

УДК 622.79

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ ФЛОКУЛЯЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: gr_yu_g@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

На основе анализа литературных данных и с учетом результатов исследований показаны современное развитие и наиболее существенные проблемы теории флокуляции минеральных суспензий. Для повышения эффективности применения флокулянтов целесообразны дальнейшие исследования по обоснованию принципов выбора флокулянтов и их композиций, включая флокулянты, модифицированные различными функциональными группами, и с разветвленными макромолекулами, с учетом закономерностей адсорбции флокулянтов на поверхности минералов. В свете выявленных прочностных характеристик и закономерностей деструкции флокул показано, что для дальнейшего развития теории существенное значение имеет установление взаимосвязи этих параметров с гидродинамическим режимом, а также исследование рекомбинации флокул. Несомненный интерес представляет проблема определения малых концентраций флокулянтов как при изучении вопросов образования флокул, так и для выявления условий рационального применения флокулянтов в промышленности.

Теория флокуляции минеральных суспензий, механизм флокуляции, строение флокул, адсорбция полимеров, влажность флокуляционных структур, деструкция флокул, рекомбинация флокул, определение концентрации растворов флокулянтов в воде

DOI: 10.15372/FTPRPI20250313
EDN: SEXKBL

Флокулянты широко распространены в практике обогащения полезных ископаемых с середины XX в. Процессы с применением флокулянтов — неотъемлемая часть технологического комплекса предприятий по переработке минерального сырья, а также очистке сточных вод. Они существенно значимы для интенсификации разделения минеральных суспензий на твердую и жидкую фазу методами седиментации, фильтрования и центрифугирования. Режимы применения флокулянтов влияют на технологические показатели основных обогатительных процессов, качество концентрата и экологическую безопасность горно-обогатительных предприятий.

Одно из важнейших условий дальнейшего развития и совершенствования технологий с применением флокулянтов — развитие теории процессов образования и разрушения флокуляционных структур. Основы теории этого процесса заложены в 50–70-е годы XX в. [1–4].

Взаимодействие частиц твердой фазы и макромолекул полимера обусловлено притяжением электростатических, молекулярных и гидрофобных сил. Для частиц крупностью более 1 мкм важен конвективный массоперенос, для более мелких — броуновское движение. Макромолекулы закрепляются на поверхности частицы или в диффузной части двойного электрического слоя. Дальнейшее развитие теории заключается в выявлении новых закономерностей образования и разрушения флокуляционных структур, зависимости их характеристик от свойств исходных суспензий, флокулянтов и условий их взаимодействия [5–9]. До настоящего времени ряд аспектов образования и разрушения флокуляционных структур недостаточно выяснен. Поэтому важное условие интенсификации и совершенствования процессов разделения минеральных суспензий с применением флокулянтов — теоретические исследования для обнаружения ранее неизвестных закономерностей образования, функционирования и разрушения флокуляционных структур.

Цель настоящей работы — выявление существенных проблем дальнейшего развития теории флокуляции минеральных суспензий.

Развитие теории процессов взаимодействия минеральных частиц с флокулянтами можно направить на углубленное изучение следующих аспектов:

- выявление условий, обеспечивающих полное растворение флокулянтов в воде без деградации макромолекул;
- определение влияния молекулярной массы флокулянтов во взаимосвязи со строением макромолекул на эффективность процессов разделения твердой и жидкой фаз суспензий;
- установление влияния модифицированных полимеров на разделение твердой и жидкой фаз суспензий и обоснование областей применения флокулянтов с различными модифицирующими добавками;
- раскрытие условий эффективного использования флокулянтов с разветвленными макромолекулами;
- обнаружение различий строения флокул, образованных анионоактивными и катионоактивными флокулянтами;
- обоснование эффективных режимов применения композиций из двух и более флокулянтов различной природы;
- определение закономерностей и параметров деформации и разрушения флокул в динамических условиях;
- обоснование необходимости применения высокочувствительных методов для непрерывного нахождения концентрации флокулянтов в водной среде.

РАСТВОРЕНИЕ ФЛОКУЛЯНТОВ

Растворение флокулянтов в воде — сложный процесс, включающий следующие стадии: смачивание дисперсных частиц флокулянта водой с образованием на поверхности гидратного слоя; набухание (диффузное проникновение молекул воды в межмолекулярное пространство полимера с образованием геля); растворение полимера в воде или переход макромолекул в объем растворителя [10]. Максимальная допустимая частота вращения мешалки для приготовления раствора флокулянта с концентрацией 0.3 % зависит от конструкции мешалки и составляет для конической, трехлопастной и турбинной соответственно 12.0, 7.5 и 6.0 об./с. Превышение данных значений способствует разрушению макромолекул флокулянта. Для определения эффективности растворения флокулянта (однородности готового раствора) предложен метод, основанный на измерении показателя преломления лазерного луча.

Влияние времени растворения и созревания полученного раствора, температуры и ионного состава воды исследовано сравнительно мало. Рекомендации по рациональным концентрациям растворов флокулянтов C_f весьма приблизительны. Известно, что C_f желательно снижать с увеличением молекулярной массы флокулянта, так как при прочих равных условиях с ростом молекулярной массы возрастает вязкость раствора, что ослабляет эффективность растворения и способствует росту затрат энергии на транспортирование и дозирование раствора. Очевидно, что уменьшение C_f в случае высокой молекулярной массы обуславливает возрастание расхода воды для растворения, что увеличивает нагрузки на технологическое оборудование. Значения C_f для применения в промышленности для промежуточных растворов составляют 0.1–1.0 %, для рабочих — 0.01–0.10 % [11, 12]. Не вполне ясно, как определить оптимальные C_f для конкретных образцов флокулянтов с известной молекулярной массой с учетом особенностей технологических процессов, в которых используются эти флокулянты.

Весьма важно и перспективно проведение исследований по выявлению влияния перечисленных выше условий растворения флокулянтов на свойства получаемых растворов. Целесообразно дальнейшее развитие методов, позволяющих контролировать эффективность растворения флокулянтов.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ФЛОКУЛЯНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ

Важнейшие параметры, характеризующие свойства макромолекул флокулянтов, — молекулярная масса; доля и заряд функциональных групп; наличие привитых цепей; разветвленность макромолекулы. В настоящее время распространены неионогенные флокулянты на основе полиакриламида, анионоактивные — на основе частично гидролизованного полиакриламида. Применяются и неионогенные флокулянты (полиэтиленоксид). Молекулярная масса влияет на эффективность разделения суспензий (рис. 1). Существует тенденция роста скорости разделения твердой и жидкой фаз с увеличением молекулярной массы [13, 14]. В то же время сравнительно высокомолекулярные полимеры с молекулярной массой ≥ 18 млн кг/кмоль проявляют относительно низкую эффективность, обусловленную стерической стабилизацией [15].

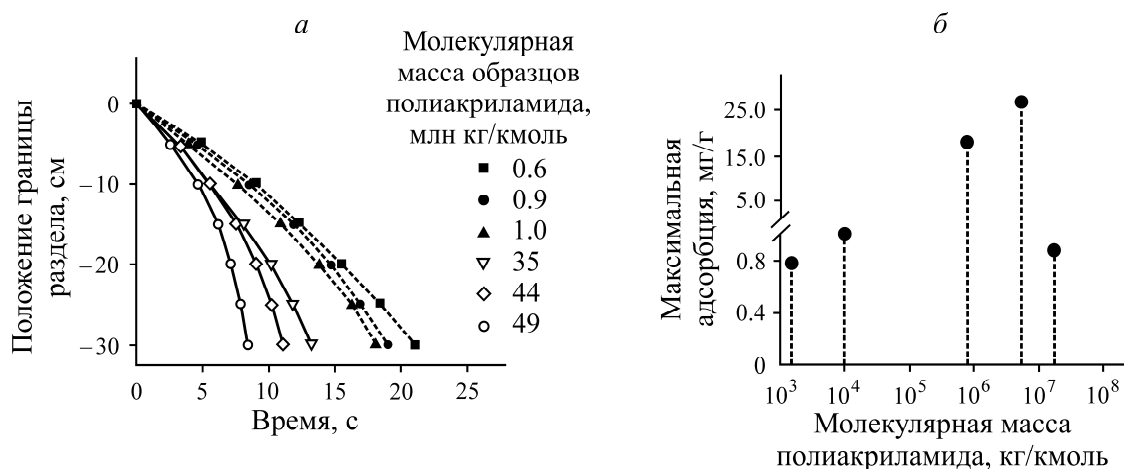


Рис. 1. Влияние молекулярной массы флокулянтов на разделение суспензий: а — кинетика осаждения твердой фазы суспензии каолина; б — адсорбция на каолине в зависимости от молекулярной массы [13, 15]

ВЛИЯНИЕ ПРИВИТЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП

Модифицирование серийно выпускаемых флокулянтов путем прививки различных функциональных групп осуществляется для повышения эффективности действия флокулянтов на определенные дисперсные системы. Модифицирование полиакриламида четвертичными аммониевыми основаниями позволяет проводить селективное отделение частиц угля и силикатных минералов [16]. Для повышения селективности процесса предлагается предварительная подача гексаметафосфата натрия, который пассивирует поверхность силикатов, что затрудняет адсорбцию на их поверхности указанного модифицированного полимера. В то же время макромолекулы этого полимера адсорбируются на угольных частицах, тем самым агрегируя их.

В [17] приведены данные по модифицированию полиакриламида диметиламином. Экспериментальные исследования на каолине показали, что по сравнению с полиакриламидом адсорбция модифицированного полимера больше на ~ 15 %, скорость осаждения твердой фазы — на 18–20 %. Есть сведения о модифицировании полиакриламида хитозаном [18]. В целом известные данные показывают увеличение эффективности действия флокулянтов в результате модифицирования их макромолекул. При этом возрастает себестоимость флокулянтов, поэтому для подтверждения целесообразности синтеза и использования таких полимеров в промышленных масштабах требуется технико-экономическая оценка. Перспективное направление развития теории флокуляции модифицированными производными полиакриламида — обоснование областей и условий применения указанных полимеров.

Применение разветвленных полимеров — сравнительно новое направление. Интерес к нему обусловлен тем, что такие полимеры, по сравнению с линейными, характеризуются большей долей эффективных заряженных групп и могут соединить мостиковыми связями больше частиц [19, 20]. По сравнению с полимерами линейного строения, синтез разветвленных полимеров и их растворение в воде представляются более сложными.

До настоящего времени остаются неясными вопросы об оптимальных диапазонах молекулярной массы флокулянтов для эффективной реализации процессов сгущения и обезвоживания суспензий конкретных минералов с известными свойствами, а также об эффективных условиях получения и применения флокулянтов с разветвленными макромолекулами. Это обуславливает целесообразность исследований по обоснованию схемы и принципов выбора флокулянтов и их комбинаций для эффективного разделения минеральных суспензий с известными свойствами. Для решения этой задачи необходимо изучение закономерностей адсорбции макромолекул флокулянтов на поверхности минеральных частиц.

Взаимное притяжение частиц твердой фазы и макромолекул полимеров вызвано силами молекулярного, гидрофобного и электростатического взаимодействия, а также образованием водородных связей [7, 8]. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить условия беспрепятственного взаимодействия минеральных частиц и макромолекул флокулянтов на основании расширенной теории ДЛФО (Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека) с учетом количества макромолекул на одну частицу заданного диаметра [9], что позволило обосновать возможность разделения некоторых минеральных систем, в том числе “гематит — кварц” и “уголь — алюмосиликаты” методом селективной флокуляции. Сведения [8, 15] дают основание полагать, что изотермы адсорбции флокулянтов на поверхности твердой фазы при концентрациях порядка нескольких десятков и сотен миллиграммов на литр можно описать уравнением Ленгмюра.

В качестве меры адсорбционного сродства полимера к минералу рассматривается адсорбция Γ . В [21] значение этого параметра при адсорбции полиакриламида возрастает от кварца к гематиту и магнетиту, причем с увеличением pH адсорбция полиакриламида на этих минералах имеет тенденцию к снижению (рис. 2).

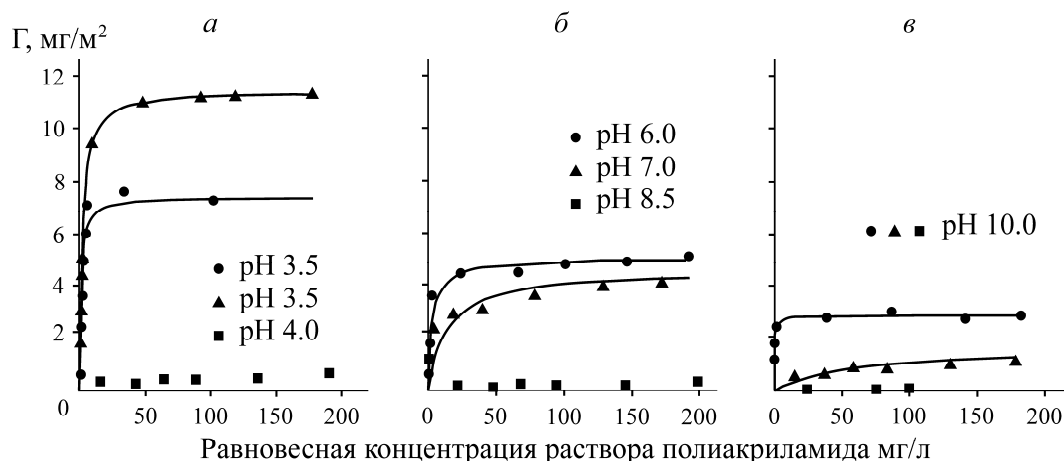


Рис. 2. Изотермы адсорбции полиакриламида на кварце (■), гематите (●) и магнетите (▲) при разных pH в растворе KNO_3 с концентрацией 10^{-3} моль/л в кислой (а), нейтральной (б) и щелочной среде (в)

Данные по адсорбции флокулянтов на разных минералах в зависимости от pH и ионного состава дисперсионной среды позволяют рационально выбрать флокулянты для суспензий с известными свойствами. Влияние температуры на действие флокулянтов изучено в [22]. Эффективность флокуляции частиц увеличивается с ростом температуры, что обусловлено снижением вязкости воды и увеличением скорости броуновского движения макромолекул флокулянта. Наибольшая скорость осаждения частиц отходов обогащения железных руд с применением флокулянта достигается при температуре $50-60^\circ\text{C}$ [23]. В то же время на действующих предприятиях по обогащению полезных ископаемых, использующих значительное количество технологической воды, нагрев суспензий, обрабатываемых флокулянтами, представляется экономически нецелесообразным. Поэтому в практике обогащения процессы с применением флокулянтов реализуют без нагрева.

Современные представления о строении флокулов основаны на результатах их исследований различными методами: оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии (с цифровой обработкой изображения); лазерной дифракции; седиментографии, а также путем компьютерного моделирования. Изучено влияние свойств флокулянтов, твердой и жидкой фаз минеральных суспензий, условий реализации процесса на свойства образующихся флокулов, включая форму флокулов, распределение их по крупности, взаимное расположение макромолекул и частиц, содержание влаги. Для описания строения флокулов распространена теория фракталов, согласно которой флокула первого порядка рассматривается как система из одинаковых сферических частиц, флокула второго порядка — из одинаковых сферических флокулов первого порядка и т. д. (рис. 3) [24]. Порядок флокулов влияет на свойства и структуру осадков, образующихся в процессах разделения суспензий. Изучена структура осадков, образованных индивидуальными частицами и флокулами. Удельное объемное сопротивление осадка α_0 (величина, обратная проницаемости) убывает в следующем ряду: индивидуальные частицы — флокулы первого порядка, получаемые применением индивидуальных флокулянтов, — флокулы второго порядка, получаемые последовательным применением двух флокулянтов различной природы [25].

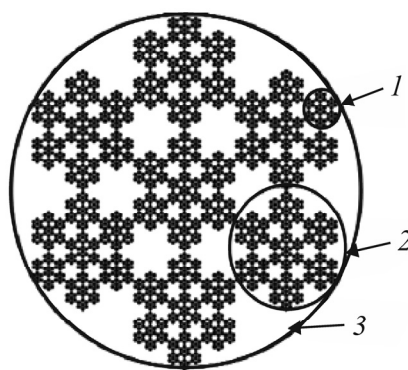


Рис. 3. Фрактальная структура сферической флоккулы третьего порядка: 1–3 — флоккулы первого, второго и третьего порядков [24]

В случае нейтрализационной флокуляции, в отличие от мостиковой, макромолекулы полимера располагаются непосредственно на поверхности частиц, знак заряда которых противоположен знаку заряда функциональных групп данного полимера, что приводит к уменьшению поверхностного заряда [8, 26, 27]. Мостиковые связи между частицами не образуются, а агрегирование частиц происходит за счет их самопроизвольного сближения и образования контактов, по-видимому коагуляционных, без участия макромолекул.

Экспериментальные исследования показали, что для частиц крупностью менее 1 мкм при флокуляции, происходящей по перикинетическому варианту, образуются агрегаты, содержащие одну макромолекулу и несколько десятков (сотен) частиц [9, 28].

При анализе строения и свойств флокул существенное значение имеет то обстоятельство, что в пространстве между частицами иммобилизована дисперсионная среда. Влияние свойств флокулянтов, их расхода, pH среды на объем иммобилизованной дисперсионной среды до настоящего времени не исследовано. Этот эффект влияет на влажность осадков W , получаемых при обезвоживании суспензий. Известно, что зависимость W от расхода флокулянта d носит экстремальный характер [29]: с увеличением d значение W сначала уменьшается, а затем возрастает. Это связано с действием конкурирующих факторов: с одной стороны, возрастание значения d приводит к увеличению диаметра флокул и, соответственно, к снижению α_0 ; в результате возрастает диаметр пор осадка, что повышает скорость механического обезвоживания. С другой стороны, увеличивается объем воды в пространстве между частицами флокулы. Очевидно, что для технологических процессов, предусматривающих операцию термической сушки после обезвоживания суспензий, повышение влажности осадков весьма нежелательно, так как приводит к увеличению расхода топлива и количества вредных выбросов в окружающую среду.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных авторами настоящей работы, показали, что удаление некоторой части влаги из флокуляционных структур возможно за счет неразрушающих механических воздействий [9]. Этот процесс — механический синерезис флокул — заключается в вытеснении из агрегата частиц иммобилизованной влаги под действием неуравновешенной системы сил, что происходит при течении суспензии, обработанной флокулянтами, по криволинейной траектории [9, 30]. В результате достигается снижение значения W : например, для суспензии угольного флотационного концентрата снижение влажности составляло примерно 1.5–2.0 % (абс.). При этом снижается α_0 , что обусловлено тем, что форма флокул за счет окатывания приближается к сферической.

В настоящее время сравнительно мало изучено различие строения флокул, полученных с применением анионоактивных и катионоактивных флокулянтов. Согласно [8, 31], в случае отрицательного заряда поверхности частиц макромолекула катионоактивного флокулянта располагается непосредственно вблизи поверхности, а макромолекула анионоактивного флокулянта — на большем расстоянии, вероятнее всего, в диффузной части двойного электрического слоя, за счет притяжения отрицательно заряженных групп макромолекулы к противоионам, преимущественно многозарядным (рис. 4).

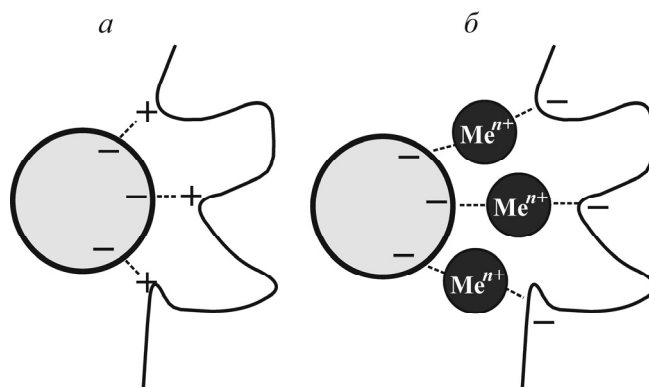


Рис. 4. Схема взаимодействия катионоактивных (а) и анионоактивных (б) флокулянтов с отрицательно заряженными минеральными частицами [8]

Эти сведения, наряду с полученными в настоящей работе результатами, дают основания полагать, что при прочих равных условиях агрегаты, образованные катионоактивным флокулянтом, характеризуются меньшими диаметрами, более высокой плотностью и меньшей влажностью по сравнению с анионоактивным. Для подтверждения данного предположения требуются специальные теоретические и экспериментальные исследования. Интерес представляет выявление закономерностей строения агрегатов, полученных применением композиций из двух и более флокулянтов различной природы, так как это позволит обосновать эффективные режимы разделения суспензий композициями флокулянтов. Согласно [25], могут образовываться агрегаты второго и третьего порядков, причем не исключен синергизм действия реагентов. Для уточнения требуются специальные исследования.

Деструкция флокул возникает при развитом турбулентном режиме течения суспензии, в результате флокулы распадаются на сравнительно крупные фрагменты, в меньшей степени — на отдельные частицы. Это неблагоприятно для последующих процессов сгущения и обезвоживания ввиду уменьшения скорости разделения твердой и жидкой фаз. Современная теория рассматривает механизмы и условия разрушения флокул с точки зрения особенностей их строения и гидродинамических параметров течения суспензий.

На рис. 5 приведена схема разрушения флокуляционных структур под действием растяжения, сдвига и разрыва макромолекулы полимера [32]. Кроме того, отмечается поверхностная эрозия флокул [33]. Механизм разрушения флокул под действием сдвига, согласно [34], заключается в том, что последовательно происходят процессы: деформации агрегатов (вытягивание по направлению действия силы сдвига); отрыв функциональных групп макромолекул полимеров от поверхности частиц; распад агрегатов на более мелкие. Данные [35, 36] указывают на то, что при увеличении скорости потока до некоторого значения и степени его турбулентности возрастает эффективность процессов образования флокул, но в дальнейшем начинает преобла-

дать их деструкция. Это дает основание предположить возможность существования гидродинамического режима течения суспензий, обеспечивающего минимальную деструкцию флокул. Согласно [35], с увеличением частоты вращения мешалки крупность флокул уменьшается; при постоянной частоте вращения с течением времени крупность флокул сначала возрастает, затем постепенно уменьшается. Наибольшая крупность флокул при перемешивании с применением вращающихся мешалок достигается при частоте вращения мешалки ~ 600 об./мин [37]. При прочих равных условиях коническая мешалка обеспечивает более благоприятные условия для сохранения флокул по сравнению с турбинной и лопастной.

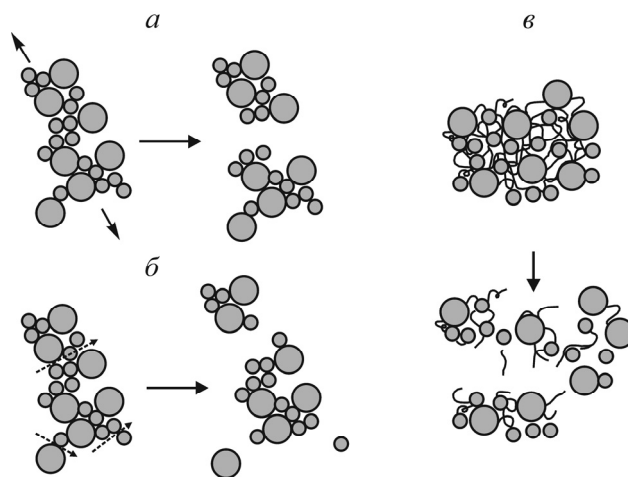


Рис. 5. Механизмы разрушения флокуляционных структур: *a* — растяжение; *б* — сдвиг; *в* — разрыв макромолекул полимера

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в ИПКОН РАН, показано, что в условиях сдвиговой деформации флокуляционных структур решающим является отрыв макромолекул от частиц в состоянии предельного напряжения флокул [9, 38]. В этом состоянии количество точек контакта макромолекулы флокулянта с каждой частицей равно 1, угол сдвига близок к 90° . Определено предельное динамическое напряжение сдвига флокуляционных структур, которое прямо пропорционально расходу флокулянта в интервале 25–300 г/т и равно 0.5–3.0 Па. На основании этого и с учетом закономерностей возникновения сдвиговых усилий при неизотропном турбулентном течении суспензий выведены уравнения, позволяющие рассчитать максимальную допустимую скорость течения суспензий, обеспечивающую сохранность флокуляционных структур. Указанные закономерности определены только для течения суспензий по прямолинейной траектории. Важным является развитие теоретических представлений о рациональных режимах течения суспензий, обработанных флокулянтами, по криволинейным траекториям.

Рекомбинация флокул изучена сравнительно мало. Несомненный интерес представляет выявление закономерностей этого процесса, включая влияние гидродинамического режима на кинетику, степень рекомбинации и изменение крупности флокул.

Наиболее значимые проблемы теории деструкции флокул:

- аналитический расчет параметров гидродинамических режимов течения суспензий при перемешивании с флокулянтами и последующем транспортировании суспензий, обеспечивающих максимальную эффективность перемешивания и сохранность флокул при движении по криволинейным траекториям;

- влияние параметров гидродинамического режима на рекомбинацию флокул;
- определение прочностных характеристик флокуляционных структур в зависимости от их крупности и условий образования, включая случаи применения двух и более флокулянтов различной природы.

Особый интерес вызывает проблема определения малых концентраций флокулянтов как при изучении вопросов образования флокул, так и при осуществлении условий рационального применения флокулянтов в промышленных условиях.

Проблема непрерывного контроля концентрации флокулянтов в технологических водах обогатительных предприятий обусловлена необходимостью оптимизации расходов флокулянтов в промышленных условиях, а также предотвращения загрязнения природных водоемов продуктами разложения полиакриламида, в том числе акриламидом, который, по сравнению с полимером, более токсичен. В настоящей работе рассмотрен один из существенных аспектов этой проблемы — совершенствование высокочувствительных методов для определения малых концентраций флокулянтов в воде, что позволит создать условия для непрерывного контроля этого параметра и возможности для автоматического регулирования.

Перспективным представляется УФ-спектрофотометрический метод, характеризующийся сравнительно высокой чувствительностью. Исследования, выполненные в Карлтонском университете (Канада), показали, что возможно определить концентрацию полиакриламидного флокулянта в воде ~ 0.05 мг/л при длине волны ~ 190 нм [39]. Однако указанный порог чувствительности представляется недостаточным для технологий обогащения минерального сырья, так как значительное влияние флокулянтов на технологические процессы может проявиться и при более низких концентрациях (порядка нескольких мкг/л). С этой точки зрения представляет интерес повышение чувствительности спектрофотометрических методов не только в УФ-, но и в видимой области спектра. В ИПКОН РАН и РХТУ им. Д. И. Менделеева с участием авторов настоящей работы теоретически исследованы возможности взаимодействия флокулянта с заданной фазой для повышения чувствительности указанного метода и обнаружения таких изменений оптических свойств дисперсной системы, включающей частицы дисперсной фазы и макромолекулы, которые позволили получить сигнал, фиксируемый измерительной системой [40]. Установлено, что при применении в качестве индикаторной системы суспензии пигмента с крупностью частиц $1 - 10$ мкм с концентрацией твердой фазы ~ 10 кг/м³ расчетное значение порога чувствительности при нахождении концентрации флокулянта составит ~ 10 мг/м³ (мкг/л). Это позволяет обосновать непрерывный контроль концентрации флокулянтов в воде на уровне 10 мг/м³.

ВЫВОДЫ

В настоящее время существует развитая теория, описывающая образование флокуляционных структур, их свойства в статических и динамических условиях, а также изменение характеристик в динамических условиях. Для дальнейшего развития теории и практики флокуляции суспензий наиболее существенны следующие аспекты:

— обоснование принципов выбора флокулянтов и их композиций, наиболее эффективных для разделения минеральных суспензий с известными свойствами, включая возможность применения флокулянтов, модифицированных различными функциональными группами, и с разветвленными макромолекулами;

— определение параметров эффективного режима растворения флокулянтов в воде для получения однородных растворов без деструкции макромолекул;

- выявление различий в структуре флокулов, полученных с применением анионоактивных и катионоактивных флокулянтов;
- определение прочностных характеристик флокуляционных структур в зависимости от их крупности и условий образования;
- выявление параметров гидродинамических режимов течения суспензий при перемешивании с флокулянтами и последующем транспортировании суспензий, обеспечивающих максимальную эффективность образования и сохранность флокулов при течении по криволинейным траекториям, в том числе с учетом закономерностей рекомбинации флокулов;
- развитие высокочувствительных методов определения малых концентраций флокулянтов (порядка нескольких мг/м³) в технологических водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **La Mer V. K. and Smellie Jr. R. H.** Theory of flocculation, subsidence and refiltration rates of colloidal dispersions flocculated by polyelectrolites, *Clays and Clay Minerals: Proc. of the Ninth National Conf. on Clays and Clay Minerals*, Lafayette, Indiana, Oxford, London, N. Y., Paris, Pergamon Press, 1962. — P. 295–314.
2. **Healy T. W. and La Mer V. K.** The energetics of flocculation and redispersion by polymers, *J. Coll. Sci.*, 1964, Vol. 19, No. 4. — P. 323–332.
3. **Борц М. А.** Теория и технологические факторы флокуляции угольных суспензий: дис. ... д-ра техн. наук. — М., 1972. — 345 с.
4. **Якубович И. А.** Флокуляция пульпы и синтетические флокулянты полиакриламидного типа // *Атомная энергия*. — 1960. — Т. 8. — Вып. 6. — С. 535–541.
5. **Небера В. П.** Флокуляция минеральных суспензий. — М.: Недра, 1983. — 288 с.
6. **Gregory J. and O'Melia C. R.** Fundamentals of flocculation, *Critical Rev. Env. Control*, 1989, Vol. 19, No. 3. — P. 185–230.
7. **Hogg R.** Bridging flocculation by polymers, *KONA Powder Particle J.*, 2013, No. 30. — P. 3–14.
8. **Hurycz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., and Matuszak M.** A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives, *Sci. Total Env.*, 2020, Vol. 820. — 153328.
9. **Гольберг Г. Ю.** Развитие теории образования и разрушения флокуляционных структур в процессах разделения суспензий тонкодисперсных продуктов обогащения углей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2019. — 46 с.
10. **Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш.** К выбору типа и частоты вращения мешалки для эффективного перемешивания флокулянтов в воде // *Вода и экология: проблемы и решения*. — 2020. — № 2 (82). — С. 27–36.
11. **Техника и технология обогащения углей: справочное руководство** под ред. В. А. Чантурия, А. Р. Молявко. — М.: Наука, 1995. — 622 с.
12. **Антипенко Л. А.** Новые подходы к проектированию современных углеобогатительных фабрик // *Уголь*. — 2020. — № 7 (1132). — С. 82–87.
13. **Sonker E., Tiwari R., Adhikary P., Kumar K., and Krishnamoorthi S.** Preparation of ultra-high-molecular-weight polyacrylamide by vertical solution polymerization technique, *Polymer Eng. Sci.*, 2019, Vol. 59, No. 6. — P. 175–1181.
14. **The coal handbook.** Towards cleaner production. V. 1: Coal production. Ed. by Dave Osborne, Philadelphia, Woodhead Publish. Limited, 2013. — 755 p.

15. **Byung J. L. and Schlautman M. A.** Effects of polymer molecular weight on adsorption and flocculation in aqueous kaolinite suspensions dosed with nonionic polyacrylamides, *Water*, 2015, No. 7. — P. 5896–5909.
16. **Wenjie Zou, Lu Gong, Jun Huang, Zhijun Zhang, Chunbao Sun, and Hongbo Zeng.** Adsorption of hydrophobically modified polyacrylamide P(AM-NaAAC16DMAAC) on model coal and clay surfaces and the effect on selective flocculation of fine coal, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 142, No. 3. — 105887.
17. **Воробьев П. Д., Крутько Н. П., Чередниченко Д. В., Воробьева Е. В., Буча С. В., Липай Ю. В.** Адсорбционные и флокулирующие свойства модифицированного полиакриламида в водных дисперсиях каолина // *Весті Національної академії наук України. Серія хімічних наук*. — 2022. — Т. 58. — № 3. — С. 273–279.
18. **Ульрих Е. В., Баркова А. С.** Использование флокулянтов для очистки сточных вод // *Трансформация экосистем*. — 2023. — Т. 6. — № 1. — С. 168–187.
19. **Lim V. H., Yamashita Y., Ogawa K., and Adachi Y.** Comparison of cationic flocculants with different branching structure for the flocculation of negatively charged particles coexisting with humic substances, *J. Env. Chem. Eng.*, 2022, Vol. 10. — 108478.
20. **Weimin Sun, Guangcheng Zhang, Ling Pan, Helin Li, and Aihua Shi.** Synthesis, characterization, and flocculation properties of branched cationic polyacrylamide, *Int. J. Polymer Sci.*, 2013, No. 5. — 397027.
21. **Khandaker S., Willott J. D., Webber G. B., and Wanless E. J.** Adsorption of polyacrylamides on mineral oxides: Effect of solution pH and polymer molecular weight, *Miner. Eng.*, 2024, Vol. 206. — 108547.
22. **Fitzpatrick C. S. B., Fradin E., and Gregory J.** Temperature effects on flocculation, using different coagulants, *Water Sci. Technol.*, 2004, Vol. 50, No. 12. — P. 171–175.
23. **Fusheng Niu, Hongmei Zhang, Jinxia Zhang, and Xiaodong Yu.** Temperature variation characteristics and model optimization of flocculation sedimentation of overflow ultra-fine iron tailings, *Minerals*, 2022, Vol. 12, No. 5. — 643.
24. **Gorczyca B. and Ganczarczyk J.** Flow rates through alum coagulation and activated sludge flocs, *Water Qual. Res. J. Canada*, 2002, Vol. 37, No. 2. — P. 389–398.
25. **Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю.** Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов // *Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова*. — 2024. — Т. 22. — № 2. — С. 58–70.
26. **Glover S. M., Yan Y. D., Jameson G. J., and Biggs S.** Polymer molecular weight and mixing effects on floc compressibility and filterability, 6th World Congress of Chem. Eng. Melbourne, 2001.
27. **Bharti S.** A critical review on flocculants and flocculation, *Non-Metallic Material Sci.*, 2019, Vol. 1, No. 1. — P. 11–21.
28. **Li Feng, Huaili Zheng, Baoyu Gao, Shixin Zhang, Chuanliang Zhao, Yuhao Zhou, and Bincheng Xu.** Fabricating an anionic polyacrylamide (APAM) with an anionic block structure for high turbidity water separation and purification, *Royal Soc. Chem. Adv.*, 2017, No. 7. — P. 28918–28930.
29. **Tao D., Groppo J. G., and Parekh B. K.** Enhanced ultrafine coal dewatering using flocculation filtration processes, *Miner. Eng.*, 2000, Vol. 13, No. 2. — P. 163–171.
30. **Walaszek W. and Ay P.** Extended interpretation of the structural attributes of pellet flocs in pelleting flocculation, *Miner. Eng.*, 2006, Vol. 19, No. 13. — P. 1397–1400.
31. **Shakeel A., Safar Z., Ibanez M., van Paassen L., and Chassagne C.** Flocculation of clay suspensions by anionic and cationic polyelectrolytes: A systematic analysis, *Minerals*, 2020, Vol. 10, No. 11. — 999.
32. **Zhirui Deng, Dong Huang, Qing He, and Claire Chassagne.** Review of the action of organic matter on mineral sediment flocculation, *Frontiers in Earth Sci.*, 2022, No. 10. — 965919.

33. **Haiyang Zhang, Lin Yang, Xiaomiao Zang, Shaozhe Cheng, and Xuezhi Zhang.** Effect of shear rate on floc characteristics and concentration factors for the harvesting of *Chlorella vulgaris* using coagulation-flocculation-sedimentation, *Sci. Total Env.*, 2019, Vol. 688. — P. 811–817.
34. **Liu S. X. and Glasgow L. A.** Aggregate disintegration in turbulent jets, *Water, Air, Soil Pollution*, 1997, Vol. 95, No. 1–4. — P. 257–275.
35. **Spicer P. T., Keller W., and Pratsinis S. E.** The effect of impeller type on floc size and structure during shear-induced flocculation, *J. Coll. Interface Sci.*, 1996, Vol. 184. — P. 112–122.
36. **Hyunseop Lee and Chongyoun Kim.** Experimental study on reversible formation of 2D flocs from plate-like particles dispersed in Newtonian fluid under torsional flow, *Colloids Surfaces A*, 2018, Vol. 548. — P. 70–84.
37. **Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш.** Интенсификация процессов сгущения при обезвоживании пульпы путем эффективного смешивания суспензий с растворами флокулянтов // *Цв. металлы*. — 2022. — № 6. — С. 24–30.
38. **Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю.** Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 3. — С. 106–112.
39. **Al Momani F. A. and Ormeci B.** Measurement of polyacrylamide polymers in water and wastewater using an in-line UV-vis spectrophotometer, *J. Env. Chem. Eng.*, 2014, No. 2. — P. 765–772.
40. **Лавриненко А. А., Кунилова И. В., Гольберг Г. Ю., Резчикова П. С., Комарова С. Г.** Теоретическое обоснование способа измерения концентрации флокулянтов в технологических водах обогатительных фабрик // *Проблемы освоения недр глазами молодых в XXI в.* — М.: ИПКОН РАН, 2021. — С. 252–255.

Поступила в редакцию 15/IV 2025

После доработки 12/V 2025

Принята к публикации 16/V 2025