

Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов

УДК 66.065.8:669.712.1.002.68



Э. Р. Федорова,
доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
канд. техн. наук,
эл. почта: fedorova_er@pers.spmi.ru



Е. А. Пупышева,
аспирант кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
эл. почта: elena.pupyshcheva1@gmail.com



В. В. Моргунов,
магистрант кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
эл. почта: vova.morgunov2011@yandex.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Введение и постановка задачи

В связи с истощением богатых глиноземом месторождений боксита повышается потребность вовлечения в производство более бедных для применения в способе параллельного Байер-спекания [1]. В результате процесса разложения бокситовой руды гидроксидом натрия образуется нерастворимый вторичный продукт — красный шлам (КШ). В России при производстве 1 т алюминия образуется 2–3 т шлама. В среднем в мире шламохранилища занимают территорию 500–1000 тыс. м² и являются источником щелочных шламовых вод [2, 3].

Хотя большинство минералов и соединений, содержащихся в КШ, не представляют экологической опасности, особое внимание необходимо уделить его высокой щелочности. Во всем мире проводят исследования, направленные на поиск методов обработки КШ, отличных от промывки, для нейтрализации выделяемой щелочи [4–6]. Высокая концентрация гидроксида натрия в КШ влияет на реологическое свойство среды — осуществлять захват жидкой фазы, так как натрий притягивает молекулы воды при помощи ионной силы, препятствуя разделению жидкой и твердой фаз. Большое содержание жидкой фазы приводит к затруднению обработки на последующих этапах процесса и увеличению итоговой щелочности поверхностного стока шлама на шламохранилище (рН ~12). Оксид натрия вступает в реакцию со многими металлами, образуя разные

Представлено обоснование необходимости снижения содержания гидроксида натрия в красном шламе перед транспортировкой в шламохранилище, поддержания Ж:Т после каждого агрегата в процессе сгущения и промывки шлама. Основным аппаратом является одноярусный радиальный сгуститель, где выделены зоны флокуляции, свободного осаждения, стесненного осаждения, а также область работы граблин. В работе кратко представлены основные математические формулы для описания зон стесненного и свободного осаждения в сгустителе и уравнения материального баланса для описания противоточно работающей промыватель. На исследуемом предприятии реагент на этапе промывки не добавляют, зона флокуляции в промывателях отсутствует.

Первая часть экспериментальных исследований была посвящена процессу сгущения красного шлама с добавлением рабочего раствора флокулянта, используемого на исследуемом предприятии, с учетом условий его приготовления и впрыскивания. Получены кривые осаждения на пробах материала красного шлама с разной концентрацией твердого в питающем потоке. Обосновано применение модифицированного метода Кинча для расчета эмпирических параметров по кривым осаждения. В работе вычислены: скорость Стокса, средний стоксовский диаметр сфлукулированной частицы, критическая концентрация (гелевая точка), индекс стесненного осаждения. Рассчитаны функции плотности потока Кинча при разном содержании твердой фракции в исходном шламе.

Вторая часть экспериментальных исследований была посвящена процессу противоточной промывки ранее сфлукулированного шлама. На основании результатов серии периодических опытов осаждения сфлукулированной пульпы при противоточной 3-, 4-, 5-, 6-кратной промывке сделаны выводы о содержании гидроксида натрия на каждом этапе промывки, получены значения эффективности промывки. Представленные результаты будут использованы при разработке математической модели радиального сгустителя на этапе сгущения и промывки.

Ключевые слова: красный шлам, сгущение, промывка, зона осаждения, математическая модель, щелочность, эффективность промывки, машинное зрение.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10

опасные соединения и вызывая коррозию металлов. Согласно классификации Всемирной ассоциации здравоохранения, рассматриваемое вещество относится к восьмому классу опасности, вызывает серьезные травмы и ожоги, а утечки опасны для инфраструктуры и окружающей среды. Большая часть усилий направлена на улучшение зоны хранения отходов (контроль дренажа, исследование стабильности прудов, сухое хранение и т. д.) и рекультивацию [7–9].

Основным агрегатом для процесса сгущения и промывки является одноярусный радиальный сгуститель. На этапе промывки его называют промывателем. На исследуемом предприятии в процессах сгущения

и промывки установлены N параллельно работающих сгустителей и ряд промывателей-декантеров, функционирующих в противотоке, что позволяет извлечь гидроксид натрия и остатки глинозема, которые могли остаться в шламе, перед перекачкой в шламохранилище.

Для удаления карбонатов, которые образуются в результате реакции с соединениями бокситов и другими соединениями из воздуха, в раствор добавляют известь. Карбонаты снижают эффективность раствора гидроксида натрия при растворении глинозема. Известь регенерирует гидроксид натрия, а образующийся карбонат кальция удаляется вместе с КШ.

На процесс осаждения влияют несколько факторов, включая размер и форму частиц, их распределение по крупности, разность плотностей (твердой и жидкой фаз), концентрацию суспензии и свойства ее поверхности, такие как химический состав, добавки и суспензионная среда [10, 11]. Соотношение Ж:Т в сгущенном продукте оказывает значительное влияние на технику и экономику транспортных операций [12, 13].

Добиться поставленных целей, а именно поддерживать определенное Ж:Т, минимизировать содержание гидроксида натрия, можно за счет модернизации системы автоматического управления (САУ): внедрение новых контуров управления [14, 15], управление по модели (Advanced Process Control (APC)), использование цифровых двойников [16, 17], систем технического зрения [18–20] и т. д.

Процесс сгущения

Стандартная САУ аппаратом сгущения при оперативном контроле не включает следующие параметры: границы раздела фаз между зонами свободного осаждения и сливом осветленного алюминатного раствора, свободного и стесненного осаждения, средневзвешенный диаметр сфлуктурированных частиц. Существуют приборы для определения раздела фаз с периодическим измерением [21], однако повсеместное использование таких датчиков имеет несколько ограничений:

- стоимость — для обеспечения всего узла сгущения и промывки может понадобиться от 6 до 9 подобных датчиков, что является нерентабельным;
- условия эксплуатации — процесс сгущения протекает при высоких температурах 90–100 °С в сильно щелочной абразивной среде, конструкция датчика должна выдерживать подобные условия при периодических измерениях.

Задача определения средневзвешенного диаметра частиц на выходе из питающего стакана в динамическом режиме с малой дискретностью измерений остается нерешенной. Распределение сфлуктурированной пульпы по крупности материала на выходе из-под питающего стакана в настоящий момент также не может быть измерено напрямую.

Процесс сгущения характеризуется нелинейностью, большой инерционностью и запаздыванием

по большинству каналов управления, высокой корреляцией параметров между собой, что делает его сложноуправляемым при постоянно действующих возмущениях, таких как расход КШ в питании сгустителя, диаметр и форма сфлуктурированных частиц, распределение частиц по размерам в питающей пульпе и на выходе из питающего стакана после процесса флокуляции и т. д. [22, 23].

Существует ряд работ, в которых предложено уменьшить возмущающие параметры. Например, в исследовании [24], чтобы уменьшить влияние неопределенности гранулометрического состава сырья, поступающего на производство, применили стохастическую оптимизацию с ограничением случайности.

Далее в работе представлены основные математические формулы для описания зон стесненного и свободного осаждения радиального сгустителя.

Зона свободного осаждения радиального сгустителя

Предполагали, что в зоне ниже питающего стакана устанавливается ламинарный режим течения жидкости, и частицы движутся по направлению потока вниз к сливному отверстию, не мешая друг другу, т. е. сфлуктурированные частицы осаждаются по закону Стокса. Фактическая скорость осаждения частиц в зоне свободного осаждения отличается от скорости, рассчитываемой по формуле Стокса, поскольку сфлуктурированные частицы не шарообразной формы, имеет место гидродинамическое взаимодействие их между собой из-за высокого содержания твердой фракции в пульпе.

Для условий ламинарного движения скорость осаждения отдельной взятой частицы U_0 определяется по формуле Стокса:

$$U_0 = \frac{g(\rho_S - \rho_L)d_{floc}^2}{18\mu}, \quad (1)$$

где ρ_S, ρ_L — плотность твердой и жидкой фазы соответственно, кг/м³; d_{floc} — диаметр сфлуктурированной частицы на выходе из-под питающего стакана, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; μ — вязкость жидкой фазы, Па·с.

Зона стесненного осаждения радиального сгустителя

При достижении точки критической концентрации (гелевой точки) φ_c происходит переход из зоны свободного в область стесненного осаждения, когда скорость движения твердой фазы можно описать функцией Ричардсона – Заки, где U_c — скорость стесненного осаждения; φ — долевая объемная концентрация в каждой точке по всей высоте агрегата; n — индекс стесненного осаждения.

$$U_c = U_0(1 - \varphi)^n. \quad (2)$$

С. Ф. Ричардсон и В. Н. Заки исследовали стесненное падение частиц разных по диаметру и плотности в жидкостях разной вязкости. В представленной работе U_0 и n находили графически.

Процесс промывки

Качество декантации сфлукулированного КШ напрямую зависит от содержания щелочи в осветленной жидкости на каждой ступени, а также от Ж:Т в сгущенном продукте [25, 26]. В шламе из-под сгустителя может содержаться более 30 % алюминатного раствора. Его необходимо вернуть в производство перед сбросом отработанного материала в шламохранилище.

Параметры процесса сгущения и промывки (расход шлама, флокулянта и скорость вращения граблин) во всех аппаратах оператор изменяет вручную при управлении. Чаще всего для упрощения ведения процесса он рассматривает каждый промыватель по отдельности и принимает отношение Ж:Т из-под конуса каждого промывателя в виде уставки-константы, тем самым снижая возможную максимальную производительность узла, теряя жидкую фазу с гидроксидом натрия, уносимым с промытым шламом в шламохранилище. Чтобы отмыть гидроксид натрия в осветленный раствор, необходимо повышать расход чистой промывной воды, однако нужно учитывать, что на следующих этапах воду понадобится выпаривать перед отправкой в шламохранилище, что приведет к повышению затрат.

Методика расчета параметров промывки представлена системой уравнений, каждый элемент которой описывает показатели противоточной декантации на основе балансовых уравнений n -кратной промывки [27, 28].

В соответствии с требованиями к промывке КШ, содержание щелочных соединений в материале на выходе не должно превышать 5 %. Однако существуют условия, регламентирующие содержание щелочи в твердой фазе. Производство по отвальному шламу $[(C_{\text{Na}_2\text{O}_k}, \text{ г/л}) \cdot (\text{Ж:Т})]$ является важным показателем при промывке КШ на производстве. Оно зависит от технологии, применяемых реагентов и составляет примерно 7–10. Если технология не предполагает использования возвратной воды на предприятии, то это число по нормам безопасности не должно превышать 4,5. При использовании промывной воды производство может быть увеличено максимум до 15 [27].

Введем обозначения: m — Ж:Т в пульпе сгустителя; φ_{NaOH} — концентрация гидроксида натрия в жидкой фазе КШ после флокуляции, г/л; V_B — объем воды на промывку 1 т шлама, м³; φ_B — концентрация гидроксида натрия в промывной воде, приходящей в первый промыватель, г/л; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ — концентрация гидроксида натрия в жидкой фазе шламовой пульпы из-под промывателей 1–6 соответственно, г/л; ρ — плотность жидкой фазы в сгущенном продукте из-под конуса сгустителя, т/м³.

Приняв Ж:Т на каждой ступени и число ступеней промывки как константы, рассчитаем объем затрачиваемой

промывной воды V_B при объеме жидкой фазы в пульпе из-под конуса сгустителя V . Отношение Ж:Т в КШ снижается неравномерно в ходе промывки начиная от сгустителя до последнего промывателя. При этом в последний поступает постоянный объем промывной воды. Поэтому предполагается, что объем жидкой фазы в пульпе из-под конуса сгустителя остается постоянным, тогда объем слива равен $V = m/\rho$, м³/т.

Если число промывателей $n \leq 4$, то для расчета объема воды на промывку V_B необходимо концентрацию гидроксида натрия в жидкой фазе шламовой пульпы в последнем промывателе φ_n принять за константное значение. Расчет ведут согласно системе уравнений (3). Если $n \geq 5$, то для определения V_B необходимо принять в качестве констант φ_n и φ_1 — концентрацию гидроксида натрия из-под первого промывателя.

Составим балансовые уравнения по гидроксиду натрия при n -кратной промывке КШ, где $K = V_B/V$:

$$\begin{cases} \varphi_n = (\varphi_{\text{NaOH}} + \varphi_B + K_n)/(1 + K_n), K_n = K_n + K^2 + K^3 + \dots + K^n, \\ \varphi_{n-1} = \varphi_n(1 + K) - \varphi_n K, \\ \varphi_{n-2} = \varphi_{n-1}(1 + K) - \varphi_n K, \\ \varphi_{n-3} = \varphi_{n-2}(1 + K) - \varphi_{n-1} K, \\ \varphi_1 = (\varphi_{\text{NaOH}} + \varphi_2 K)/(1 + K). \end{cases} \quad (3)$$

Концентрацию щелочи в 1-м промывателе можно также рассчитать из соотношения $\varphi_1 = (1/K)(\varphi_{\text{NaOH}} - \varphi_n) + \varphi_B$.

Используемая обратная промывная вода обычно содержит до 1 г/л гидроксида натрия. На предприятиях, где осуществлен возврат в производство подшламовой воды, ее используют наряду с оборотной водой для промывки. Содержание гидроксида натрия в подшламовой воде достигает 3,0–3,5 г/л. В ходе эксперимента была использована чистая вода без примеси гидроксида натрия.

Исходные данные

Физические и химические свойства КШ зависят от используемого боксита и способа обработки руды. Химический состав исследуемого КШ, % (мас.): 21,00 Fe₂O₃; 51,80 Al₂O₃; 3,60 SiO₂; 4,43 CaO; 1,55 TiO₂; 0,85 S; 3,90 CO₂.

Распределение частиц по размерам в питающей пульпе:

Класс крупности, мм	+0,2000; –0,2000+0,1500; –0,1500+0,1000; –0,1000+0,0710; –0,0710+0,0450;
Суммарный выход, % ...	0,45; 0,79; 1,92; 3,57; 7,70;
Класс крупности, мм	–0,0450+0,0320; –0,0320+0,0060; –0,0060+0,0005; –0,0005+0
Суммарный выход, % ...	10,03; 17,08; 17,08; 100,00

Для проведения седиментационных тестов с добавлением флокулянта были подготовлены образцы пульпы с разной концентрацией твердого вещества (табл. 1).

Согласно технологии, реализуемой на исследуемом производственном объекте, концентрация раствора флокулянта, подаваемого в сгуститель, равна 0,5 %. Срок существования водного раствора реагента ~7 дней, на производство он поступает в виде эмульсии. Такой срок объясняется воздействием кислорода

Таблица 1

Пробы КШ с разной концентрацией твердого вещества

Образцы	1	2	3	4	5
Концентрация, г/л	50	43	36	29	22
Объемная доля, %	1,56	1,34	1,13	0,91	0,69

на соединение макромолекул — он вызывает их разрушение и уменьшает вязкость используемого раствора [29].

Непосредственно перед впрыскиванием рабочего раствора флокулянта в цилиндр с исследуемым образцом пульпы его изготавливают и оставляют до полного растворения эмульсии (минимальное необходимое время 0,5–1,0 ч). В соответствии с технологическим регламентом рекомендовано использование добавки гидроксида натрия в количестве 10 г на 1 л раствора флокулянта, что повышает эффективность взаимодействия частиц пульпы с флокулянтom за счет образования щелочной среды и ведет к сокращению расхода полимера [30].

В исследовании использовали флокулянт серии SUPERFLOC HX-3000 в виде эмульсии с концентрацией 23 %. В работе не стояла цель подобрать тип и степень разбавления флокулянта. При приготовлении флокулянта учитывали следующие факторы:

1) частота вращения ротора мешалки при растворении эмульсии не должна превышать 2 с^{-1} , так как при высоких скоростях вращения возрастает уровень касательных напряжений в жидкости, что приводит к разрушению набухших частиц флокулянта;

2) впрыскивание эмульсии флокулянта осуществляли по касательной к стенке при помощи шприца. После 15 с перемешивания раствора его необходимо оставить в покое на 30–60 мин для формирования макромолекул.

В результате получен раствор флокулянта с концентрацией 0,5 %.

Седиментационный тест КШ в присутствии флокулянта

Гомогенизированные образцы подготовленной пульпы с разной концентрацией твердого вещества помещали в 5 мерных цилиндров объемом 250 мл каждый и фиксировали начальную высоту до добавления флокулянта. Доза флокулянта с концентрацией 0,5 % составляла 1,45 мл.

Для соответствия условию полной гомогенизации пульпы с сохранением начальных свойств осаждения цилиндры неинтенсивно перемешивали путем десятикратного переворота цилиндра — такой способ применяют в отечественной практике при подготовке пробы к осаждению [31–33].

Во время процесса осаждения регулярно регистрировали высоту границы раздела фаз, пока не достигли постоянной высоты сгущенного продукта (рис. 1).

На протяжении всех опытов граница раздела фаз между жидкой и твердой фазами в цилиндрах не прослеживалась явно. В зоне, где работает закон Стокса, она меняется быстрее, чем в зоне стесненного осаждения. Проводимые эксперименты фиксировали на камеру, процесс осаждения в каждом цилиндре был обработан при помощи машинного зрения на базе библиотеки компьютерного зрения OpenCV для Python 3, так как в ней имеется много ручных регулировок. Обработку видео выполняли в условиях реального времени в следующей последовательности:

1) удаление фона за счет бинаризации (перевод цветного изображения в черно-белое) по зеленому цвету. Для этого за термостатом с мерными цилиндрами был установлен специальный фон зеленого цвета;

2) удаление области стенок цилиндра за счет бинаризации — для обработки изображения оставляли только кадр с исследуемым раствором;

3) проведение операции сглаживания (обработки изображения для сглаживания границ вокруг исследуемого раствора);

4) кластеризация пикселей (разбивание пикселей на несколько групп по схожим характеристикам) на 5 кластеров, тем самым выделяя слои и границы в жидкости;

5) возвращение верхних и нижних границ кластеров с учетом отбрасывания одиноко стоящих точек;

6) обработка полученных данных, перевод из пикселей в абсолютные координаты (мм, см);

7) обработка полученных высот осветления.

Ввиду наличия возможных погрешностей, возникающих при записи и обработке кадров, следующим этапом планируется разработка лабораторного стенда, который позволит проводить измерение столба осаждающейся пульпы с помощью оптического датчика, оснащенного источником света и фотоприемником. Датчик будет перемещаться с линейной скоростью вдоль штока, установленного параллельно мерному цилиндру, таким образом позволяя получить профиль мутности по высоте цилиндра в режиме реального времени.

На этом этапе работы также были подготовлены еще 5 мерных цилиндров объемом по 250 мл для последующего опыта по противоточной промывке

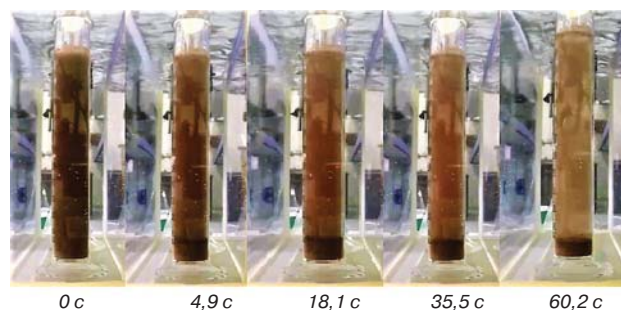


Рис. 1. Результат осаждения пробы КШ с начальной концентрацией 43 г/л (внизу приведена продолжительность)

сфлуктурированной пульпы КШ. В них начальная концентрация твердого вещества составляла 43 г/л (1,34 % (об.)).

Чем выше концентрация твердого в питающей суспензии, тем меньше скорость свободного осаждения. При начальных концентрациях суспензии от 0,750 до 1,125 % (об.) на кривых осаждения отчетливо прослеживаются зоны резкого снижения скорости [30]. Незначительный индукционный период указывает на то, что именно в это время первичные и вторичные флоккулы начинают взаимодействовать друг с другом, соединяясь в более крупные агрегатные образования.

Результаты седиментационного теста КШ в присутствии флокулянта и их обсуждение

При обработке седиментационных кривых сфлуктурированной суспензии КШ можно найти следующие параметры: скорость Стокса (U_0), стоксовский диаметр сфлуктурированной частицы (d_{floc}), критическую точку концентрации (гелевая точка) (φ_c), индекс стесненного осаждения (n), функции плотности потока Кинча ($f_{dk}(\varphi)$). Основные методы расчета параметров можно представить двумя категориями, базирующимися на макроскопических и кинематических уравнениях баланса.

Расчетный метод Коу и Клевенджера (1916) [34] позволяет определить начальную скорость осаждения суспензии в зависимости от концентрации питания и критической концентрации. Эти ученые были первыми, кто использовал данные, полученные в ходе эксперимента по периодическому осаждению с использованием лабораторного цилиндра, для проектирования промышленного сгустителя. Они предположили, что скорость осаждения твердых частиц зависит только от концентрации исходного шлама. Однако в зоне сжатия это предположение не выполняется, поскольку объемная доля твердых частиц также изменяется с глубиной. Уравнение Коу и Клевенджера не позволяет точно оценить площадь поперечного сечения резервуара при обработке суспензии флокулирующим агентом.

Теория седиментации Кинча [35], являющаяся кинематической моделью, предполагает быстрый и надежный подход для измерения влияния концентрации входного потока на кривые осаждения. Однако теория предполагает, что пристеночный эффект и взаимодействие между частицами отсутствуют, скорость осаждения является функцией от концентрации пульпы. Оба этих допущения ограничивают точность расчетов.

Особое преимущество метода Кинча заключается в том, что при анализе кривой осаждения достаточно одного опыта, так как метод Коу и Клевенджера требует нескольких определений скоростей осаждения. Тем самым результаты исследования, использующие метод Кинча, будут более актуальны на современных производствах, однако расчет по методике Коу – Клевенджера также популярен для расчета параметров сгущения

[31, 36].

На **рис. 2** представлены кривые скоростей осаждения сфлуктурированной пульпы при разных начальных концентрациях твердого вещества φ_0 для опытов в пяти одинаковых цилиндрах.

Кривые осаждения строили на основе полученных результатов седиментационного теста пульп при разных концентрациях твердого вещества (**табл. 2**).

Далее необходимо построить график зависимости $\lg(U_c)$ от $\lg(1 - \varphi_0)$ (**рис. 3, а**), каждой начальной концентрации твердого вещества соответствует своя скорость осаждения. Скорость свободного осаждения получена экспериментально. Индекс стесненного осаждения n и скорость Стокса U_0 находят графически, $n = \arctg(\text{tg}\alpha)$.

В соответствии с представленными графиками, индекс стесненного осаждения $n = 89,04$, скорость Стокса $U_0 = 125,89$ м/ч, гелевая точка $\varphi_c = 2,66$ % (об.), стоксовский диаметр сфлуктурированной частицы был найден по формуле (1) от обратного $d_{floc} = 71,9$ мкм.

Для подтверждения полученного значения критической точки осаждения (гелевой точки) необходимо учитывать такой параметр, как функция плотности потока f_{dk} , описанная Кинчем. Изменение концентрации твердого в процессе осаждения сфлуктурированной

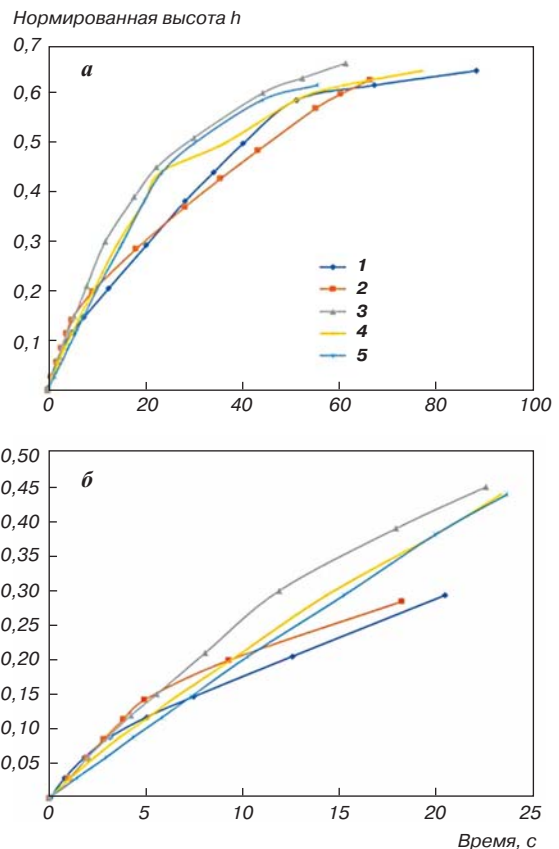


Рис. 2. Кривые осаждения сфлуктурированной пульпы при разном начальном содержании твердого вещества φ_0 в соответствии с табл. 1:
а — скорость осаждения; б — начальная скорость осаждения;
1 — 50 г/л, 1,56 % (об.); 2 — 43 г/л, 1,34 % (об.); 3 — 36 г/л, 1,13 % (об.); 4 — 29 г/л, 0,91 % (об.); 5 — 22 г/л, 0,69 % (об.)

Таблица 2
Результаты седиментационных тестов сфлокулированной пульпы КШ

Номер замерной точки	Высота столба осветления, дм	Время осветления, с				
		при концентрации 50 г/л	при концентрации 43 г/л	при концентрации 36 г/л	при концентрации 29 г/л	при концентрации 22 г/л
1	0,030	0,8	1	1,1	1,1	1,4
2	0,060	1,8	1,9	2,0	2,3	2,9
3	0,090	3,1	2,8	3,1	3,6	4,3
4	0,120	5,0	3,8	4,2	5,1	5,8
5	0,151	7,4	4,9	5,5	6,5	7,26
6	0,211	12,5	9,2	8,0	9,6	10,2
7	0,301	20,3	18,1	11,8	14,2	15,1
8	0,392	28,2	28,2	17,8	19,8	19,8
9	0,452	34,1	35,5	22,4	23,2	23,5
10	0,512	40,2	43,2	30,1	36,3	30,1
11	0,602	51,2	55,1	44,2	51,2	44,2
12	0,633	67,2	60,2	52,3	61,1	55,5
13	0,663	88,1	66,2	61,2	77,0	68,8

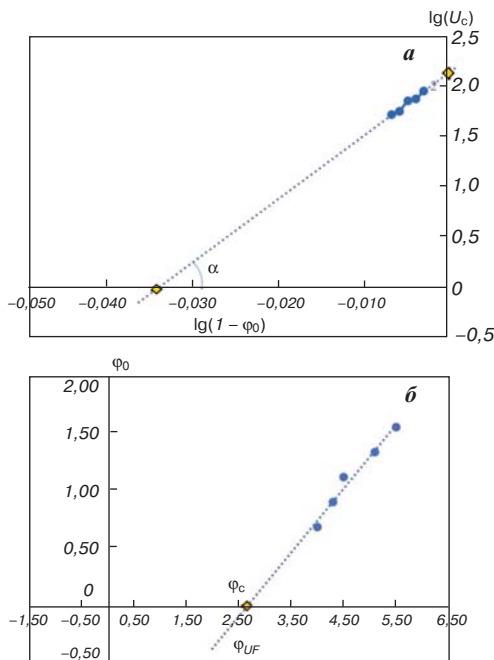


Рис. 3. Графическое определение индекса стесненного осаждения n и скорости Стокса U_0 (а) и зависимость между начальным содержанием твердого вещества φ_0 от содержания твердой фракции в сгущенном продукте φ_{UF} (б)

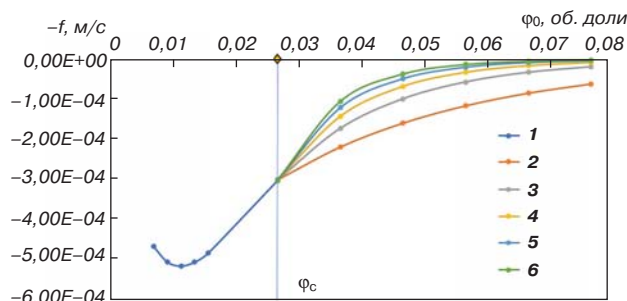


Рис. 4. Зависимость функции плотности потока Кинча от начальной концентрации твердого в питающей пульпе φ_0 : 1 – $f_{bk}(\varphi)$ при $\varphi_0 < \varphi_c$; 2 – $f_{bk}(\varphi)$ при $\varphi_0 > \varphi_c, \Delta = 1$; 3 – $f_{bk}(\varphi)$ при $\varphi_0 > \varphi_c, \Delta = 2$; 4 – $f_{bk}(\varphi)$ при $\varphi_0 > \varphi_c, \Delta = 3$; 5 – $f_{bk}(\varphi)$ при $\varphi_0 > \varphi_c, \Delta = 4$; 6 – $f_{bk}(\varphi)$ при $\varphi_0 > \varphi_c, \Delta = 5$

пульпы позволило определить зависимость функции от начальной концентрации для $\varphi_0 < \varphi_c: f_{bk}(\varphi) = U_0 \varphi_0 (1 - \varphi_0)^n$. Результат, основанный на приведенной функции, графически подтвердит начало зоны стесненного осаждения в эксперименте.

На рис. 4 отображено изменение скорости при переходе из зоны свободного ($\varphi_0 < \varphi_c$) в зону стесненного осаждения. Причем на графике видно, что увеличение скорости осаждения не изменяет значение функции плотности потока. Однако при изменении индекса стесненного осаждения максимальное значение функции меняется вместе с ней.

Полученные графики зависимости функции плотности от начальной концентрации имеют точку сходимости при $\varphi_c = 2,66 \%$ (об.). Значение скорости Стокса при условии $\varphi_0 \geq \varphi_c$ подчиняется другой зависимости, где $k_0 = f_{bk}(\varphi_c) = 3,454 \cdot 10^{-5}$. Концентрация сгущенного слоя на реальном объекте управления колеблется в диапазоне от 2,83 до 6 % (об.), следовательно кривая для зоны уплотнения при φ_0 близка к реальному значению и описывает функцию плотности потока для этого процесса [30].

Результаты противоточной промывки сфлокулированной пульпы КШ и их обсуждение

Для проведения опыта была подготовлена сфлокулированная пульпа с концентрацией твердого вещества $\varphi_0 = 43 \text{ г/л}$ (1,42 об. долей) для имитации процесса противоточной промывки в мерных цилиндрах при температуре 90 °С.

Промывную воду и раствор пульпы предварительно подогревали в термостате до температуры 90 °С. Число цилиндров соответствовало числу ступеней промывки, в работе рассматривали ступени 3, 4, 5, 6. Далее описан ход работы для 4-ступенчатой промывки.

Чтобы организовать в каждом из четырех цилиндров разное Т:Ж и щелочность раствора, необходимо было проделать следующие шаги.

На первом этапе работы сливали осветленный алюминатный раствор из всех четырех цилиндров. Цилиндр номер 1 наполняли промывной водой до первоначального уровня раствора. Затем перемешивали по приведенной ранее технологии и оставляли для отстаивания. Одновременно через определенные промежутки времени фиксировали высоту осветленного столба пульпы. Результаты представлены на рис. 2, а.

Когда вторичное уплотнение твердой фазы завершилось, осветленный раствор из первого цилиндра переливали во второй, перемешивали до равновесной фазы

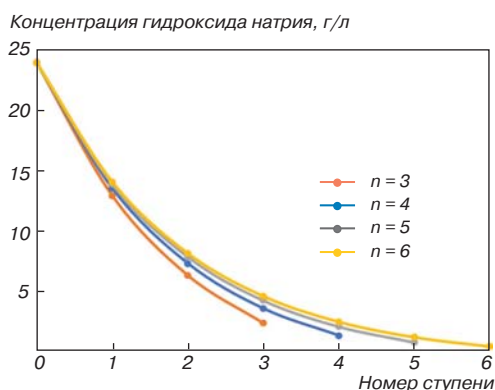


Рис. 5. Эффективность промывки

и оставляли для отстаивания аналогично предыдущему шагу. Уплотненный шлам из цилиндра 1 удаляли.

При этом осветленный раствор из второго цилиндра переливали в третий и к оставшемуся осадку добавляли чистую промывную воду. Оба сосуда взбалтывали до равномерного состояния и отстаивали. Затем осветленный раствор из третьего цилиндра переливали в четвертый, а из второго — в третий.

Определение концентрации гидроксида натрия в промывной воде после осаждения

Концентрацию щелочи в осветленном растворе определяли в каждом цилиндре методом щелочно-основного титрования HCl. В ходе проведения опыта для каждого декантера фиксировали концентрацию гидроксида натрия в промытой осажденной пульпе и скорость свободного осаждения. Согласно методике, приведенной ранее для 4-кратной промывки, имитировали 3-, 5- и 6-кратную промывку при постоянном расходе промывной воды $V_B = 0,33$ л.

Заключительным параметром эксперимента являлась эффективность промывки. Степень отмытки шлама, или извлечение щелочи при промывке в промыводу (% от поступившей на промывку), находили из соотношения

$$\mu_{от} = (V_B \varphi_1) / (V_{ФТВ} + V_B \varphi_B), \quad (4)$$

где $\varphi_{ТВ}$ — концентрация растворенного твердого вещества в сгущенной пульпе, поступающей в первый промыватель; φ_B — концентрация гидроксида натрия в воде, приходящей в первый декантер.

Показатели эффективности промывки $\mu_{от}$ %: 90,07 — для трех ступеней; 94,37 — для четырех ступеней; 96,73 — для пяти ступеней; 98,08 — для шести ступеней.

На основании результатов опыта строили кривые изменения концентрации гидроксида натрия на ступенях промывки 1–6 (рис. 5).

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что разница концентраций гидроксида натрия при 5- и 6-кратной промывке составляет 0,32 г/л, что дает эффективность в 1,3 %. Использование 6-ступенчатого промывания незначительно влияет на итоговое качество.

Заключение

При изучении осаждения красных шламов были рассчитаны следующие параметры: скорость Стокса ($U_0 = 125,89$ м/ч), индекс стесненного осаждения ($n = 89,04$), стоксовский диаметр сфлуктурированной частицы ($d_{floc} = 71,9$ мкм), гелевая точка ($\varphi_c = 2,66$ %) и функции плотности потока; расчет проводили по модифицированному методу Кинча. На полученных графиках наблюдали тенденцию к снижению скорости осаждения пульпы при повышении концентрации твердого вещества, так как в поперечном сечении скорость Стокса прямо пропорциональна содержанию твердого в исследуемом растворе. Несмотря на то что начальная скорость Стокса при разных концентрациях имеет значительную дифференциацию, замедление происходит неравномерно, из-за чего при достижении критической концентрации осажденного материала (гелевой точки) она становится постоянной. Значение критической концентрации было также подтверждено графиком функции потока Кинча. В точке концентрации φ_c наблюдали начало зоны стесненного осаждения.

В ходе опыта по противоточной промывке сфлуктурированной пульпы красного шлама были получены значения концентрации гидроксида натрия в осветленном растворе для 3-, 4-, 5-, 6-кратной промывки. Значения степени отмытки демонстрируют корректность проведенного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 77–84
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10

SETTLING PARAMETERS DETERMINED DURING THICKENING AND WASHING OF RED MUDS

Information about authors

E. R. Fedorova, Associate Professor at the Department of Process and Plant Automation¹, Candidate of Technical Sciences,
e-mail: fedorova_er@pers.spmi.ru

E. A. Pupyshva, Postgraduate Student of the Department of Process and Plant Automation¹, e-mail: elena.pupyshva1@gmail.com

V. V. Morgunov, Master's Student of the Department of Process and Plant Automation¹, e-mail: vova.morgunov2011@yandex.ru

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper substantiates why it is necessary to reduce the concentration of sodium hydroxide in red mud before it can be transported to the mud disposal area and why the liquid-to-solid ratio should be maintained after each unit of the thickening and washing line. The main unit is a single-tier radial thickener comprised of flocculation, free settling, hindered settling and rake zones. The paper gives a brief overview of the basic mathematical formulas describing the hindered and free settling zones of the thickener, as well as the basic material balance equations for describing the countercurrent washers. At the studied site, no reagent is added at the washing stage and there is no flocculation zone in the washers.

The first part of experimental study focused on red mud thickening with addition of dissolved flocculant that is normally used at the studied site, considering

how it is prepared and injected. Sedimentation curves for red mud samples with different concentrations of solids in the feed stream were obtained. The authors substantiate the application of modified Kynch method for calculating empirical parameters based on sedimentation curves. The following parameters were calculated: settling rate, average Stokes diameter of a flocculated particle, critical concentration (gel point), hindered settling index. The Kynch flux density functions were calculated for different concentrations of solids in the initial slurry.

The second part of experimental study focused on countercurrent washing of the earlier flocculated slurry. Following a series of periodic experiments on sedimentation of flocculated slurry involving 3, 4, 5 and 6 cycles of countercurrent washing, conclusions were drawn on the concentration of sodium hydroxide at each washing stage, and the washing efficiency was estimated.

The described results will be used for building a mathematical model of a radial thickener at the thickening and washing stage.

Key words: red mud, thickening, washing, settling zone, mathematical model, causticity, washing efficiency, machine vision.

References

- Zinoveev D., Pasechnik L., Fedotov M. et al. Extraction of valuable elements from red mud with a focus on using liquid media — A Review. *Recycling*. 2021. Vol. 6, Iss. 38. DOI: 10.3390/recycling6020038.
- Mishra Brajendra, Gostu Sumedh. Materials sustainability for environment: Red-mud treatment. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2017. Vol. 11. DOI: 10.1007/s11705-017-1653-z.
- Piirainen V. Yu., Barinkova A., Starovoytov V. N., Barinkov V. Deactivation of red mud by primary aluminum production wastes. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 109–116. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.109.
- Alam Md Kh., Zanganeh J., Moghtaderi B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resources Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 141. pp. 483–498. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.006.
- Pyagay I. N., Kremcheev E. A., Pasechnik L. A., Yatsenko S. P. Carbonization processing of bauxite residue as an alternative rare metal recovery process. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 56–63. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.08.
- Raghubanshi A. S. et al. Recycling and potential utilization of red mud (Bauxite Residue) for construction industry applications. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2022. Vol. 29, Iss. 4. pp. 401–410.
- Archambo M. New horizons for processing and utilizing red mud. Houghton, Michigan : Michigan Technological University, 2021. 213 p.
- Tanvar Himanshu, Mishra Brajendra. Hydrometallurgical recycling of red mud to produce materials for industrial applications: alkali separation, iron leaching and extraction. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. Vol. 52. pp. 1–15. DOI: 10.1007/s11663-021-02285-5.
- Piirainen V. Yu., Mikhaylov A. V., Barinkova A. A. The concept of modern ecosystem for the Ural Aluminium Smelter. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 39–45. DOI: 10.17580/tsm.2022.07.04.
- Fawell Ph., Nguyen T., Solnordal C., Stephens D. Enhancing gravity thickener feedwell design and operation for optimal flocculation through the application of computational fluid dynamics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021. Vol. 42. pp. 496–510. DOI: 10.1080/08827508.2019.1678156.
- Brichkin V. N., Vasilyev V. V., Nagornaya E. A., Gumenyuk A. M. Bauxite grade improvement through selective grinding. *Obogashchenie Rud*. 2017. No. 3. pp. 3–9. DOI: 10.17580/or.2017.03.01.
- Alexandrov V. I., Kibirev V. I., Serzhan S. L. The effectiveness of polyurethane coatings on internal surfaces of slurry lines in tailings slurry hydrotransport systems. *Obogashchenie Rud*. 2020. No. 4. pp. 35–41. DOI: 10.17580/or.2020.04.06.
- Avksentyev S. Yu., Makharatkin P. N., Safiullin R. N., Aleksandrov V. I. Specific pressure loss calculations for tailings hydrotransport at the Kachkanar GOK. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 3. pp. 45–51. DOI: 10.17580/or.2022.03.08.
- Tian J. L., Zhang Z. Y., Jiang Y. H. The application of intelligent control to red mud settling and washing in an alumina refinery. *Minerals, Metals and Materials Series. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 2021. Vol. 6. pp. 3–9.
- Li H., Ai-xiang Wu, Hong-Jiang Wang, Hui Chen et al. Changes in underflow solid fraction and yield stress in paste thickeners by circulation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2021. Vol. 28, No. 3. pp. 349–357.
- Boikov A. V., Savelev R. V., Payor V. A., Potapov A. V. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. No. 2. pp. 3–6. DOI: 10.17580/cis-ir.2020.02.01.
- Li L., Iskander M. Use of machine learning for classification of sand particles. *Acta Geotechnica*. 2022. DOI: 10.1007/s11440-021-01443-y.
- Madarász L., Kóte Á., Hambalkó B., Csorba K. et al. In-line particle size measurement based on image analysis in a fully continuous granule manufacturing line for rapid process understanding and development. *International Journal of Pharmaceutics*. 2022. Vol. 612. DOI: 10.1016/J.IJPHARM.2021.121280.
- Beloglazov I., Petrov P., Bazhin V. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. pp. 50–54. DOI: 10.17580/em.2020.02.12.
- Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Yu. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminium plant based on technical vision and a neural network. *Metallurg*. 2022. No. 10. pp. 105–112. DOI: 10.52351/00260827_2022_10_105.
- Precision Light & Air. Available at: <https://www.plapl.com.au/> (Accessed: 15.12.2022).
- Aleksandrova T. N., Potemkin V. A. Development of a methodology to assess the hydrocyclone process with account of the rheological properties of the mineral slurry. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 908–916. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12.
- Sizyakov V. M., Litvinova T. E., Brichkin V. N., Fedorov A. T. Modern physicochemical equilibrium description in $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system and its analogues. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 298–306. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.298.
- Zhang Hualu, Wang Fuli, Li Kang, Luping Zhao. Stochastic chance-constrained optimization framework for the thickening-dewatering process with an uncertain feed quantity. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 173. DOI: 10.1016/j.cherd.2021.07.013.
- Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Somov V. V. Determining optimum parameters of fluorine leaching from the carbon part of spent pot lining. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. p. 544. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.544.
- Liu X., Yin H., Zhao J., Guo Z. et al. Understanding the coagulation mechanism and floc properties induced by Fe(VI) and FeCl_3 : population balance modeling. *Water Science and Technology*. IWA Publishing, 2021. Vol. 83, No. 10. pp. 2377–2388.
- Loginova I. V., Kyrchikov A. V., Penyugalova N. P. Alumina production process : Learner's guide. Ed. by I. V. Loginova. Yekaterinburg : Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2015. 336 p.
- Salamatov V. I., Salamatov O. V. Understanding the process kinetics of thickening and washing of low-silicon bauxite residues. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. Vol. 22, No. 4. pp. 191–202. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-191-202.
- Gandurina L. V. Use of organic flocculants for treatment of natural and industrial wastewater and for sludge treatment. Construction site utility services: An overview. VNIINTPI. Moscow, 2000. Iss. 2. 59 p.
- Fedorova E. R., Firsov A. Yu. Red mud thickening process simulation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016. No. 11. pp. 3–28.
- Romashev A. O., Nikolaeva N. V., Gatiatullin B. L. An adaptive approach built on the basis of machine vision used for determining concentrate settling parameters. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 677–685. DOI: 10.31897/PMI.2022.77.
- Salamatov O. V., Salamatov V. I. On the effect of flocculants on the process kinetics of thickening and washing of low-silicon bauxite residues in alumina production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. Vol. 23, No. 2. pp. 404–414. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-404-414.
- Chernigov D. A., Bogorodskiy A. V., Nabiulin R. N., Mineeva T. S. Understanding the processes of thickening gold ore process slurries. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021. Vol. 25, No. 3. pp. 391–401. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-391-401.
- Laros T., Slottee S., Baczek F. Testing, sizing, and specifying sedimentation equipment. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*. 2022. Vol. 1. 2243 p.
- Kynch G. J. A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*. 1952. Vol. 48. p. 166.
- Labiosa A. A. Dynamic simulation of red mud washers used in aluminum industries. School of Civil, Environmental and Chemical Engineering RMIT University VICTORIA. Australia, 2010. 143 p.