

УДК 622.794

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СГУЩЕНИЯ И ОБЕЗВОЖИВАНИЯ
ХВОСТОВОЙ ПУЛЬПЫ УЛЬТРАФЛОКУЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ**

**Н. К. Тусупбаев¹, Н. Л. Медяник², А. М. Есенгазиев¹,
С. М. Билялова¹, М. А. Ертаев¹**

¹*Satbayev University, АО “Институт металлургии и обогащения”,*

E-mail: n.tussupbayev@satbayev.university, ул. Шевченко, 29, 050010, г. Алматы, Казахстан

²*Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,*

E-mail: chem@magtu.ru, просп. Ленина, 38, 455000, г. Магнитогорск, Россия

Изложены результаты исследований по сгущению и обезвоживанию суспензий из отвальных хвостов флотационного обогащения Жезказганской обогатительной фабрики с использованием прибора УльтрафлокТестер в присутствии различных флокулянтов серии Superfloc фирмы “Kemiga”. Показано, что среди испытываемых флокулянтов, имеющих в составе различные полярные группы, большую эффективность по отношению к суспензиям проявил флокулянт анионного типа марки А-150. Установлено, что относительно плотные суспензии (100 г/л) следует обрабатывать при градиенте скорости $G = 500 - 1000 \text{ с}^{-1}$ в течение 12 с, в то время как суспензии с относительно средней плотностью 50 г/л — при $G = 1000 - 1500 \text{ с}^{-1}$ в течение 6 с. Проведена оценка влияния интенсивности гидродинамической обработки на остаточную концентрацию взвеси в переливе и на влажность сфлокулированного осадка до и после фильтрования под давлением.

Отвальные хвосты флотации, сгущение, фильтрация, флокуляция, флокулянты, Ультрафлок-Тестер, градиент скорости среды

DOI: 10.15372/FTPRPI20200414

На горно-обогатительных фабриках получаемые продукты обогащения содержат большое количество воды и поэтому непригодны для транспортировки и дальнейшей металлургической переработки. Удаление влаги из продуктов обогащения осуществляется с применением ряда подготовительных операций, называемых обезвоживанием и сопровождающих основные процессы обогащения.

Распространены в основном механические и термические методы обезвоживания [1]. К механическим относятся дренирование, центробежное обезвоживание, сгущение и фильтрование, к термическим — сушка. К результатам процесса обезвоживания можно отнести доведение товарных продуктов обогащения до кондиционной влажности (6–9 %) в соответствии с требованиями потребителей и условиями транспортировки; осветление технологической воды (скрубберной, слива сгустителя концентрата и др.) до необходимого уровня позволит использовать очищенные сточные воды для собственных нужд горно-обогатительного производства и существенно снизить экологическую нагрузку в регионе, отказавшись от строительства новых хвостохранилищ [2].

Немаловажное значение имеет и другая операция — сгущение, которое приводит к повышению концентрации твердой фазы в осаждаемом продукте по сравнению с исходной пульпой и получению слива с минимальной концентрацией твердых частиц. Сгущению подвергают различные продукты обогащения: промпродукты — для удаления воды перед их дальнейшей переработкой, концентраты — перед фильтрованием, отвальные хвосты — для получения оборотной воды и сокращения объемов хвостохранилищ. Качество сгущения зависит от содержания, минерального и гранулометрического состава твердой фазы в исходной суспензии, формы и размера частиц [3].

Существуют различные методы интенсификации процесса сгущения: усовершенствование конструкции оборудования для сгущения; подбор оптимального типа и расхода флокулянта; корректировка pH среды; стабилизация систем образования флокул. В [4] предложены способы интенсификации процесса сгущения за счет изменения конструктивных особенностей сгустителя на фабрике и подбора эффективного флокулянта. При разработке регламента операции сгущения хвостов гравитационного обогащения руды Васильевского месторождения сравнивались сгустители разных производителей. Указывалось, что самую стабильную работу при производительности фабрики 300 тыс. т руды в год показал сгуститель Supaflo диаметром 15 м при использовании флокулянта Praestol 2520.

Показано, что в интервале pH 1.1–8.1 существенно изменяется флокулирующий эффект исследованных реагентов при извлечении тяжелых металлов из сточных вод горных предприятий медного комплекса [5]. Эффективность действия высокомолекулярных полимерных флокулянтов определялась по скорости осаждения твердой фазы методом седиментационного анализа. Обнаружено, что благодаря предварительной коагуляции дисперсных систем, их последующая флокуляция проходит более интенсивно, при этом флокулирующий эффект всех реагентов увеличивается в 1.5 раза. Улучшение флокуляции после коагуляции обусловлено нейтрализацией заряда частиц дисперсной фазы модельных растворов ионами коагулянта, а изменение размеров дисперсной фазы, содержащих ионы тяжелых металлов, приводит к образованию более плотных осадков с меньшей массовой долей влаги.

Процесс сгущения продуктов обогащения зависит от природы флокулянтов и, как правило, лучшей флокулирующей способностью обладают флокулянты с большой молекулярной массой и “активными” функциональными группами: для анионных флокулянтов это сульфогруппа (полистиролсульфонат натрия), а для катионных флокулянтов — аминогруппа (четвертичная аммониевая соль) [6].

В [7] исследовано влияние ряда анионных флокулянтов на степень осветления шламовых вод при сгущении на радиальном сгустителе тонких угольных отходов флотации с содержанием твердой фазы 30–60 г/л. Осветленную воду слива сгустителя направляют в оборотный технологический цикл углеобогатительной фабрики. В [8] приведены уравнения, позволяющие определить гидродинамические параметры течения суспензий, такие как напряжения сдвига, скорость потока, размер и пористость флокул, обеспечивающие сохранность флокуляционных структур. Следует отметить, что переход флокулянтов из исходного раствора в суспензию, их равномерное распределение в дисперсионной среде и адсорбция на поверхности взвешенных частиц требует достаточно большого времени, что негативно влияет на технологические показатели обогатительных фабрик.

Для того чтобы значительно ускорить процесс сгущения пульпы и при этом обеспечить высокую степень осветления водной фазы, рекомендуется использовать метод ультрафлокуляции [9, 10]. Ультрафлокуляционная обработка суспензии уменьшает время флокуляции примерно в 100 раз и повышает ее эффективность. Такой результат достигается за счет кратковременной обработки суспензии в сильно неоднородном гидродинамическом поле, формируемом в цилин-

дрическом флокуляторе, в котором создается интенсивное вихревое турбулентное движение. Применение столь сильно неоднородных гидродинамических полей позволяет в течение нескольких секунд не только достичь равномерного распределения макромолекул флокулянта в объеме суспензии и на поверхности хлопьевидных взвешенных частиц, но и образовывать более крупные и компактные хлопья. Кроме того, этот подход значительно сокращает время обработки суспензий, а также расход дорогостоящих флокулянтов [9].

В [10] приведены основные закономерности процесса ультрафлокуляционного разделения фаз хвостов флотационного углеобогащения с последующим их сгущением и пресс-фильтрацией и показана его высокая эффективность. Установлено, что предварительная ультрафлокулярная гидродинамическая обработка угольно-минеральных суспензий повышает производительность сгустительного оборудования и уплотняемость осадка в 1.25 раза, увеличивает скорость фильтрации и степень осветления воды в 1.5–2.0 раза по сравнению с традиционной флокуляцией. Концентрация твердого в очищенной воде не превышает 3 г/л, что позволяет использовать ее повторно в качестве рабочей среды в технологическом процессе обогащения угля. В [11] представлены испытания по сгущению свинцово-цинкового концентрата месторождения Шалкия с помощью лабораторного прибора УльтрафлокТестер с применением флокулянтов фирмы “Kemira”. Согласно результатам исследования, наибольшую эффективность показал неионогенный флокулянт марки N-100 при расходе 24 г/т, оптимальной гидродинамической обработке в диапазоне 1300–1500 с⁻¹, скорости фильтрации 0.44 м/с и влажности отфильтрованного кека не более 24 %.

Таким образом, в результате ультрафлокуляционной обработки происходит не только быстрое и равномерное распределение молекул флокулянта в суспензии и их адсорбция на поверхности частиц, но и образование плотных флокул. Важным преимуществом ультрафлокулярной обработки является то, что она обеспечивает агрегирование крупных и мелких взвешенных частиц в устойчивые агрегаты непосредственно в процессе формирования флокул еще до попадания их в сгуститель, что делает возможным их быструю седиментацию. Интенсификация процессов сгущения и обезвоживания продуктов обогащения горно-обогатительных предприятий может быть достигнута с использованием инновационных промышленных ультрафлокуляторов, применение которых позволит уменьшить потерю полезных компонентов в хвостовой пульпе и улучшить очистку оборотной воды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Проведены исследования по интенсификации процессов сгущения и обезвоживания хвостовой пульпы флотационного обогащения Жезказганской обогатительной фабрики с помощью ультрафлокуляционной обработки. Использовались флокулянты серии Superfloc финского производителя “Kemira”, представляющие собой сополимеры полиакриламида высокой молекулярной массы с различной степенью ионности (таблица). Приготовление раствора флокулянтов серии Superfloc проходило при температуре 60–70 °С. Изучение распределения частиц по размерам в хвостах флотации Жезказганской обогатительной фабрики осуществлялось на приборе Photocor-Compact (рис. 1).

Характеристика реагентов-флокулянтов серии Superfloc

Характеристика реагентов	Серия Superfloc				
	C-494	C-496	C-498	A-150	N-100
Ионность флокулянта		Катионный		Анионный	Неионный
Молярная масса	5.8·10 ⁶	6.4·10 ⁶	4.1·10 ⁶	15.2·10 ⁶	10.1·10 ⁶
Отрицательный заряд, %	15.2–25.6	27.1–39.3	3.4–4.0	53–63	1.8–3.0
Вязкость, мПа/с	3.0–3.4	3.7–4.2	4.0–4.6	4.5–5.9	4.0–5.2

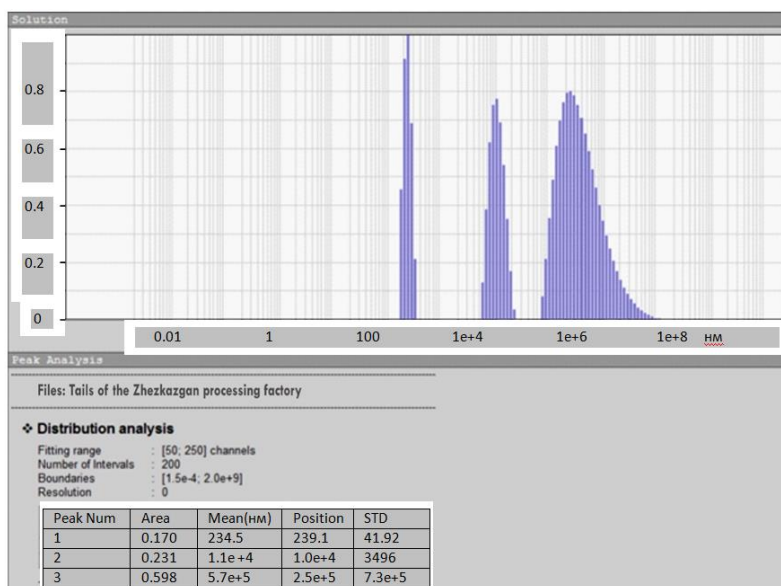


Рис. 1. Распределение частиц по размерам в хвостах флотации Жезказганской обогатительной фабрики, определенное на приборе Photocor-Compact

Для исследования эффективности процесса ультрафлокуляции суспензий применялся прибор УльтрафлокТестер-2010, разработанный украинской фирмой “Турбофлотсервис” (рис. 2), включающий минифлокулятор и оптоэлектронный механизм фиксирования эффективности флокуляции по среднему размеру флокул и степени осветления воды. Посредством данного прибора можно не только устанавливать оптимальный тип и дозировку флокулянта, но и фиксировать оптимальный режим гидродинамической обработки конкретной суспензии.

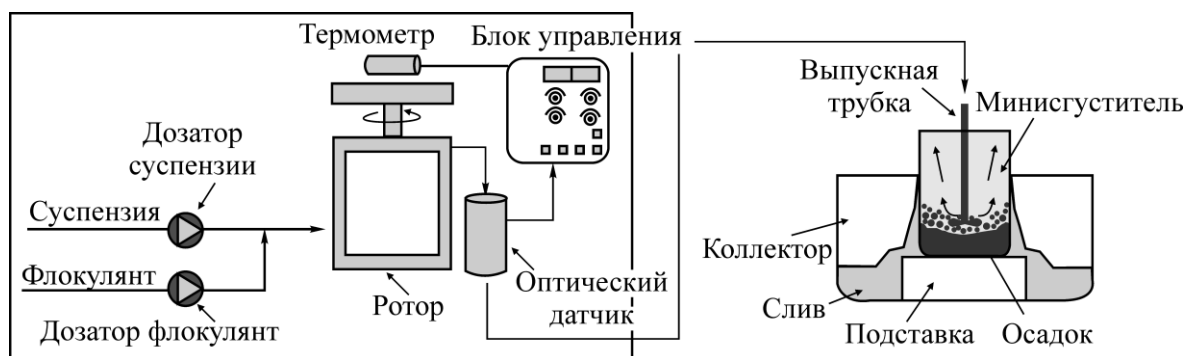


Рис. 2. Функциональная схема прибора УльтрафлокТестер

При помощи внутриприборных перистальтических насосов исследуемый образец суспензии и подготовленный раствор флокулянта непрерывно проходят через ультрафлокулятор, в котором они смешиваются и обрабатываются в гидродинамическом потоке на протяжении заданного (3 – 12 с) времени. На выходе обработанный образец, проходя через оптический датчик, анализируется и таким образом определяется эффективность протекания флокуляции. Принцип работы оптического датчика заключается в распознавании флуктуации прочности потока, проходящего после обработки образца. Данные из оптоэлектронного механизма появляются на табло прибора в виде численного значения (1 – 99).

В блоке управления УльтрафлокТестера (при постоянном расходе пульпы $1 \text{ см}^3/\text{с}$) предусмотрена возможность изменения дозировки флокулянта, скорости оборотов ротора прибора и регулирования интенсивности гидродинамической обработки суспензии (осредненный градиент скорости среды $100 - 10\,000 \text{ с}^{-1}$). Изучение относительной влажности материалов проводилось на приборе Radwag MAC-210.

Для выполнения лабораторного тестирования использовались образцы суспензии, приготовленные из отвальных хвостов флотационного обогащения Жезказганской обогатительной фабрики с удельной массой частиц $2.7 \text{ г}/\text{см}^3$, дисперсным составом частиц $570 \text{ мкм} - 59.8\%$, $11 \text{ мкм} - 23.1\%$, $<< 1 \text{ мкм} - 17\%$ и концентрацией твердого $50 - 100 \text{ г}/\text{л}$ (рис.1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе данных лабораторного эксперимента по ультрафлокулярной обработке образца построены кривые зависимости эффективности флокуляции от расхода флокулянта (рис. 3). Сравнительные испытания флокулирующего действия неионогенного, катионного и анионного полиакриламидов в отношении отвальных хвостов флотационного обогащения показали предпочтительность анионных сополимеров. В ходе испытаний установлено, что анионной флокулянт А-150 характеризуется лучшим флокулирующим действием по отношению к исследуемому образцу. При оптимальном расходе $9 \text{ г}/\text{т}$ флокулянта А-150 эффективность флокуляции достигает $96 - 97$ отн. ед. (рис. 3). Дальнейшее увеличение концентрации флокулянта нецелесообразно, так как приводит к снижению степени флокуляции, вероятно, из-за увеличения вязкости реагента и ухудшения седиментационных свойств образованных флокулов.

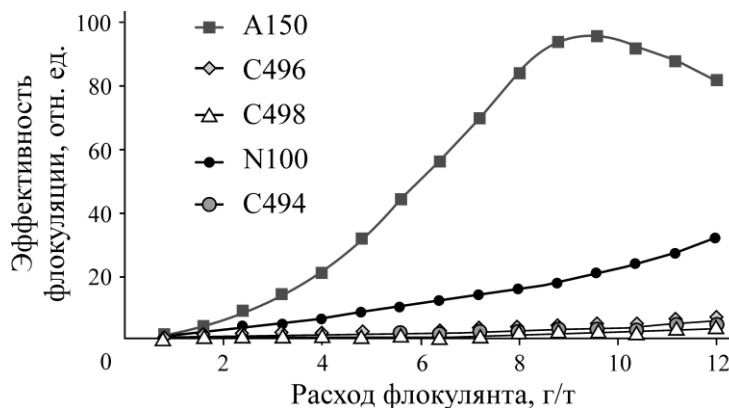


Рис. 3. Зависимость эффективности ультрафлокулярной обработки от расхода флокулянта при концентрации суспензии $100 \text{ г}/\text{л}$, градиенте скорости среды 1500 с^{-1} и времени обработки 6 с

Катионные флокулянты С-494, С-496, С-498 индифферентны к исследуемому образцу с точки зрения флокулирующего воздействия. Анионный флокулянт А-150 по сравнению с другими флокулянтами серии Superfloc обладает наибольшим химическим сродством по отношению к хвостовой пульпе, состоящей главным образом из пустой породы при незначительном содержании (сотые доли процента) металлорудного компонента.

На рис. 4 приведены зависимости эффективности флокуляции суспензии от градиента скорости среды при различном времени гидродинамической обработки в ультрафлокуляторе ($3, 6$ и 12 с). Опыты проводились для суспензии с концентрацией твердого 100 и $50 \text{ г}/\text{л}$, с целью сравнения влияния времени гидродинамической обработки на плотность пульпы. Отмечено, что с увеличением концентрации суспензии зависимость эффективности флокуляции от времени гидродинамической обработки существенно усиливается.

Зависимость эффективности флокуляции от времени гидродинамической обработки с увеличением концентрации суспензии может быть связана с процессом распределения флокулянта по всему объему суспензии. С увеличением концентрации суспензии равномерное распределение флокулянта затрудняется и требует больше времени. Если это время все же мало, процесс можно ускорить за счет увеличения градиента скорости среды G . Гидродинамическая обработка образцов показала важность правильного подбора соотношения между временем гидродинамической обработки и плотностью пульпы. Образцы пульпы плотностью 100 г/т следует обрабатывать при значительно меньших градиентах скорости среды $500 - 1000 \text{ с}^{-1}$, но в течение более длительного времени 12 с. Для суспензий с относительно средней плотностью 50 г/т проблем с равномерностью распределения флокулянта не возникает, а оптимальная скорость и время гидродинамической обработки для данного образца составляет $1000 - 1500 \text{ с}^{-1}$ в течение 6 с.

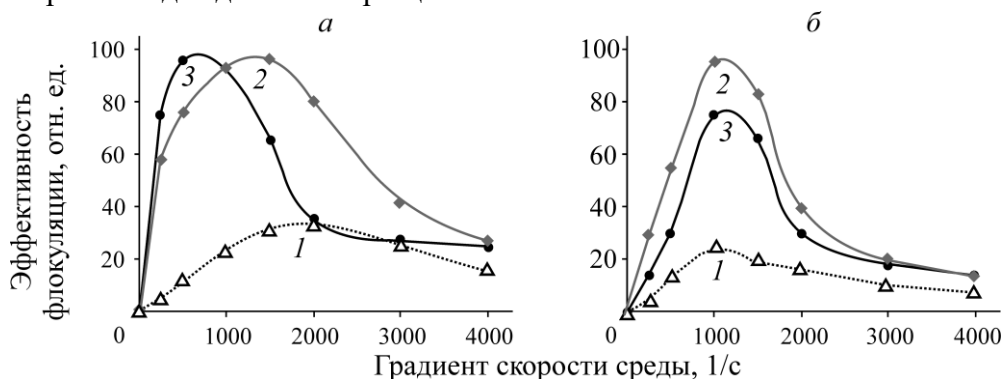


Рис. 4. Зависимость эффективности ультрафлокуляционной обработки от градиента скорости среды при концентрации суспензии 100 г/л (а), 50 г/л (б); расходе флокулянта А-150 — 9 г/т и длительности гидродинамической обработки 3 с (1), 6 (2) и 12 с (3)

Одно из достоинств ультрафлокуляционной обработки — возможность получения более чистого слива, чем при обычной флокуляции в ламинарном режиме. Отсюда следует, что применение ультрафлокуляционной обработки для концентрированных суспензий (100–250 г/л) позволяет достичь более чистого слива сгустителя при меньших расходах флокулянта. На рис. 5 представлена зависимость остаточной концентрации слива минисгустителя от интенсивности гидродинамической обработки (градиента скорости среды) в ультрафлокуляторе, полученная в процессе обработки хвостов флотации (100 г/л) раствором флокулянта А-150, расход которого составлял 9 г/т. Видно, что наилучшие результаты (20–30 мг/л) получаются, когда интенсивность гидродинамической обработки (осредненный градиент скорости среды) составляет $500 - 1500 \text{ с}^{-1}$. В случае обычной обработки (градиент скорости $100 - 200 \text{ с}^{-1}$) остаточная концентрация взвеси в переливе примерно на порядок больше и равна 150–400 мг/л.

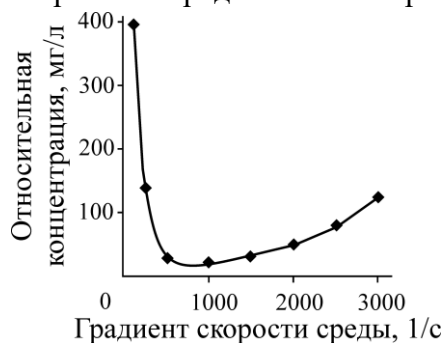


Рис. 5. Зависимость остаточной концентрации твердого в сливе минисгустителя от осредненного градиента скорости среды в ультрафлокуляторе при концентрации суспензии хвостов флотации 100 г/л, расходе флокулянта А-150 — 9 г/т, времени обработки — 12 с

Для показа благоприятного воздействия, которое оказывает ультрафлокулярная обработка на удельный объем осадка и его водоотдачу при фильтровании, на рис. 6 приведены зависимости влажности осадка сфлокулированной суспензии после его выдержки на сетке в течение 5 мин и после последующего фильтрования на воронке Бюхнера с помощью вакуумного насоса при давлении 0.02 МПа в течение 2 мин. Затем на анализаторе влажности Radwag MAC-210 определено относительное содержание влаги в рассматриваемых образцах.

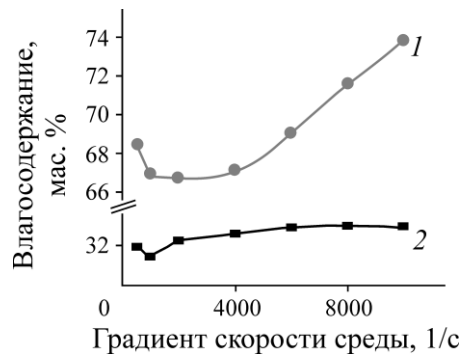


Рис. 6. Зависимость влажности осадка после отделения на сетке (1) и после фильтрования на вакуумном насосе (2) от градиента скорости среды при концентрации суспензии 100 г/л, расходе флокулянта А-150 — 9 г/т, времени обработки — 12 с

Видно, что минимальное значение влажности осадка до прессования достигается при значении градиента скорости среды G , равном $\sim 2000 \text{ с}^{-1}$, а минимальное влагосодержание отфильтрованного кека 31.3 % получено при $G = 1000 \text{ с}^{-1}$.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования продемонстрировали, что наиболее эффективным реагентом серии Superfloc по отношению к исследуемым образцам суспензий из отвальных хвостов флотационного обогащения является анионный флокулянт марки А-150; расход данного флокулянта для суспензии с концентрацией твердого 100 г/л составил не более 9 г/т. Показано, что относительно плотные суспензии 100 г/т следует обрабатывать при градиентах скорости среды $G = 500 - 1000 \text{ с}^{-1}$ в течение 12 с, а суспензии со средней плотностью 50 г/т — при $G = 1000 - 1500 \text{ с}^{-1}$ в течение 6 с. Использование ультрафлокуляционной обработки для суспензии 100 г/т в течение 12 с и интенсивностью $G = 500 - 1500 \text{ с}^{-1}$ снизило остаточное содержание твердого в сливе сгустителя до уровня 20–30 мг/л.

Зависимость влажности сфлокулированного осадка после выдержки на сетке от градиента скорости среды имеет экстремальный характер с минимумом в области значения $G \approx 2000 \text{ с}^{-1}$, а зависимость влажности кека после фильтрования на вакуумном насосе от градиента скорости среды также имеет экстремальный характер с минимумом в области значения $G \approx 1000 \text{ с}^{-1}$.

Интенсификация процессов сгущения и обезвоживания продуктов обогащения горнообогатительных предприятий может быть достигнута с использованием инновационных промышленных ультрафлокуляторов, применение которых позволит уменьшить потерю полезных компонентов в хвостовой пульпе и улучшить очистку сточной воды для внутрифабричного водооборота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман С. Э., Щербаков О. К., Комлев А. М. Обезвоживание продуктов обогащения. — М: Недра, 1988. — 239 с.
2. Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Смирнова А. В., Зайцева Е. В. Технология комплексной переработки гидротехногенных образований горных предприятий медно-колчеданного профиля // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2019. — Т. 17. — № 4. — С. 10–17.
3. Тимошенко Л. И., Анциферова С. А., Самойлов В. Г., Маркосян С. М. Исследование процесса сгущения перед гидрометаллургическим переделом золотосодержащих руд // Обогащение руд. — 2010. — № 1. — С. 27–29.
4. Нечаева Е. Б., Панов А. В., Нехорошев Н. Е., Синичкин А. Г., Соложенкин П. М. Интенсификация процессов сгущения золотосодержащей руды // Цв. металлы. — 2010. — № 2. — С. 43–47.
5. Медяник Н. Л., Варламова И. А., Калугина Н. Л., Бодьян Л. А. Изучение возможности применения водорастворимых высокомолекулярных веществ для флокуляции суспензий // Изв. СамНЦ РАН. — 2010. — Т. 12. — № 1(5). — С. 1236–1239.
6. Тусупбаев Н. К., Ержанова Ж. А., Билялова С. М., Тойланбай Г. А. Флокуляция суспензии кварца в присутствии суперфлокулянтов различного заряда // Комплексное использование минерального сырья. — 2018. — № 4. — С. 17–27.
7. Еремеев Д. Н. Осветление шламовых вод и сгущение отходов флотации угольных шламов с применением полимерных флокулянтов // Вода: химия и экология. — 2012. — № 2. — С. 63–66.
8. Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 106–112.
9. Rulyov N. N., Dontsova T. A., and Korolyov V. Ja. Ultra-flocculation of diluted fine disperse suspensions, Min. Proc. and Extractive Metallurgy Review, 2005, Vol. 26, No. 3–4. — P. 203–217.
10. Рулёв Н. Н., Небеснова Т. В. Интенсификация процесса выделения тонкодисперсного угля из хвостов флотационного обогащения ультрафлокуляцией // Вестн. ОГАСА. 2019. — № 76. — С. 126–135.
11. Yessengaziyev A., Tussupbayev N., and Bilyalova S. Intensification of dehydration processes of lead-zinc concentrates by ultraflocculation, Min. Slovaca, 2019, No. 1. — P.102–108.

Поступила в редакцию 07/IV 2020

После доработки 10/V 2020

Принята к публикации 09/VII 2020