опускания границы осадка суспензии, не подвергнутой УФ-гидродинамической обработке, выше, чем у суспензии, обработанной в ультрафлокуляторе. Однако, через 15 минут, обработанная в УФ суспензия начинает оседать быстрее и по прошествии 100 мин. объем ее осадка становится на 25 процентов меньше, чем у не обработанной в УФ суспензии. Следует особо отметить, что слой осветленной воды над УФ-гидродинамически обработанным осадком намного чище, чем над осадком не подвергнутым УФ-обработке.

Таким образом, из представленных данных следует, что УФ-обработка позволяет не только существенно повысить качество осветленной воды, но и на 25% увеличить уплотняемость осадка, что автоматически увеличивает производительность вертикального сгустителя по твердому осадку.

Основной вклад в гидравлическое сопротивление кека при фильтрации под давлением вносят свободные тонкодисперсные частицы, заполняющие поровое пространство между средними и мелкими частицами и, тем самым, создающие тонкую капиллярную структуру. Поскольку в хвостах размер частиц, примерно, на порядок меньше, то и средний поперечный размер капилляров будет на порядок меньше. Вследствие того, что гидравлическое сопротивление капилляра обратно пропорционально четвертой степени его диаметра и прямо пропорционально его длине, то отсюда следует, что сопротивление осадка хвостов толщиной в 15 мм должно превышать сопротивление осадка флотоконцентрата толщиной в 8 мм примерно в 20000 раз. Этим собственно и объясняется тот факт, что при фильтрации осадка хвостов требуется перепад давления, примерно, в 10 раз больше, а время – примерно, в 1000 раз больше. Логично предположить, что так же, как и в случае с флотоконцентратом [10], существенное снижение сопротивления осадка хвостов может быть достигнуто путем УФ-гидродинамической обработки, при которой обеспечивается связывание мелких частиц с более крупными и, тем самым, снижается их способность формировать тонкую капиллярную структуру. С этой целью были измерены кинетические характеристики сгущенных осадков хвостов, представленные на рис. 6. С целью измерения гидравлического сопротивления кека в средней по времени фазе фильтрации, концентрацию осадка намеренно довели до, примерно, 300 г/л, что несколько ниже используемой на практике, но позволяет выделить прямолинейный участок на кривой зависимости «время фильтрации – количество фильтрата». В качестве иллюстрации вклада УФ-гидродинамической обработки в фильтруемость осадка на рис. 6 представлены кинетические зависимости процесса фильтрации в напорном фильтре образца, прошедшего УФ-обработку и образца, не подвергнутого ей. Из графиков видно, что образец, обработанный на ультрафлокуляторе, имеет гидравлическое сопротивление на восходящем (прямолинейном) участке кривой (соответствующем фазе сформированного кека), примерно, вдвое меньше, чем образец, не прошедший гидродинамическую обработку. Таким образом, можно считать доказанным, что УФ-обработка позволяет существенно (в 1,5-2 раза) снизить время фильтрации.

Гидродинамическое сопротивление, возникающее при фильтровании концентрированных суспензий, R складывается из сопротивления осадка (кека) R_c и фильтрующей ткани R_t :

$$R = R_c + R_t . \quad (1)$$

Поскольку фильтрующая ткань используется многократно (до 1000 циклов и более), ее сопротивление от цикла к циклу увеличивается вследствие засорения тонкодисперсной фракцией суспензии в соответствии с формулой:

$$R_t = R_{t0} e^{aN} , \quad (2)$$

где R_{t0} – начальное сопротивление ткани, N – число циклов фильтрации, a – константа, определяемая свойствами фильтрующей ткани (ФТ) и фильтруемой суспензии. На ранних стадиях эксплуатации ФТ ($N < 100$) ее сопротивление намного ниже сопротивления кека и поэтому не оказывает существенного влияния на процесс фильтрации. По мере же засорения

ФТ ее сопротивление растет по экспоненциальному закону, определяемому константой a , и может существенно превзойти сопротивление чека R_c .

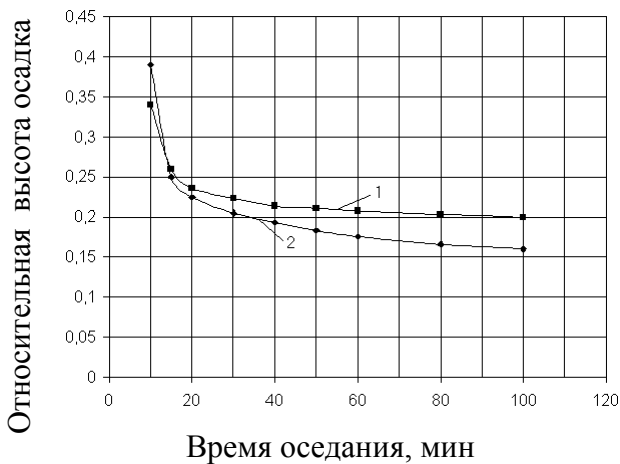


Рис. 5. Зависимость относительной высоты осадка хвостов флотационного обогащения угля от времени оседания: 1 – флокуляция без гидродинамической обработки, 2 – флокуляция с УФ-гидродинамической обработкой. Концентрация твердого – 50 г/л. Концентрация флокулянта (KANFLOK-130A) – 60 г/т. Исходный объем суспензии – 600 мл

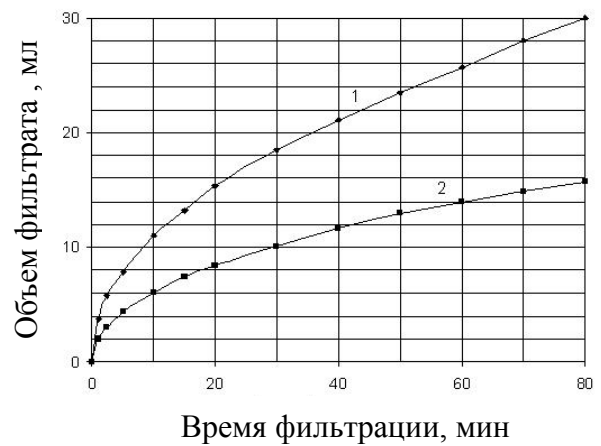


Рис. 6. Кинетика первого цикла (свежий тканевый фильтр) фильтрации под давлением (6 атм.) осадка (300 г/л) хвостов флотации после флокуляции (расход флокулянта – 60 г/т): сечение фильтра – 2,24 см²; толщина фильтруемого слоя осадка – 15 мм; 1 – ультрафлокуляция: остаточная фильтруемость чека – 0,233 мл/мин; 2 – флокуляция без гидродинамической обработки: остаточная фильтруемость чека – 0,116 мл/мин

Очевидно, что скорость засорения ФТ будет происходить тем быстрее, чем больше в осадке не связанных тонкодисперсных частиц. Поскольку при использовании ультрафлокуляции концентрация не связанных мелких частиц намного меньше, чем при обычной флокуляции, то отсюда следует, что и засорение ФТ будет происходить намного медленнее.

Для получения количественных характеристик были измерены гидравлические сопротивления фильтр-кеков осадков (сечением 2,24 см²) для обработанной и не обработанной на ультрафлокуляторе суспензии хвостов, которые составили соответственно: $R_c(УФ)=370000 \text{ м}^{-1}$ и $R_c(Ф)=750000 \text{ м}^{-1}$. Начальное сопротивление фильтрующей салфетки площадью 2,24 см² составило при этом $0,51 \text{ м}^{-1}$. После этого, путем многократного использования одной и той же салфетки для фильтрования не обработанной на УФ суспензии (всего 220 циклов) был измерен параметр a , входящий в формулу (2), который составил $a(Ф)=0,03 \pm 0,01$. Для определения соответствующего параметра для обработанной на УФ суспензии $a(УФ)$, проводились сравнительные эксперименты по измерению гидравлического сопротивления салфетки при многократном фильтровании через нее осветленной воды. Из результатов этих экспериментов, представленных на рис. 7, следует, что при фильтрации обработанных на ультрафлокуляторе хвостов скорость засорения салфетки, примерно, в 4 раза меньше, чем при фильтрации не обработанных, а величина $a(УФ)$ составляет примерно $0,007 \pm 0,002$.

В качестве иллюстрации на рис. 8 представлены зависимости $R(N)$, рассчитанные по формулам (1) и (2) после подстановки в них выше приведенных значений параметров R_c и a . Из графиков следует, что использование УФ-гидродинамической обработка позволяет не

только в 1,5-2 раза увеличить скорость фильтрации, но и, примерно, в 4 раза увеличить срок работы фильтрующей ткани.

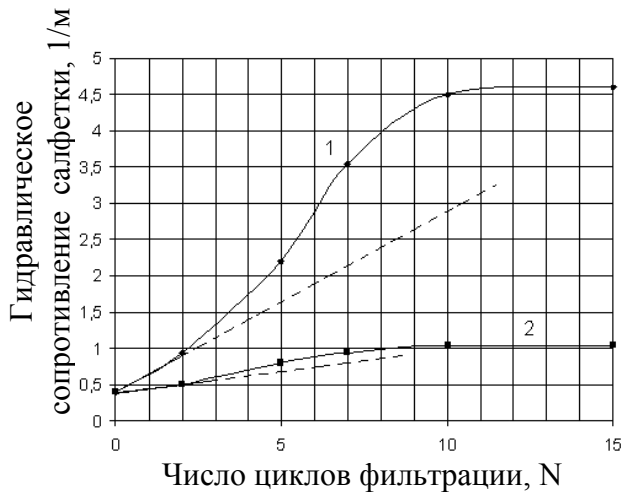


Рис. 7. Гидравлическое сопротивление фильтровальной салфетки после N циклов фильтрации одной и той же осветленной воды (900 мл) хвостов углеобогащения, подвергнутых флокуляции и сгущению: расход флокулянта – 60 г/т; время отстаивания – 10 минут; 1 – без гидродинамической обработки; 2 – с использованием УФ-гидродинамической обработки.
Соотношение наклонов касательных в точке N = 0 определяет соотношение параметров a в формуле (2)

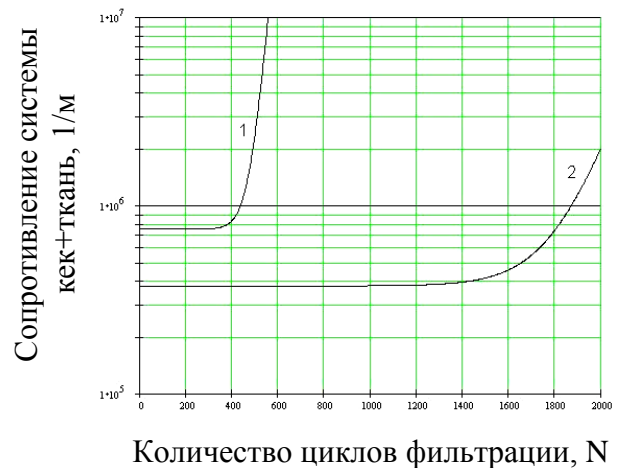


Рис. 8. Зависимость суммарного сопротивления сфлокулированного осадка хвостов флотационного углеобогащения и ткани от числа циклов фильтрации N: концентрация твердого – 300 г/л, площадь фильтра – 2,24 см², толщина слоя – 15 мм, давление – 6 атм.;
1 – без гидродинамической обработки;
2 – с предварительной гидродинамической обработкой

Выводы:

1. Наличие в хвостах флотационного углеобогащения большого количества субмикронных частиц является причиной низкого качества осветления воды, высокого гидравлического сопротивления осадка и быстрой засоряемости фильтрующей ткани.
2. Использование ультрафлокулярной гидродинамической обработки позволяет: в 2 раза увеличилась степень осветления воды; в 1,25 раза повысить уплотняемость осадка и производительность вертикального сгустителя; в 1,5-2 раза увеличить скорость фильтрации; в 3-4 раза увеличить срок службы фильтрующих салфеток.
3. Рациональные условия ведения процесса ультрафлокуляции: расход флокулянта 60 г/т, длительность обработки 6 с, градиент скорости среды 2500 с⁻¹.
4. Применение технологии предварительной ультрафлокуляции хвостов флотационного обогащения угля в процессе его сепарации позволяет достичь эффекта выделения по взвешенным и коллоидным веществам до 97%.
5. Концентрация минеральных частиц в очищенной водной фазе не превышает 3 г/л, что позволяет повторно ее использовать в качестве рабочей среды в технологическом процессе обогащения угля.

Литература

1. Шкоп А.А. Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий / А.А. Шкоп // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2015. – Том 2. – №6(74). – С. 44-49.

2. Rulyov N.N. Optimization of hydrodynamic treatment regime in the processes of sorption-flocculation water purification from organic contaminants / N.N. Rulyov, A. Maes, V.J. Korolyov // *Colloids & Surfaces A*: – Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc, 2000. – Vol.175. – №2. – P. 371-381.
3. Rulyov N.N. Ultra-flocculation: Theory, Experiment, Applications: In book “Particle Size Enlargement in Mineral Processing”. – Montreal (Canada): Metallurgy and Petroleum, 2004. – Vol.72. – №2. – P. 197-214.
4. Rulyov N.N. Ultraflocculation of diluted fine dispers suspensions / N.N. Rulyov, T.A. Dontsova, V.Ja. Korolyov // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – Philadelphia (USA): Taylor and Francis, Inc, 2005. – Vol.26. – № 3-4. – P.203-217.
5. Rulyov N.N. The pair binding energy of particles and size flocks, which are formed in the turbulent flow / N.N. Rulyov, T.A. Dontsova, T.V. Nebesnova // *Khimiya I Tekhnologiya Vody*. – Kiev, 2005. – Vol. 27. – №1. – P. 1-17.
6. Рулев Н.Н. Ультрафлокуляция стоков газоочистки металлургических предприятий / Н.Н. Рулев, О.В. Кравченко // *Збагачення корисних копалин*. – Днепропетровск, НГУ, 2013. – Вип. 55 (96). – С. 53-62.
7. Рулев Н.Н. Интенсификация процесса сепарации фаз маслосодержащих сточных вод методом ультрафлокуляции и микрофлотации / Н.Н. Рулев, Т.В. Небеснова // *Вісник ОДАБА*. – Одеса, Оптимум, 2015. – Вип. 60. – С. 467-473.
8. Рулев Н.Н. Технология сепарации фаз отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей / Н.Н. Рулев, Т.В. Небеснова // *Вісник ОДАБА*. – Одеса, Антлант, 2016. – Вип. 65. – С. 165-170.
9. Небеснова Т.В. Флотационная установка для очистки сточных вод, образующихся при мойке емкостей, загрязненных ограниченными веществами / Т.В. Небеснова // *Вісник ОДАБА*. – Одеса, 2017. – Вип. 67. – С. 134-139.
10. Рулев Н.Н. Очистка сточных вод флотационного углеобогащения методом ультрафлокуляции / Н.Н. Рулев, Т.В. Небеснова // *Вісник ОДАБА*. – Одеса, 2018. – Вип. № 72. – С.153-161.
11. Rulyov N.N. Application of the ultra-flocculation for improvements of fine coalconcentrate dewatering / N.N. Rulyov, V.J. Korolyov, N.M. Kovalchuk // *Coal Preparation*. – Philadelphia (USA): Taylor and Francis, Inc, 2006. – Vol.26. – №3. – P. 17-32.

References

- [1] A.A. Shkop, "Obezvozhivanie ugolnyih polidispersnyih suspenziy", *Vostochno – Evropeyskiy zhurnal peredovyih tekhnologiy*, Harkov, NTU «HPI», Vol. 2, no 6(74), pp.44-49, 2015.
- [2] N.N. Rulyov, A. Maes, V.J. Korolyov, "Optimization of hydrodynamic treatment regime in the processes of sorption-flocculation water purification from organic contaminants", *Colloids & Surfaces A*: Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc, Vol. 175, no 2, pp. 371-381, 2000.
- [3] N.N. Rulyov, "Ultra-flocculation: Theory, Experiment, Applications": In book “Particle Size Enlargement in Mineral Processing”, *Montreal (Canada): Metallurgy and Petroleum*, Vol. 72, no 2, pp. 197-214, 2004.
- [4] N.N. Rulyov, T.A. Dontsova, V.Ja. Korolyov, "Ultraflocculation of diluted fine dispers suspensions", *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, Philadelphia (USA): Taylor and Francis, Inc, Vol. 26, no 3-4, pp. 203-217, 2005.
- [5] N.N. Rulyov, T.A. Dontsova, T.V. Nebesnova, "The pair binding energy of particles and size flocks, which are formed in the turbulent flow", *Khimiya I Tekhnologiya Vody*, Kiev, Vol. 27, no 1, pp. 1-17, 2005.
- [6] N.N. Rulyov, O.V. Kravchenko, "Ul'traflokulyatsiya stokov gazoochistki metallurgicheskikh predpriyatiy", *Zbagachennya korisnikh kopalin*, Dnepropetrovsk, NGU, Vol. 55(96), pp. 53-62, 2013.

- [7] N.N. Rulyov, T.V. Nebesnova, "Intensifikatsiya protsessa separatsii faz maslosoderzhashchikh stochnykh vod metodom ul'traflokulyatsii i mikroflotatsii", *Visnyk ODABA*, Odesa, Vol. 60, pp. 467-473, 2015.
- [8] N.N. Rulyov, T.V. Nebesnova, "Tekhnologiya separatsii faz otrabotannykh smazochokhlagdayuzyikh gidkosteyy", *Visnyk ODABA*, Odesa, Vol. 65, pp. 165-170, 2016.
- [9] T.V. Nebesnova, "Flotatsionnaya ustanovka dlya ochistki stochnykh vod, obrazuyushchikhsya pri moyke yemkostey, zagryaznennykh ogranicheskimi veshchestvami", *Visnyk ODABA*, Odesa, Vol. 67, pp. 134-139, 2017.
- [10] N.N. Rulyov, T.V. Nebesnova, "Ochistka stochnykh vod flotatsionnogo ugleobogascheniya metodom ultraflokulyatsii", *Visnyk ODABA*, Odesa, Vol. 72, pp. 153-161, 2018.
- [11] N.N. Rulyov, V.J. Korolyov, N.M. Kovalchuk, "Application of the ultra-flocculation for improvements of fine coalconcentrate dewatering", *Coal Preparation*, Philadelphia (USA): Taylor and Francis, Inc, Vol. 26, no 3, pp. 17-32, 2006.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ТОНКОДИСПЕРГОВАНОГО ВУГІЛЛЯ З ХВОСТІВ ФЛОТАЦІЙНОГО ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ УЛЬТРАФЛОКУЛЯЦІЄЮ

Рульов Н.Н., д.хім.н.,
Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАНУ
nrulyov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6895-2460
Небеснова Т.В., к. хім.н., доцент,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
vig@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0001-7462-8931

Анотація. Рідкі промислові відходи у вигляді хвостів флотаційного збагачення вугілля являють собою тонкодисперсну гетерогенну стійку мінеральну суспензію, яка не піддається поділу традиційними методами. З розвиненою в попередніх роботах теорії, а також експериментів слідує, що ультрафлокуляція (УФ) дозволяє як мінімум в 1,5-2 рази підвищити ефективність сепарації не тільки розбавлених, але і концентрованих суспензій, що утворюються в рудно-збагачувальній промисловості.

Як відомо, обов'язковою умовою успішного проведення флокуляції є досить хороша гідродинамічна обробка суспензії після введення в неї флокулянта з метою рівномірного розподілу його молекул за обсягом суспензії, прискорення їх адсорбції частинками, які флокуються і збільшення частоти зіткнення останніх.

У даній роботі наведені результати досліджень ефективності методу УФ при поділі фаз хвостів флотаційних вуглезбагачень. Об'єктом дослідження в даній роботі служили хвости флотаційного вуглезбагачення, отримані від вугільної збагачувальної фабрики. Концентрація суспензії склала 50 г/л, розмір часток дисперсної фази коливався від 0,1 до 10 мкм. Як інтенсифікатор процесу агрегування частинок суспензії використано високомолекулярний аніонний флокулянт KANFLOCK – 130А (робоча концентрація 1 г/л). В експерименті використовували фільтруючу поліамідну тканину.

Досліджено основні закономірності процесу ультрафлокуляційного поділу фаз хвостів флотаційного вуглезбагачення з подальшим їх згущенням і пресфільтрацією і показана його висока ефективність. Встановлено, що застосування попередньої ультрафлокулярної гідродинамічної обробки вугільно-мінеральних суспензій дозволяє в 1,25 рази підвищити продуктивність обладнання для згущення та ущільнення осаду, в 1,5 - 2 рази збільшити швидкість фільтрації і в 2 рази збільшити ступінь освітлення води в порівнянні з «традиційною флокуляцією».

Раціональні умови ведення процесу ультрафлокуляції: витрата флокулянта 60 г/т, тривалість обробки 6 с, градієнт швидкості середовища 2500 с⁻¹. Застосування технології попередньої ультрафлокуляції хвостів флотаційного вуглезбагачення вугілля в процесі його

сепарації дозволяє досягти ефекту виділення по зваженим і колоїдним речовинам до 97%.

Концентрація мінеральних часток в очищеній водній фазі не перевищує 3 г/л, що дозволяє повторно її використовувати як робоче середовище в технологічному процесі збагачення вугілля.

Ключові слова: хвости флотаційного вуглезбагачення, сепарація, ультрафлокуляція, градієнт швидкості середовища.

INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF ISOLATION OF THIN-DISPERSED CARBON FROM TAILS OF FLOTATION ENRICHMENT BY ULTRAFLOCCULATION

Rulyov N.N., Dr. Chemical Sciences,
Institute of biocolloid chemistry of F.D. Ovcharenko of NASU
nrulyov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6895-2460

Nebesnova T.V., Candidate of Chemical Sciences,
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
vig@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0001-7462-8931

Abstract. Liquid industrial wastes in the form of tailings of coal flotation enrichment are a finely dispersed heterogeneous stable mineral suspension, which is not amenable to separation by traditional methods. It follows from the theories developed in previous works as well as experiments that ultraflocculation (UF) allows at least a factor of 1.5–2 times to increase the separation efficiency of not only dilute, but also concentrated suspensions formed in the ore-processing industry.

As it is known, a prerequisite for successful flocculation is a fairly good hydrodynamic treatment of the suspension after introducing flocculant into it in order to evenly distribute its molecules throughout the suspension, accelerate their adsorption by flocculating particles and increase the collision frequency of the latter.

This work presents the results of research of the effectiveness of the UF method in the separation of the phases of the tailings of flotation coal enrichments. The object of research in this work was the tailings of flotation coal preparation, obtained from the coal processing plant. The suspension concentration was 50 g/l, the particle size of the dispersed phase ranged from 0.1 to 10 microns. As an intensifier of the aggregation process of suspended particles, high-molecular anionic flocculant KANFLOCK – 130A (working concentration 1 g/l) was used. In the experiment, polyamide fabric filter was used.

The main regularities of the process of ultraflocculation phase separation of the tailings of flotation coal preparation with their subsequent thickening and press filtering are investigated and its high efficiency is shown. It has been established that the use of preliminary ultraflocculation hydrodynamic treatment of coal-mineral suspensions makes it possible to increase the productivity of thickening equipment and the compaction of sediment by 1.25 times, to increase the filtration rate by 1.5 - 2 times and to increase the degree of water clarification by 2 times.

Rational conditions for the process of ultra-flocculation: flocculant consumption 60 g/t, treatment time 6 s, medium velocity gradient 2500 s^{-1} . The using technology of preliminary ultra-flocculation of tailings of coal flotation in the process of its separation allows to achieve the effect of separation of suspended and colloidal substances up to 97%.

The concentration of mineral particles in the purified aqueous phase does not exceed 3 g/l, which allows it to be reused as a working agent in the process of coal preparation.

Key words: tails of flotation enrichment, separation, ultraflocculation, medium velocity gradient.

Стаття надійшла 20.06.2019