

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ

А. А. Шкоп

Аспирант*

E-mail: shkop_ecomass@ukr.net

М. А. Цейтлин

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: mzeit@mail.ru

А. В. Шестопалов

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: pheonix_alex@mail.ru

*Кафедра химической техники и промышленной экологии

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Досліджено вплив концентрації і дисперсного складу на процес флокуляції полідисперсних вугільних шламів. Визначено, що швидкість осідання утворених агрегатів зростає при концентрації твердої фази до 30 г/дм³ (умова хорошої адсорбції полімеру і утворення міцних зв'язків), а також вмісті твердої фракції розміром більше 40 мкм понад 10 % (умова утворення стійкої структури флокул). Встановлено, що критерієм ефективності процесу утворення міцних агрегатів може служити залишкова швидкість осідання флокул після механічного впливу

Ключові слова: флокуляція, полідисперсні шлами, агрегатоутворення, міцність флокул, швидкість осідання, інтенсифікація

Исследовано влияние концентрации и дисперсного состава на процесс флокуляции полидисперсных угольных шламов. Определено, что скорость осаждения образованных агрегатов возрастает при концентрации твердой фазы до 30 г/дм³ (условие хорошей адсорбции полимера и образования прочных связей), а также содержания твердой фракции более 40 мкм свыше 10 % (условие образования устойчивой структуры флокул). Установлено, что критерием эффективности процесса образования прочных агрегатов может служить остаточная скорость оседания флокул после механического воздействия

Ключевые слова: флокуляция, полидисперсные шламы, агрегатообразование, прочность флокул, скорость осаждения, интенсификация

1. Введение

Производственная деятельность по добыче, обогащению природного сырья (руды, угля и др.) и дальнейшей его переработке (получение кокса, чугуна, стали, цветных металлов и т. д.) сопровождаются образованием значительных количеств техногенных отходов, в том числе в виде шламов, которые сбрасываются в шламонакопители. Накопление отходов приводит к повышению экологического риска загрязнения прилегающих территорий и подземных вод.

В то же время, твердая фаза шламов химической, металлургической, горнодобывающей, угольной промышленности часто является ценным минеральным сырьем, а жидкую фазу целесообразно использовать в замкнутой системе оборотного водоснабжения предприятий взамен чистой воды.

В целом, шламовые воды большинства предприятий химической отрасли являются гетерогенными системами с полидисперсным составом твердой фазы различной природы и представляют собой неоднородные многокомпонентные механические смеси со сложным гранулометрическим составом. Для шламов и илов многих производств (например, углеобогажительных фабрик) характерно высокое (до 90 %) содержание мелкодисперсных (менее 40 мкм) фракций твердой фазы, что делает их очистку технологически сложной и экономически нецелесообразной.

В современных условиях уделяется огромное внимание совершенствованию существующих технологий и разработке новых эффективных методов очистки воды, внедрению ресурсосберегающих малоотходных технологий, модернизации существующих методов и конструкций водоочистительных аппаратов. Такие решения позволяют сэкономить материальные и природные ресурсы, а также утилизировать ценные компоненты шламовых отходов.

По результатам промышленных испытаний по очистке полидисперсных шламовых вод различного происхождения было выявлено, что эффективность очистки зависит от гранулометрического состава твердой фазы в шлеме, ее начальной концентрации, условий проведения флокуляции. Все вышесказанное приводит к необходимости установления наилучших (оптимальных) условий флокуляции и сгущения твердой фазы полидисперсных шламов в зависимости от факторов, влияющих на прочность флокул.

В связи с этим актуальной научно-практической задачей является интенсификация процессов очистки полидисперсных шламов промышленных предприятий.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Существующие водно-шламовые схемы перерабатывающих предприятий, описанные в литературных

источниках [1–4], предусматривают два этапа очистки образующихся шламов. Первый этап, как правило, включает первичное осветление (сгущение) шлама в отстойниках или шламонакопителях. После чего производят обезвоживание сгущенного шлама с помощью центрифуг или фильтрующего оборудования [5]. Это позволяет замкнуть водооборотный цикл производства и направить очищенную воду на нужды предприятия.

Применение того или иного процесса обезвоживания зависит в основном от гидравлической крупности и гранулометрического состава шлама, а также целесообразности использования твердой фазы в качестве товарного продукта [6]. В мировой практике абсолютно четко прослеживается тенденция к увеличению удельного веса механического обезвоживания осадка сточных вод из-за высокой стоимости термических методов.

Интенсификация процесса осаждения полидисперсных суспензий осуществляется, как правило, путем агрегации мелкодисперсных частиц за счет различных видов коагуляции [7], флокуляции с помощью полимеров [8] и биополимеров [9], селективной флокуляции на минерал-носителе [3] и т. д.

Явление агрегации твердой фазы высокодисперсных суспензий с применением флокулянтов широко используется для обезвоживания осадков на фильтрующем или центрифугирующем оборудовании [10]. Так, например, в статье [11] отмечается высокая эффективность ионогенных (катионогенного и анионогенного) флокулянтов для очистки угольного шлама по сравнению с неионогенным, требующим большего расхода. Авторы статьи [12] для очистки шламов углеобогащения рекомендуют анионогенный флокулянт и установили зависимость его расхода от концентрации твердой фазы и значения pH. На адсорбционную активность полимерного флокулянта влияют также и другие факторы, например минерализация жидкой фазы [13]. Многообразие факторов, влияющих на процесс флокуляции, приводит к увеличению его дозировки, вместо оптимизации самого процесса, например стадий адсорбции полимера на поверхности частиц и образование агрегатов.

Теория флокуляции минеральных и угольных суспензий получила развитие в многочисленных публикациях современных авторов [14–16]. Есть публикации, обосновывающие механизм разрушения флокул за счет напряжения сдвига [15]. Рассчитано, что деструкция флокул происходит при напряжении сдвига порядка 1–10 Па, причём прочность агрегатов возрастает с увеличением дозы флокулянта [16]. В то же время еще недостаточно изучены такие вопросы, как строение и структура флокул полидисперсных шламов, их прочностные характеристики и механизм сохранения прочности, влияние гранулометрического состава твердой фазы на процессы адсорбции и флокулообразования и т. д. Без исследования этих вопросов сложно обосновать и разработать способы управления процессом флокуляции.

Вследствие разрушения уже образованных флокул в современных водно-шламовых схемах агрегация мелкодисперсных фракций твердой фазы проводится перед каждым аппаратом для дофлокуляции, что приводит к существенным затратам. Поэтому важным

является решение вопросов научно-обоснованного выбора методов интенсификации разделения неоднородных полидисперсных суспензий и максимально эффективного использования флокулянта. Одним из таких методов является подбор наилучших параметров осуществления процесса флокулообразования с минимальным расходом дорогих химических реагентов.

Кроме того, у исследователей не существует единого мнения о режимах флокуляции и показателях, которые используются для оценки эффективности этого процесса.

Таким образом, выявление закономерностей флокулообразования полидисперсных шламов позволит интенсифицировать процесс очистки шлама и минимизировать расход дорогостоящего флокулянта.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование путей интенсификации обезвоживания полидисперсных суспензий в процессе их флокуляции, а также изучение факторов, влияющих на образование устойчивых к механическим воздействиям агрегатов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- исследовать влияние концентрации твердой фазы и дисперсного состава шлама на эффективность флокулообразования;
- исследовать зависимость скорости оседания флокул от дисперсного состава;
- предложить критерий эффективности процесса образования устойчивых к механическим воздействиям агрегатов;
- исследовать структуру флокул в разных режимах оседания и возможности направленного изменения их прочности к механическим воздействиям.

4. Материалы и методы исследования процесса флокуляции полидисперсного угольного шлама

4.1. Приготовление модельных шламов с контролируемыми параметрами

Исследование флокуляции полидисперсных шламов проводили на модельных шламах с контролируемыми параметрами концентрации и дисперсной фазы, синтезированных следующим образом. Реальный шлам, взятый на одной из действующих углеобогачительных фабрик, пропускали через сита размером 40, 60, 80 и 100 мкм и отделяли крупные фракции. Шлам с фракцией меньше 40 мкм сгущали отстаиванием и затем осветленной жидкостью разбавляли до концентраций от 10 до 100 г/дм³, необходимых для исследования влияния концентрации твердой фазы на процесс флокуляции.

Для последующих серий опытов по изучению влияния дисперсного состава синтезировали шлам с содержанием твердой фазы от 10 до 100 г/дм³ и добавлением среднего класса размером 40–100 мкм в количестве от 5 до 30 %.

Фракция более 100 мкм не представляла интереса для дальнейших исследований. Плотность твердой фазы шлама составляла 1,7 кг/дм³.

4. 2. Методика проведения исследований процесса флокуляции полидисперсных шламов

Измерение кинетики осаждения флокул в режиме свободного (нестесненного) оседания проводилась в лабораторном мерном цилиндре диаметром 50 мм и высотой 500 мм.

Перед непосредственным проведением эксперимента были подобраны тип флокулянта и его концентрация. Для шлама данного производства использовали неионогенный и анионоактивный флокулянты в расчете 200 г/т.

Расчетное количество разбавленного раствора с массовой долей флокулянта 0,1 % добавляли в верхний слой мерного цилиндра двумя порциями. Вначале неионогенный флокулянт (стадия адсорбции на поверхности твердой фазы) – 20 % от суммарного количества флокулянтов, затем оставшиеся 80 % анионогенный (стадия флокулообразования). После ввода каждой порции флокулянта содержимое цилиндра перемешивали десятикратным медленным его опрокидыванием. С помощью секундомера замеряется промежуток времени, в течение которого граница раздела двух фаз проходит путь между двумя отмеченными на цилиндре кольцами. Этот путь составлял 0,4 от высоты цилиндра, что соответствует зоне свободного осаждения частиц. Затем по полученным экспериментальным данным рассчитывали скорость осаждения флокул (V_1 , мм/с).

Для оценки качества флокуляции шламов (механической прочности агрегатов) использован следующий технологический тест. После завершения осаждения флокул и измерения их скорости осаждения, повторно перемешивали пробу мешалкой со скоростью на конце лопасти примерно 2 м/с в течении 40 сек в прямоугольной емкости 12×7 см. Затем сливали содержимое в мерный цилиндр и определяли скорость осаждения взвешенных частиц в пробе (V_2 , мм/с).

Такое механическое воздействие имитировало движение сфлокулированного шлама от аппарата сгущения (отстойник) до аппарата обезвоживания (центрифуга или фильтр-пресс). Остаточная скорость осаждения после механического воздействия характеризует размер агрегатов, следовательно, и прочность флокул и их седиментационную активность.

На этапах ввода первой порции флокулянта и определения скорости оседания флокул до и после механического воздействия отбирали пробы шлама, которые изучали под микроскопом.

5. Результаты исследования процесса флокуляции полидисперсных шламов

По результатам проведенных экспериментальных исследований рассчитывалась скорость осаждения флокул, как отношение 0,4 высоты осветленного слоя (свободное оседание) ко времени прохождения флокулами этого пути. Первичные результаты эксперимента представляли собой точки в координатах «время оседания флокул – концентрация твердой фазы в шламе». Каждая точка являлась усредненным значением результатов трех-четырёх опытов. Относительное отклонение экспериментальных данных от среднего значения (отношение значения скорости оседания в конкретном

опыте к среднему значению нескольких опытов, проведенных в той же точке) не превышало 9,4 %.

Результаты исследований скорости осаждения флокул от концентрации твердой фазы в шламе и содержания средней фракции в интервале 0–30 % (значения линий на графике) приведены на рис. 1. Из графиков видно, что с ростом концентрации твердой фазы эффективность флокуляции падает и оптимум для осаждения флокул в поле гравитационных сил находится в интервале 20–50 г/дм³ при одинаковой концентрации флокулянта.

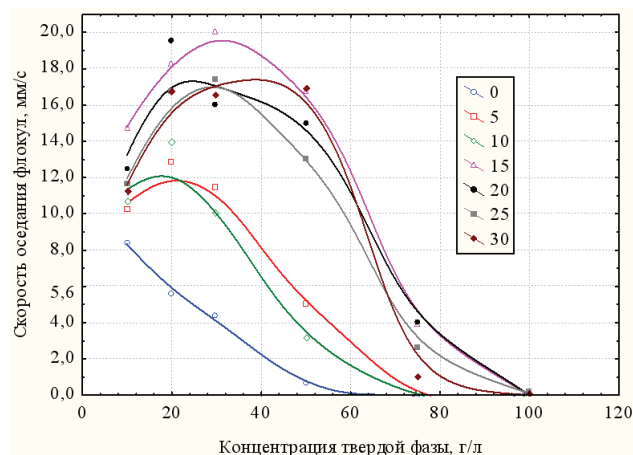


Рис. 1. Зависимость скорости осаждения флокул от концентрации и дисперсного состава твердой фазы в шламе: точки на графике – результаты лабораторных опытов; линии на графике – сглаженная линия разброса экспериментальных значений; обозначения на линиях – доля содержания твердого класса размером более 40 мкм, %

В то же время с увеличением содержания средней фракции (40–100 мкм) твердой фазы в шламе с 10–30 % существенно увеличивают скорость осветления шлама. Наблюдается образование крупных агломератов с достаточной хорошей скоростью оседания (более 10 мм/с), что подтверждают и фотографии флокул, представленные на рис. 2.

С ростом концентрации свыше 60 г/дм³ вместо устойчивых агрегатов образуются флокулы расплывчатой формы рис. 3, а, б, которая обретает четкие контуры с ростом концентрации среднего класса рис. 3, в, г.

Практический интерес представляет скорость осаждения сфлокулированного шлама после механического воздействия на него мешалкой. Зависимость этой скорости от содержания среднего класса (40–100 мкм) твердой фазы и концентраций представлены на рис. 4. Графики показывают, что остаточная скорость с ростом концентрации падает, а оптимум смещается в область концентраций 10–30 г/дм³.

Повышение содержания среднего класса в шламе способствует сохранению скорости (прочности агрегатов) при более высоких концентрациях, которые так же, как и скорость без механического воздействия, ограничиваются концентрацией 60 г/дм³. Как видно из рис. 4, содержание среднего класса так же влияет на прочность образованных агрегатов, с ростом доли которого в шламе наблюдается сохранение размера и прочности флокул (следовательно, и остаточной скорости оседания).

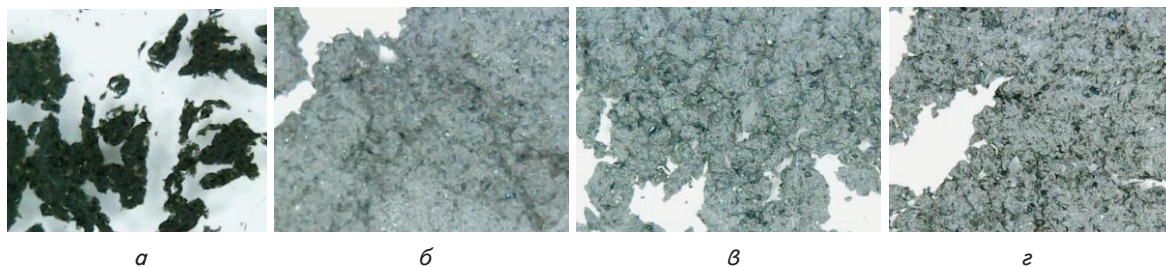


Рис. 2. Фотографии образованных флокул при концентрации 20 г/л и содержании в шламе средней фракции, %: а – 0, б – 10, в – 20, з – 30

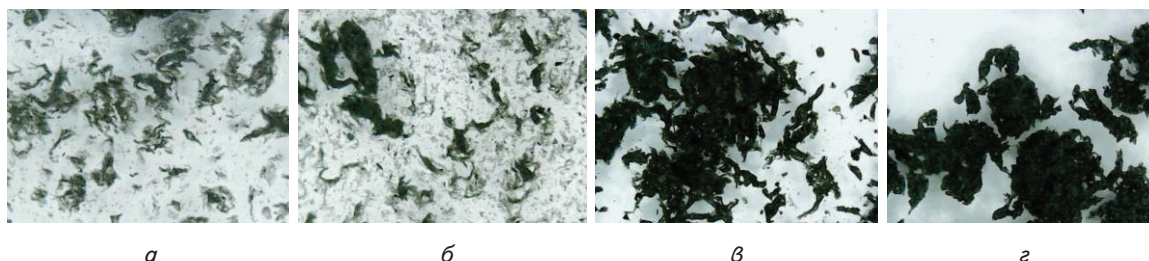


Рис. 3. Фотографии образованных флокул при концентрации 75 г/л и содержании в шламе средней фракции, %: а – 0, б – 10, в – 20, з – 30

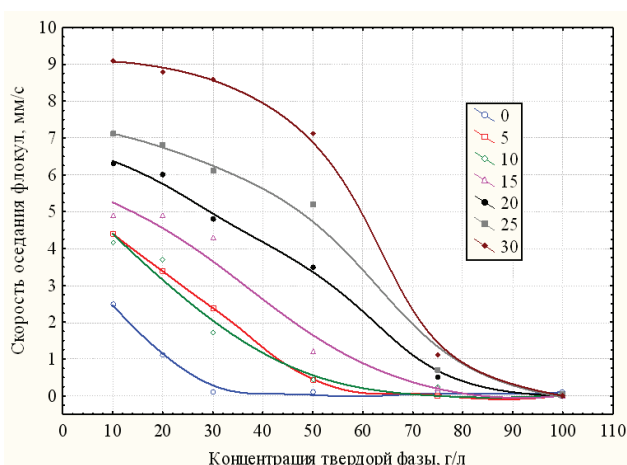


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения флокул, претерпевших механическое воздействие, от концентрации и дисперсного состава твердой фазы в шламе: точки на графике – результаты лабораторных опытов; линии на графике – сглаженная линия разброса экспериментальных значений; обозначения на линиях – доля содержания твердого класса размером более 40 мкм, %

В отсутствие частиц класса 40–100 мкм (нижняя кривая, рис. 4) наблюдается резкое падение остаточной скорости, а разрушенные флокулы приобретают бесформенный вид (рис. 5, а), по сравнению с более устойчивыми агрегатами, содержащими средний класс (рис. 5, в, з, б).

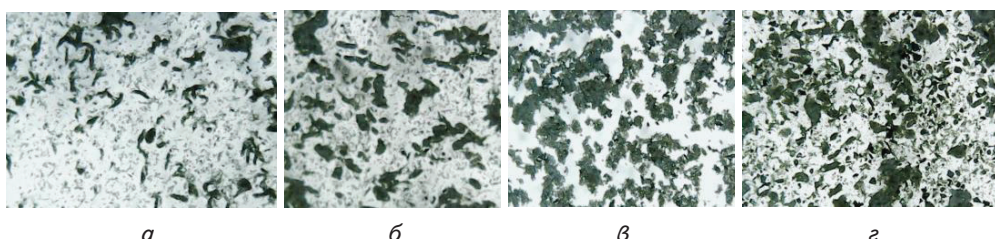


Рис. 5. Фотографии флокул после механического воздействия при концентрации 20 г/л и содержании в шламе средней фракции, %: а – 0, б – 10, в – 20, з – 30

При концентрации частиц размером более 40 мкм свыше 10 % наблюдается рост скорости оседания флокул даже после механического воздействия с достаточно хорошей скоростью (выше 3 мм/с при концентрациях твердой фазы до 30 г/л). Наблюдаются (рис. 5, в, б) четкие очертания флокул и жидкая фаза после их оседания остается прозрачной.

6. Обсуждение результатов исследования флокуляции полидисперсных шламов

Согласно представлениям о процессе флокуляции образование агрегатов по орто кинетическому механизму происходит в два этапа: адсорбция полимера на поверхности частицы и затем мостикообразование между частицами. При низких концентрациях твердой фазы флокулят распределяется равномерно в объеме дисперсной среды и хорошо адсорбируется на поверхности твердых частиц. Повышение концентрации твердой фазы, очевидно, приводит к неравномерному распределению полимера на поверхности частиц, сближение которых способствуют началу второго этапа – агрегации частиц. Это приводит к образованию непрочных связей и соответственно неустойчивых флокул, разрушающихся при механических воздействиях. В то же время при низких концентрациях на единицу площади раздела фаз (на каждую частицу) приходится больше макромолекул полимера, что увеличивает прочность связи частиц в структуре агрегата.

Как показали исследования, важную роль в процессе образования устойчивых к механическому воздействию агрегатов играет также структура образованных флокул, которая зависит от присутствия среднего класса (более крупных по размеру частиц). Очевидно, за счет большей поверхности такие частицы адсорбируют больше макромолекул полимера, а также эффективнее захватывают более мелкие частицы, выступая флокулообразователями. За счет большей массы и адсорбционной поверхности фракция более 40 мкм агрегирует мелкие частицы с образованием более прочных связей, чем при объединении мелких (размером менее 40 мкм) частиц между собой. Фотографии, сделанные на первой стадии флокуляции (ввод неионогенного полимера), представленные на рис. 6, показывают, что при одинаковой концентрации твердой фазы при наличии среднего класса формируются ярко выраженные зародыши будущих агрегатов (рис. 6, б–г). В отсутствие среднего класса – просто скопление небольших сгустков твердой фазы (рис. 6, а).

Кроме того, чем меньше частицы, тем трудней им преодолеть силы отталкивания («расклинивающее давление») и приблизиться на достаточно близкое друг к другу расстояние (соизмеримое с их радиусом), необходимое для агрегации. Так как необходимая для преодоления потенциального барьера энергия пропорциональна массе частицы, то более крупные частицы эффективнее концентрируют на своей поверхности мелкие, сближаясь с ними и захватывая их.

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно утверждать, что достаточно удобным качественным показателем прочности образованных флокул может служить остаточная скорость их осаждения после механического воздействия, которая, в свою очередь, соответствует размеру флокул и прочности связи между частицами. Соблюдение условий оптимального соотношения концентрации и дисперсного состава шлама на этапе образования агрегатов (флокуляции шламов) позволяет получить достаточно прочные флокулы, устойчивые к механическим воздействиям, и избавиться от необходимости дофлокуляции шлама перед обезвоживающим оборудованием (центрифугами или фильтр-прессами), то есть сэкономить реагенты.

Результаты промышленных испытаний показали, что достаточно высокая эффективность удаления твердой фазы в центрифугах на уровне 90–98 % достигается при значениях скорости осаждения флокул (сгущенного перед центрифугой угольного шлама), равной $V_2 > 2$ мм/с. Эта величина показывает достаточно высокую прочность флокул и позволяет провести эффективное сгущение шлама в центрифуге без добавления новой порции флокулянта с минимальным уносом твердой фазы.

Рассматривая область пересечения полученных экспериментальных кривых (рис. 4) с полученным в промышленных условиях значением эффективности флокуляции $V_2 = 2$ мм/с, можно построить зависимость влияния среднего класса и концентрации на прочность флокул, соответствующую минимальному расходу флокулянта (рис. 7).

Таким образом, используя эту зависимость, можно достаточно точно прогнозировать эффективность флокуляции угольного шлама (при соблюдении всех прочих условий получения лабораторных данных). Зная концентрацию и ситовой состав шлама, мож-

но управлять процессом флокуляции и образования прочных флокул путем доведения концентрации (разбавления шлама) или содержания среднего класса (дополнительным внесением твердой фазы, например микропеска) до требуемого значения на кривой.

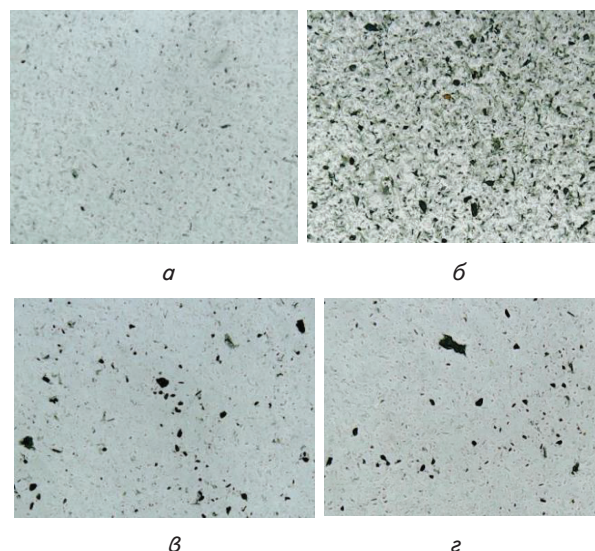


Рис. 6. Фотографии зародышей флокул после введения первой дозы флокулянта при концентрации 30 г/л и содержании в шламе средней фракции, %:
а – 0, б – 15, в – 20, г – 30

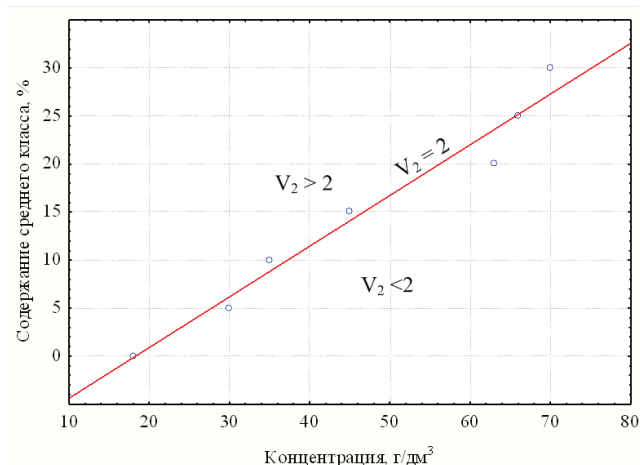


Рис. 7. Зависимость остаточной прочности флокул после механического воздействия от содержания среднего класса и концентрации твердой фазы в шламе

7. Выводы

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

- исследования влияния концентрации твердой фазы на эффективность флокулообразования показали, что наилучшая скорость оседания флокул (их размер) наблюдается в пределах 10–30 г/дм³ и с ростом концентрации уменьшается из-за недостаточной адсорбции полимера на поверхности твердых частиц;
- исследование зависимости скорости оседания флокул от дисперсного состава показали, что скорость оседания и прочность агрегатов к механическому воз-

действию возрастает с ростом доли содержания клас-са, более 40 мкм начиная с 10 % и выше;

– критерием эффективности процесса образования устойчивых к механическим воздействиям агрегатов может служить остаточная скорость после механического воздействия, которая пропорциональна размеру флокула и не должна быть меньше 2 мм/с;

– путем создания оптимальных условий для адсорбции полимера, например изменением концентрации твердой фазы и содержания среднего класса (частиц 40–100 мкм) на стадии флокулообразования, возможно управлять процессом и формировать достаточно прочные флокулы с минимальным расходом флокулянта.

Литература

1. Хмеленко, И. П. Анализ объемов, состава и способов переработки шламов углеобогатительных фабрик [Текст] / И. П. Хмеленко // Геотехническая механика. – 2009. – Вып. 82. – С. 176–181.
2. Полулях, А. Д. Технологический инжиниринг при обогащении полезных ископаемых [Текст] / А. Д. Полулях, П. И. Пилов, А. И. Егурнов и др. – Д.: НГУ, 2012. – 712 с.
3. Murphy, C. Operation of belt filter presses at the rockspring development preparation plant [Electronic resource] / C. Murphy, C. Bennett, G. Olinger, B. Cousins // Corrxan. – 2012. – Available at: http://www.corrzan.com/Coalprep_2012_Paper.pdf
4. Deberdeev, I. Kh. Study of Interaction of Flotation Reagents with Fine Particles of Highly Mineralized Coal Slimes [Text] / I. Kh. Deberdeev, B. I. Linev et al. // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. – China, 2006. – Vol. 1. – P. 378–384.
5. Еремеев, И. В. Анализ результатов обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности [Текст] / И. В. Еремеев // Забагаживания корисних копалин. – 2012. – Вип. 51 (92). – С. 178–184.
6. Шкоп, А. А. Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий [Текст] / А. А. Шкоп // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 6 (74). – С. 44–49. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40557
7. Lee, K. E. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review [Text] / K. E. Lee, N. Morad, T. T. Teng, B. T. Poh // Chemical Engineering Journal. – 2012. – Vol. 203. – P. 370–386. doi: 10.1016/j.cej.2012.06.109
8. Yu, J. Flocculation of kaolin particles by two typical polyelectrolytes: a comparative study on the kinetics and floc structures [Text] / J. Yu, D. Wang, X. Ge, M. Yan, M. Yang // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2006. – Vol. 290, Issue 1-3. – P. 288–294. doi: 10.1016/j.colsurfa.2006.05.040
9. Guibal, E. Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (chitosan) [Text] / E. Guibal, J. Roussy // Reactive and Functional Polymers. – 2007. – Vol. 67, Issue 1. – P. 33–42. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2006.08.008
10. Коновалова, Т. А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно-шламовых схем углеобогатительных фабрик [Текст] / Т. А. Коновалова, Г. Б. Векслер, А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг // Известия МГТУ. – 2014. – Т. 3, № 1 (19). – С. 5–10.
11. Sabah, E. Interaction mechanism of flocculants with coal waste slurry [Text] / E. Sabah, Z. E. Erkan // Fuel. – 2006. – Vol. 85, Issue 3. – P. 350–359. doi: 10.1016/j.fuel.2005.06.005
12. Ofori, P. Shear-induced floc structure changes for enhanced dewatering of coal preparation plant tailings [Text] / P. Ofori, A. V. Nguyen, B. Firth, C. McNally, O. Ozdemir // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 172, Issue 2-3. – P. 914–923. doi: 10.1016/j.cej.2011.06.082
13. Ji, Y. Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculent [Text] / Y. Ji, Q. Lu, Q. Liu, H. Zeng // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2013. – Vol. 430. – P. 29–38. doi: 10.1016/j.colsurfa.2013.04.006
14. Kumar, S. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings [Text] / S. Kumar, S. Bhattacharya, N. R. Mandre // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – Vol. 114, Issue 11. – P. 945–949.
15. Sun, W. Study of Al(OH)₃-Polyacrylamide-Induced Pelleting Flocculation by Single Molecule Force Spectroscopy [Text] / W. Sun, J. Long, Z. Xu, J. H. Masliyah // Langmuir. – 2008. – Vol. 24, Issue 24. – P. 14015–14021. doi: 10.1021/la802537z
16. Гольберг, Г. Ю. Образование, существование и разрушение флокуляционных структур [Текст] / Г. Ю. Гольберг, А. А. Лавриненко // Горный информационный бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 47–54.