

*Досліджено вплив концентрації, дисперсного складу і ступеня згущення на міцність флокуляційних структур. Виявлено, що для утворення міцних агрегатів полідисперсного вугільного шламу рекомендується застосування поєднання неіоногенного і аніоногенного флокулянта, замість тільки аніоногенного. Встановлено, що міцність флокул після механічного впливу має найбільше значення при концентрації твердої фази в шламі 10–30 г/дм<sup>3</sup> і часткою середньої фракції більше 15–20 %. Показано, що зі зростанням ступеня згущення шламу понад 140–150 г/л істотно зменшується міцність агрегатів до механічних впливів*

*Ключові слова: флокуляція, полідисперсні шлами, агрегатоутворення, міцність флокул, залишкова швидкість осідання, ступінь згущення шламу*

*Исследовано влияние концентрации, дисперсного состава и степени сгущения на прочность флокуляционных структур. Выявлено, что для образования прочных агрегатов полидисперсного угольного шлама рекомендуется применение сочетания неионогенного и анионогенного флокулянта, вместо только анионогенного. Установлено, что прочность флокул после механического воздействия имеет наибольшее значение при концентрации твердой фазы в шламе 10–30 г/дм<sup>3</sup> и долей средней фракции более 15–20 %. Показано, что с ростом степени сгущения свыше 140–150 г/л существенно уменьшается прочность агрегатов к механическим воздействиям*

*Ключевые слова: флокуляция, полидисперсные шламы, агрегатообразование, прочность флокул, остаточная скорость осаждения, степень сгущения шлама*

УДК 622.7

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91031

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ФЛОКУЛЯЦИОННЫХ СТРУКТУР ПОЛИДИСПЕРСНЫХ УГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

**А. А. Шкоп\***

E-mail: shkopc@comass@ukr.net

**М. А. Цейтлин**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: mzeit@i.ua

**А. В. Шестопалов**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: shestopalov.it@khp.edu.ua

**В. Ф. Райко**

Кандидат технических наук, профессор\*

E-mail: raiko.ntu@yandex.ua

\*Кафедра химической техники и

промышленной экологии

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

## 1. Введение

Несмотря на тенденцию к уменьшению общего антропогенного воздействия на окружающую природную среду, которая наблюдается в последнее время, уровень техногенного влияния на поверхностные и подземные воды Украины остается высоким. Это, в частности, связано с тем, что свыше четверти сбросов сточных вод различного происхождения в реки, водохранилища, другие водные объекты остается загрязненной и грязной.

Современные требования по экономической и экологической эффективности переработки минерального сырья, ресурсо- и энергосбережению обуславливают необходимость создания замкнутых водно-шламовых схем углеобогащательных фабрик [1]. Углеобогащение – одна из важнейших отраслей топливно-энергетического комплекса, производящая энергоноситель для тепловых электростанций, железнодорожного и водного транспорта, металлургической и коксохимической промышленности, а также для коммунально-бытового потребления. Большинство процессов обогащения осуществляется в водной среде. Это обуславливает необходимость отделения продуктов обогащения от воды и направления последней в водооборот [2, 3]. Поэтому в технологии обогащения углей важное место занимают процессы разделения твердой и жидкой фаз: гидравлическая классификация, сгущение, фильтрование, центрифугирование.

В практике водоочистки полидисперсных шламовых вод процесс осветления воды и сгущения шлама проводится по стандартной схеме: смешение шлама с флокулянтами → первичное осветление в отстойниках или радиальных сгустителях → обезвоживание центрифугированием или фильтрованием.

Для шламов и илов углеобогащательных фабрик характерно высокое (до 85–90 %) содержание мелкодисперсных (менее 40 мкм) фракций твердой фазы, что делает их очистку технологически сложной и экономически нецелесообразной. В современных условиях одной из актуальных проблем в практике обогащения углей является совершенствование техники и технологии обезвоживания угольных полидисперсных суспензий мелких классов (тонких илов, шламов, флотоконцентратов и др.), образующихся на обогащательных фабриках [4].

Наиболее эффективным способом интенсификации указанных процессов является применение синтетических полимерных флокулянтов и коагулянтов [5], стоимость которых составляет значительную часть материальных затрат фабрики на обеспечение водно-шламового хозяйства.

Вследствие разрушения уже образованных флокул при транспортировке шлама от сгущающего к обезвоживающему оборудованию в современных водно-шламовых схемах проводится повторная флокуляция перед каждым аппаратом.

Оптимизация процесса обезвоживания состоит в том, чтобы из множества вариантов процесса выбрать те, которые обеспечат максимальную эффективность процесса с минимальными экономическими затратами.

Все вышесказанное приводит к необходимости установления оптимальных условий флокуляции и сгущения твердой фазы, позволяющих получить достаточно прочные агрегаты, не требующие повторной флокуляции после транспортировки.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Сточные воды (шламы, илы) углебогатительных фабрик являются полидисперсными суспензиями с частицами твердой фазы различной природы (угольная и минеральная фракции) и размера.

По теории Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека агрегативная устойчивость дисперсных систем определяется соотношением молекулярных сил притягивания и электростатических сил отталкивания между частицами [6]. Нарушение агрегативной устойчивости таких систем с помощью флокулянтов предопределяет слипание частиц. Сведения, содержащиеся в литературе [7], дают основание полагать, что эта теория может быть применена для случая взаимодействия частицы твердой фазы и макромолекулы полимера.

Существует несколько признанных механизмов флокуляции для неионогенных полимеров. Флокуляция по механизму вытеснения основывается на частичном или полном вытеснении макромолекул из пространства между частицами дисперсии [8]. Такой процесс наблюдается в случае, когда полимер не взаимодействует с адсорбентом. В случае, когда в системе существует взаимодействие полимер-адсорбент, частицы связываются в флокулы посредством полимерных мостиков, которые возникают в результате адсорбции определенных участков макромолекулы одновременно на нескольких разных частицах [9].

Эффективность флокуляции для угольного шлама зависит от многих факторов: концентрации твердого в обрабатываемых водах, продолжительности и интенсивности перемешивания, вязкости вод, молекулярной массы и заряда флокулянта, температуры и др.

Многообразие факторов, влияющих на процесс флокуляции, и недостаточная изученность процесса флокулообразования приводят к увеличению расхода флокулянта, вместо оптимизации самого процесса (например, стадий адсорбции полимера на поверхности частиц или образование прочных флокуляционных структур).

Для очистки угольного шлама, содержащего минеральные мелкодисперсные примеси глинистых частиц, отмечается высокая эффективность применения ионогенных (катионогенного и анионогенного) флокулянтов по сравнению с неионогенным [10]. Авторы статьи [11] 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 [12]. Стабилизирующее действие высокомолекулярных соединений возрастает по мере увеличения их молекулярной массы. Также наблюдается резкое возрастание устойчивости дисперсных систем [13].

Несмотря на значительную изученность самого процесса флокуляции, структура и прочностные характеристики флокул, а также реологические свойства сфлокулированных суспензий, исследованы недостаточно. В то же время, знание закономерностей образования прочных структур и течения сфлокулированных суспензий позволит прогнозировать возможность их транспортирования, обеспечивающего минимальную деструкцию флокул. Это требует поиска ответов на следующие вопросы [14]:

– до какого содержания твердого целесообразно сгущать суспензию так, чтобы при ее течении деструкция флокул была бы сведена к минимуму?

– какие значения параметров режима течения сфлокулированной суспензии обеспечивают при данных условиях минимальную деструкцию флокул?

В последнее время появились 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]. Установлено, что суспензии концентрата флотации углей без применения флокулянтов по характеру течения близки к ньютоновским жидкостям, а структурообразование в суспензии не происходит [17]. При подаче флокулянта суспензия приобретает псевдопластичные свойства. Данные [16, 17] так же согласуются с [18]. Следствием разрушения контактов частиц в структуре является усиление неньютоновского характера течения системы в результате перехода от вязкопластичного к псевдопластичному течению, независимо от химической природы применяемого флокулянта [19].

Результаты исследований, описанные в [20], показали, что скорость осаждения флокул при одинаковом расходе флокулянта возрастает при концентрации твердой фазы ниже 30 г/дм<sup>3</sup>, а также содержании твердой фракции крупностью более 40 мкм свыше 10%. Удобным критерием эффективности процесса образования прочных агрегатов может служить остаточная скорость оседания флокул после механического воздействия, которая характеризует размер и структуру агрегатов.

В то же время еще недостаточно изучены такие вопросы, как строение и структура флокул полидисперсных шламов после механического воздействия, их прочностные характеристики и механизм сохранения прочности, влияние гранулометрического состава твердой фазы на прочность флокуляционных структур и т. д.

Таким образом, выявление новых закономерностей флокулообразования полидисперсных шламов позволит обосновать и разработать способы управления процессом флокуляции, решить проблемы, связанные с транспортировкой сфлокулированных суспензий, исключить структурообразование при флокуляции и создать предпосылки для решения задачи по оптимизации расхода флокулянтов.

Без дополнительного исследования этих вопросов сложно обосновать и разработать способы управления процессом флокуляции и образование прочных сфлокулированных структур.

## 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение прочности флокуляционных структур полидисперсных суспензий угольного

шлама, а также факторов, влияющих на образование устойчивых к механическим воздействиям агрегатов.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- исследовать влияние способов ввода и типа флокулянта на прочность флокул;
- исследовать зависимость структуры и прочности флокул от концентрации и дисперсного состава шлама;
- исследовать влияние степени первичного сгущения сфлокулированного шлама на прочность флокул.

#### 4. Материалы и методы исследования прочности флокул 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. Методика приготовления модельных шламов с контролируемыми параметрами подробно описана в работе [21]. Для исследований прочности флокул применяли шлам с концентрацией твердой фазы от 10 до 50 г/л. Для изучения влияния дисперсного состава в полученные пробы шлама добавляли частицы твердой фазы размером 40–100 мкм в количестве от 5 до 30 %.

##### 4.2. Методика проведения исследований прочности флокул полидисперсных шламов

Для оценки качества флокуляции шламов и механической прочности образованных агрегатов использовали следующий технологический тест. После ввода неионогенного и анионогенного флокулянтов и завершения осаждения образованных флокул перемешивали пробу мешалкой со скоростью на конце лопасти примерно 2 м/с в течении 40 секунд в прямоугольной емкости 12×7 см. Затем отбирали пробы шлама для изучения под микроскопом, а остальную часть сливали в мерный цилиндр диаметром 50 мм и высотой 500 мм и определяли остаточную скорость осаждения взвешенных частиц.

Такое механическое воздействие имитировало движение сфлокулированного шлама при его транспортировке после аппарата сгущения в аппарат обезвоживания. Остаточная скорость осаждения после механического воздействия характеризует размер и структуру флокул, следовательно, и их прочность. Чем устойчивее флокула к механическому воздействию, тем быстрее она оседает после такого воздействия.

Остаточную скорость осаждения флокул после механического воздействия, определяли 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».

##### 4.3. Методика изучения влияния способов ввода и типа флокулянта на прочность флокул

Для модельного шлама с концентрацией твердой фазы в суспензии 30 г/л и содержанием 15 % частиц среднего класса исследовали влияние на прочность флокул способов ввода и типа флокулянта. Для имитации процесса адсорбции вводили флокулянт двумя спо-

собами: в одну (100 % анионогенный флокулянт) и две порции (неионогенный + анионогенный флокулянт). Расход неионогенного флокулянта в первую точку подавали в количестве 20, 30, 40, 50 % от общей концентрации флокулянта, которая была принята постоянной во всех опытах и составляла 200 г/т.

Во вторую точку вводили анионный флокулянт в концентрациях соответственно 80, 70, 60, 50 %.

Затем имитировали транспортировку по трубопроводу перемешиванием мешалкой со скоростью на конце лопасти примерно 2 м/с в течении 40 сек и измеряли скорость осаждения флокул после механического воздействия.

##### 4.4. Методика исследования условий наилучшего первичного сгущения сфлокулированного шлама

На этом этапе исследования использовали суспензии с концентрацией твердой фазы от 10 до 50 г/л и содержанием среднего класса 40–100 мкм 15 %. Такой гранулометрический состав и концентрации наиболее характерны для реальных шламов и илов угольной промышленности. Расход флокулянта поддерживали постоянным  $C_{\phi} = 200$  г/т.

В мерных цилиндрах в суспензию вводили флокулянт двумя порциями (20 % – неионогенный флокулянт, затем 80 % – анионогенный), перемешивали до образования агрегатов. Затем сгущали сфлокулированный шлам отстаиванием до концентрации твердой фазы в сгущенном продукте 50, 75, 100 и 150 г/л. Для этого в процессе оседания флокул и сгущения шлама сливали рассчитанную для данной концентрации часть осветленной жидкой фазы в отдельный мерный цилиндр. Оставшийся сгущенный продукт перемешивали в емкости с мешалкой в течение 40 секунд и затем смешивали с осветленной жидкой фазой, доводя до первоначальной концентрации. После этого определяли остаточную скорость осаждения флокул.

#### 5. Результаты исследования влияния условий проведения флокуляции и сгущения на прочность флокул

Результаты исследований влияния условий ввода флокулянта на прочность образованных агрегатов (рис. 1) показали, что для данного типа шлама наиболее эффективным является следующее сочетание флокулянтов: 20 % неионогенный и 80 % анионогенный флокулянт. Напомним, что суммарное количество флокулянтов во всех опытах составляло 200 г/т твердой фазы. При введении 100 % анионогенного флокулянта, рекомендованного для данного угольного шлама, скорость осаждения флокул оказывается наименьшей. Причем, как до воздействия мешалки, так и после механического воздействия. Повышение доли неионогенного флокулянта не приводит к дальнейшему повышению эффективности флокулообразования и сохранению устойчивости образованных агрегатов к механическому воздействию. Поэтому в дальнейших исследованиях было принято соотношение флокулянтов 20:80 %.

Исследование влияния концентрации твердой фазы и дисперсного состава (доли содержания среднего класса крупностью 40–100 мкм) на скорость оседания флокул после механического воздействия показали (рис. 2), что с ростом содержания среднего класса частиц увеличи-

вается скорость осаждения. Это, по-видимому, является результатом увеличения прочности флокул. С ростом концентрации твердой фазы шлама скорость осаждения снижается. Повышение содержания твердой фазы в шламе приводит к снижению скорости оседания. Так, на графике рис. 2 видно, что между значениями этого параметра для проб шлама с концентрацией твердого 10 и 20 г/л разница весьма незначительна. Для проб, содержащих 20 и 30 г/л твердого, она больше, а для проб 30 и 50 г/л – значительна. Поэтому с ростом концентрации твердого в шламе для поддержания определенной скорости осаждения необходимо добавлять большее количество частиц среднего класса.

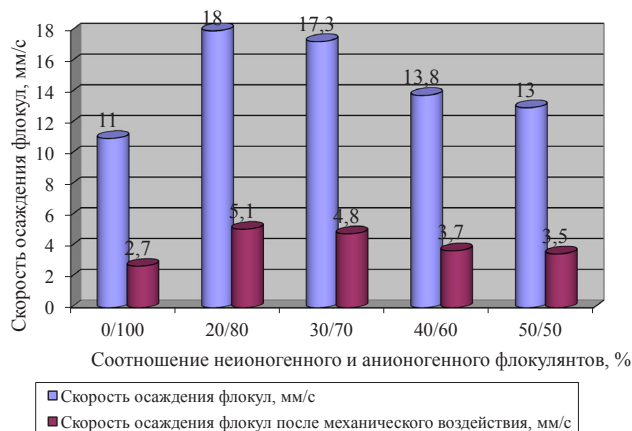


Рис. 1. Зависимость скорости осаждения флокул до и после механического воздействия от соотношения неионогенного и анионогенного флокулянтов

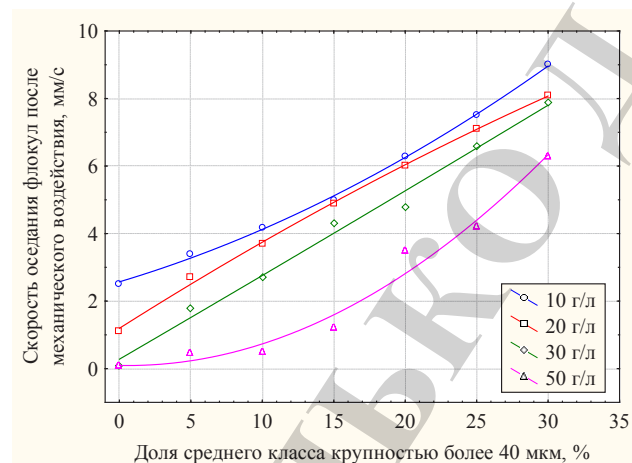


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения флокул, претерпевших механическое воздействие, при различных концентрациях от дисперсного состава твердой фазы в шламе

Верхние линии рис. 2 показывают, что остаточная скорость осаждения флокул (а, следовательно, и их размер) в интервале концентраций 10–30 г/л в большей мере зависит от гранулометрического состава шлама, чем от концентрации твердой фазы и возрастает практически в два раза на каждые 10 % содержания крупных (более 40 мкм) фракций. В целом, при данных значениях концентраций зависимость скорости осаждения флокул, претерпевших механическое воздействие, от содержания средней фракции имеет практически линейный характер.

В отсутствие частиц класса 40–100 мкм и при их содержании до 10 % наблюдаются наименьшие значения остаточной скорости, а разрушенные механическим воздействием флокулы приобретают бесформенный студенистый вид. Кроме того, после воздействия мешалкой жидкая фаза становится мутной, что свидетельствует о высвобождении тонких фракций при разрушении флокул.

На рис. 3 приведены зависимости скорости осаждения шлама после механического воздействия от степени сгущения. Как видно из этого рисунка, скорость осаждения флокул по мере сгущения падает, причем с ростом концентрации твердой фазы в исходном шламе снижение этой скорости более выражено.

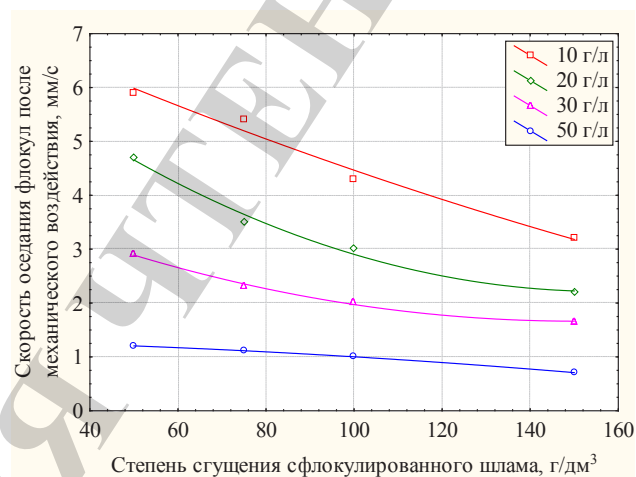


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения флокул, претерпевших механическое воздействие, при различных концентрациях от степени сгущения шлама

Это свидетельствует об образовании менее прочных агрегатов флокул при высоких начальных концентрациях твердого в шламе и их более активном разрушении при механическом воздействии по мере сгущения.

## 6. Обсуждение результатов исследования флокуляции полидисперсных шламов

Анализ результатов исследования, представленных на рис. 1, позволяет судить о том, что флокуляция единоразовым введением флокулянта наименее эффективна. Вероятно, это связано с механизмом флокуляции, который, как известно, включает две стадии: адсорбцию полимера к поверхности частиц и затем образование агрегатов за счет мостиковой флокуляции. Различные стадии требуют и различных условий их проведения. Использование неионогенного флокулянта с низкой концентрацией в первой порции способствует адсорбции без образования флокул. Чем эффективнее протекает этот этап, тем прочнее образуются флокулы. Затем анионный полимер способствует агрегации частиц, покрытых адсорбированным на них полимером.

Анализ изменения скорости осаждения флокул, претерпевших механическое воздействие, при различных концентрациях в зависимости от дисперсного состава твердой фазы в шламе (рис. 2) позволяет рекомендовать осуществление процесса флокуляции в пределах концентраций 10–30 г/л. Увеличения прочности сфло-

кулированных структур за счет введения в шлам дополнительных крупнодисперсных частиц размером более 40 мкм позволяет получить устойчивые к механическим воздействиям агрегаты. Источником дополнительного среднего класса могут служить любые твердые частицы соответствующей крупности (например, песок).

Анализ полученных микрофотографий (рис. 4) позволяет судить о следующем механизме образования прочных агрегатов. Очевидно, что при одной и той же концентрации шламов, различающихся дисперсным составом, и имеющих вследствие этого различную величину поверхности раздела фаз, на единицу поверхности твердого приходится разное количество макромолекул полимера. В результате, при одинаковой дозировке флокулянта в разных по степени дисперсности суспензиях, на более крупных частицах адсорбируется большее число макромолекул, чем на мелких. Величина силы взаимодействия между частицами во флокуле зависит от прочности и количества «мостиков», пропорциональных количеству адсорбированных макромолекул флокулянта. Поэтому, если флокула образована мелкими частицами с крупностью менее 40 мкм, то количество связей между отдельными частицами в ней существенно меньше, чем во флокуле, содержащей более крупные частицы с большим количеством макромолекул флокулянта. Также важным моментом является процесс флокулообразования. Адсорбция флокулянта на поверхности мелких частиц определяется диффузионными процессами, и требует большего времени, так же как и образования флокул из мелких частиц, требующих сближения соразмерных частиц на достаточно близкое для агрегирования расстояние. При наличии частиц большего размера, движущихся в жидкости, создается градиент скорости, пропорциональный массе частиц, позволяющий более крупной частице с большей вероятностью сталкиваться с мелкими частицами за счет разности скоростей движения. Поэтому агрегация мелких частиц с крупными в присутствии среднего класса способствует быстрому уменьшению количества свободных (неагрегированных) более мелких частиц в объеме и образованию чистой осветленной жидкой фазы. При отстаивании это и приводит к образованию чистой осветленной жидкости. Иными словами, более крупные частицы эффективнее связывают на своей поверхности мелкие, сближаясь с ними и захватывая их.

Сила связи между частицами при дальнейшем укрупнении флокул также зависит от количества адсорбированных макромолекул полимера. В флокуле, образованной мелкодисперсной твердой фазой, сила взаимодействия между отдельными частицами внутри микрофлокулы и макрофлокулы более высокого порядка примерно одинакова. Поэтому при механическом воздействии макрофлокулы разрушаются на мельчайшие сгустки мелких частиц. Наличие среднего класса за счет большого количества полимера на поверхности частиц способствует созданию устойчивых структур, которые при механическом воздействии хотя и распадаются на флокулы меньшего порядка и размера, но все

же обладают достаточно высокой остаточной скоростью осаждения. Повышение скорости оседания после механического воздействия при наличии частиц среднего класса также может быть объяснено повторной агрегацией микрофлокул, за счет сохранившихся активных звеньев на поверхности крупных частиц.

На рис. 4, где представлены микрофотографии проб суспензии после механического воздействия, отчетливо видно, что при повышении содержания среднего класса до 20–30 % после механического разрушения макрофлокул происходит образование флокул меньшего порядка (стрелка вправо на рис. 4). При такой доле твердых частиц характерно отсутствие загрязнения осветленной жидкости после механического воздействия (выделено красным на рис. 4).

Снижение концентрации твердой фазы в шламе (стрелка вверх на рис. 4) показывает образование устойчивых микрофлокул за счет качественной адсорбции полимера на первом этапе процесса флокуляции. При более высоких концентрациях твердой фазы происходит неравномерное распределение полимера на поверхности частиц, сближение которых способствуют началу второго этапа – агрегации частиц. Недостаточная адсорбция флокулянта на части твердой фазы приводит к образованию непрочных связей и соответственно неустойчивых флокул, разрушающихся при механических воздействиях.

Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о необходимости сгущать шлам лишь до определенного предела, в зависимости от требуемой остаточной скорости. Так, например, для исходной концентрации твердого в шламе 30 г/л при необходимости сохранения остаточной скорости после сгущения не менее 2 мм/с максимальная степень сгущения должна быть не более 100 г/л. Для шламов с более низкой концентрацией твердой фазы (10–20 г/л) степень сгущения можно увеличить до 150–170 г/л.

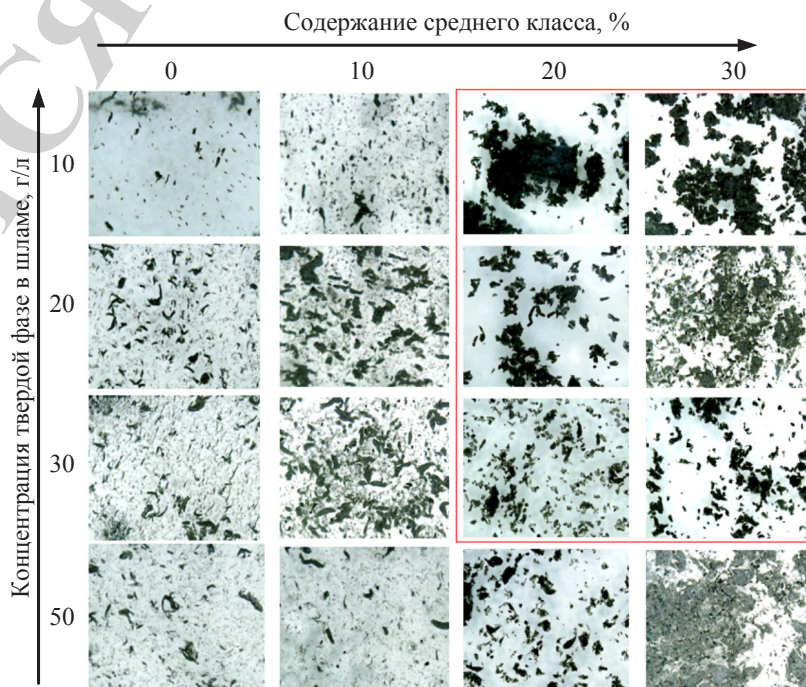


Рис. 4. Структуры флокул после механического воздействия при различной концентрации и доли среднего класса суспензий: стрелками показаны направления повышения прочности флокуляционных структур; выделенные фотографии – устойчивые агрегаты флокул с прозрачной жидкой фазой

Фотографии образованных при различной степени сгущения флокуляционных структур (рис. 5), подверженных механическому воздействию, показывают изменение (снижение) прочностных характеристик агрегатов при увеличении концентрации твердой фазы в объеме. Снижение прочности флокул может быть связано со следующими процессами, происходящими при сгущении шлама. Во-первых, во время сгущения происходит увеличение объема, занятого твердой фазой. Это приводит к увеличению вязкости жидкости за счет сил поверхностного натяжения и образованию разности давлений между жидкостью внутри флокул и снаружи. Это может приводить к изменению течения жидкости и при механическом воздействии создавать разность скоростей движения флокулы и омывающего ее потока жидкой фазы при разной степени сгущения.

Во-вторых, при сгущении сфлокулированных агрегатов происходит образование коагуляционных структур – установление контактов между частицами и их агрегатами. С ростом степени сгущения и слипанием флокул увеличивается и их масса, происходит уплотнение флокул, потеря находящейся в ней жидкости и разрушение флокул под действием их веса и осмотического давления в порах между агрегатами.

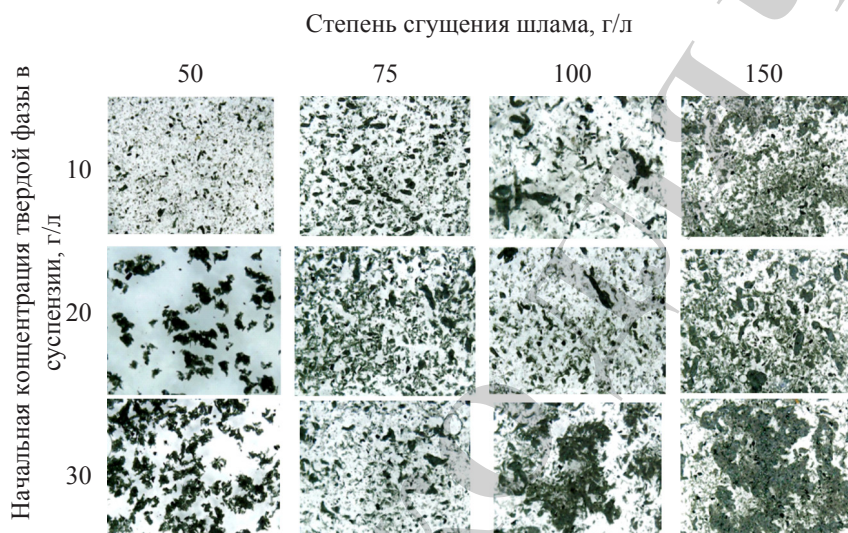


Рис. 5. Структуры флокул после механического воздействия при различной концентрации шлама и степени сгущения после флокуляции

В-третьих, с ростом степени сгущения флокул уменьшается объем окружающей флокулы жидкости. Поэтому при механическом воздействии на более сгущенный сфлокулированный шлам происходит более частое соударение и трение перемешивающихся флокул между собой, а также с поверхностью перемешивающего устройства и стенками емкости. Это вызывает большие сдвиговые напряжения на поверхности флокул, приводящие к их разрушению.

Таким образом, с увеличением степени сгущения увеличиваются псевдопластичные свойства сфлокулированных структур и уменьшается прочность флокул к механическому воздействию. Это позволяет рекомендовать транспортировку сфлокулированного шлама к обезжелезивающему оборудованию со степенью сгущения до 140–150 г/л.

## 7. Выводы

Исследование влияния способов ввода и типа флокулянта на прочность флокул позволили рекомендовать для флокуляции полидисперсного угольного шлама сочетание неионогенного и анионогенного флокулянта в соотношении 20:80 % соответственно.

Исследования влияния концентрации твердой фазы и ее дисперсного состава на эффективность флокулообразования показали, что наиболее прочные к механическим воздействиям агрегаты образуются при концентрации твердой фазы в шламе 10–30 г/дм<sup>3</sup> (наилучшие условия адсорбции флокулянта) и содержания среднего класса (размер частиц более 40 мкм) более 15–20 %.

Исследования влияния степени первичного сгущения сфлокулированного шлама на прочность флокул показали, что с ростом степени сгущения свыше 140–150 г/л уменьшается прочность агрегатов к механическим воздействиям.

## Література

1. 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.
2. Хмеленко, И. П. Анализ объемов, состава и способов переработки шламов углеобогатительных фабрик [Текст] / И. П. Хмеленко // Геотехническая механика. – 2009. – Вып. 82. – С. 176–181.
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.corraxan.com/Coalprep\\_2012\\_Paper.pdf](http://www.corraxan.com/Coalprep_2012_Paper.pdf)
4. Шкоп, А. А. Обезжелезивание 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
5. Sun, Y. Y. Application of Flocculant and Coagulant to Coal Slime Water [Text] / Y. Y. Sun, C. Y. Xu, R. C. Nie, J. H. Zheng // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 781-784. – P. 2170–2173. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.781-784.2170
6. Yoon, R.-H. Application of extended DLVO theory, IV [Text] / R.-H. Yoon, L. Mao // Journal of Colloid and Interface Science. – 1996. – Vol. 181, Issue 2. – P. 613–626. doi: 10.1006/jcis.1996.0419
7. Fellows, C. M. Insights into Bridging Flocculation [Text] / C. M. Fellows, W. O. S. Doherty // Macromolecular Symposia. – 2006. – Vol. 231, Issue 1. – P. 1–10. doi: 10.1002/masy.200590012

8. Баран, А. А. Полимерсодержащие дисперсные системы [Текст] / А. А. Баран. – Киев: Наукова думка, 1986. – 204 с.
9. La Mer, V. K. Filtration of colloidal dispersions flocculated by anionic and cationic polyelectrolytes [Text] / V. K. La Mer // Discussions of the Faraday Society. – 1966. – Vol. 42. – P. 248. doi: 10.1039/df9664200248
10. 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
11. 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
12. 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
13. Boylu, F. The effect of carboxymethyl cellulose (CMC) on the stability of coal-water slurries [Text] / F. Boylu, G. Atesok, H. Dincer // Fuel. – 2005. – Vol. 84, Issue 2-3. – P. 315–319. doi: 10.1016/j.fuel.2003.12.016
14. Гольберг, Г. Ю. Физико-химические проблемы флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения углей [Текст] / Г. Ю. Гольберг // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 346–348.
15. Sun, W. Study of Al(OH)<sub>3</sub>-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 информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 47–54.
17. Коновалова, Т. А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно-шламовых схем углеобогачительных фабрик [Текст] / Т. А. Коновалова, Г. Б. Векслер, А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 3, № 1 (19). – С. 5–10.
18. Heller, H. Anionic Polyacrylamide Polymers Effect on Rheological Behavior of Sodium-Montmorillonite Suspensions [Text] / H. Heller, R. Keren // Soil Science Society of America Journal. – 2002. – Vol. 66, Issue 1. – P. 19. doi: 10.2136/sssaj2002.0019
19. Макарова, Е. В. Влияние концентрации водорастворимых полимеров на реологические свойства водоугольных суспензий антрацита [Текст] / Е. В. Макарова, А. С. Макаров, Д. П. Савицкий, Н. И. Боровик // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 236–240.
20. Шкоп, А. А. Исследование путей интенсификации процесса обезвоживания полидисперсных суспензий [Текст] / А. А. Шкоп, М. А. Цейтлин, А. В. Шестопалов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 6, № 10 (84). – С. 35–40. doi: 10.15587/1729-4061.2016.86085
21. Shkop, A. A study of the floccul strength of polydisperse coal suspensions to mechanical influences [Text] / A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov, V. Raiko // EUREKA: Physics and Engineering. – 2017. – Issue 1. – P. 13–20. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00268