

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД

Абуходиров Элёр Абдулбори угли, Валиева Ноила Ренатовна,
Абдуллаева Феруза Икрамжоновна

Наманганского государственного технического университета, Республика
Узбекистан, г. Наманган

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена рассмотрению физико-химических особенностей и технологических аспектов применения полимерных флокулянтов в процессах очистки природных и сточных вод.

Ключевые слова: полимерные флокулянты, полиакриламид, флокуляция, физико-химические факторы, pH, ионная сила, мостиковый механизм, очистка сточных вод.

PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS OF FLOTATION PROCESSES FOR TREATMENT OF NATURAL AND WASTE WATER

Abukodirov Elyor Abdulbori ugli, Valieva Noila Renatovna, Abdullaeva Feruza Ikromzhonovna

Namangan State Technical University, Republic of Uzbekistan, Namangan

ABSTRACT

The article presents an overview of the physicochemical features and technological aspects of using polymer flocculants in the treatment of natural and wastewater.

Keywords: polymer flocculants, polyacrylamide, flocculation, physicochemical factors, pH, ionic strength, bridging mechanism, wastewater treatment.

Введение

Интенсивное развитие промышленности, сельского хозяйства и урбанизация сопровождаются увеличением объёмов сточных вод, содержащих широкий спектр загрязняющих веществ. В состав таких вод входят взвешенные и коллоидные частицы минерального и органического происхождения, нефтепродукты, поверхностно-активные вещества, кислоты, щёлочи, фенолы, пестициды, соли тяжёлых металлов, соединения азота и фосфора. Накопление этих веществ в водных экосистемах приводит к ухудшению качества природных вод, эвтрофикации, токсическому воздействию на гидробионтов и повышению санитарно-гигиенических рисков для человека. Системы водоочистки формируются как многостадийные технологические схемы, где первичное удаление взвешенных и коллоидных частиц является ключевым этапом. Наиболее устойчивыми и трудными для удаления являются частицы размером от 1 нм до 1 мкм, обладающие высоким удельным зарядом и способностью к коллоидной стабилизации за счёт электрохимических и

гидратационных эффектов. Их устойчивость в водных средах определяется совокупным влиянием pH, ионной силы, природы электролитов, жёсткости и температуры.

Одним из наиболее эффективных способов осаждения таких дисперсий является флокуляция – процесс укрупнения частиц под действием высокомолекулярных реагентов, способных формировать межчастичные связи. Среди синтетических флокулянтов особое место занимают полиакриламид (ПАА) и его сополимеры, обеспечивающие высокую эффективность при малых дозах и технологическую гибкость применения. Благодаря регулируемой молекулярной массе, зарядовой плотности и архитектуре цепи, ПАА способен действовать в широком диапазоне гидрохимических условий и типов загрязнений. В то же время эффективность флокуляции полиакриламидом существенно зависит от физико-химических параметров среды и гидродинамики процесса. Изменение pH и ионной силы влияет на ионизацию функциональных групп полимера и ζ -потенциал частиц, а интенсивность перемешивания определяет частоту столкновений и устойчивость образующихся флоков. Несоблюдение оптимальных условий ведёт к дестабилизации системы, передозировке реагента или вторичной стабилизации мелких агрегатов.

Флокуляция определяется соотношением притяжения и отталкивания между частицами и частотой их эффективных столкновений. Устойчивость дисперсий поддерживают электростатическое отталкивание двойного слоя, гидратационные и стерические барьеры; ван-дер-Ваальсово притяжение доминирует на малых расстояниях. Термически её описывают высотой энергетического барьера и профилем потенциальной энергии, кинетически – переносом частиц диффузией, сдвигом и седиментацией, а также вероятностью слипания. Ключевые параметры среды: pH, ионная сила, состав электролитов, температура, ζ -потенциал, дисперсность и концентрация взвеси [1].

При добавлении электролитов сжимается двойной слой, снижается модуль ζ -потенциала и электростатический барьер, что облегчает сближение; критическая концентрация коагуляции резко падает с ростом валентности противоиона (правило Шульце–Харди). Избыточная солесодержательность меняет гидратацию ионогенных групп и смещает оптимум дозы флокулянта и pH. Жёсткость воды (Ca^{2+} , Mg^{2+}) экранирует карбоксильные группы, формирует поверхностные комплексы и влияет на растворимость и конформацию анионных макромолекул [1].

Полимерная флокуляция реализуется сочетанием механизмов. Мостиковый режим возникает при частичной адсорбции длинной цепи на нескольких частицах; эффективность растёт с молекулярной массой и длиной свободных сегментов и падает при передозе из-за сплошного покрытия и стерического экранирования. Зарядовая компенсация снижает модуль ζ -потенциала до области слабой устойчивости; при инверсии возможна вторичная стабилизация мелких агрегатов. Патч-механизм обусловлен неоднородной адсорбцией и локальными участками противоположного заряда.

В присутствии коагулянтов реализуется свип-флокуляция, а в много компонентных средах – деплекция за счёт осмотического градиента [2].

Режим задают строение и параметры полимера. Для анионных сополимеров акриламида и метакриловой кислоты степень нейтрализации управляет зарядовой плотностью и радиусом клубка, определяя толщину адсорбционного слоя и способность к мостикованию. Рост молекулярной массы увеличивает прочность флоков, но повышает вязкость и чувствительность к сдвигу и усложняет распределение на стадии быстрого смешения. Архитектура цепи (линейная, гребенчатая, слабосшитая) балансирует адсорбцию, подвижность и стерическую стабилизацию. Функциональные группы задают специфическую адсорбцию и комплексообразование с минералами, ионами металлов, красителями и ПАВ [3].

Гидрохимия среды задаёт ионное состояние поверхности частиц и полимера, тем самым смешая оптимальные дозы и область pH. В кислой зоне карбоксильные группы анионных сополимеров частично протонированы, цепи компактны и мостиковый механизм ослаблен; при нейтральном и слабощелочном pH ионизация возрастает, цепи раскрываются и повышается вероятность многоточечной адсорбции. Ионная сила действует двояко: экранирование облегчает первичное сближение и адсорбцию, но избыток соли уплотняет конформацию цепей и сокращает эффективную длину мостиков. Растворённая органика и ПАВ конкурируют за активные центры, ухудшая укрупнение; помогает предварительная коагуляция и корректировка очередности ввода реагентов [4].

Адсорбция полимеров определяется балансом энталпийных взаимодействий с поверхностью и энтропийных потерь гибкости цепи. Изотермы часто описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, для полидисперсных систем характерны многоступенчатые кривые и гистерезис десорбции. На практике существенны предыстория поверхности, ранее введённые коагулянты и конкурирующие анионы и органика, которые меняют доступность центров и требуемую дозу.

Преобладающий механизм идентифицируют по динамике ζ -потенциала с дозой, форме дозозависимости остаточной мутности (минимум при зарядовой компенсации, плато при мостиковании), морфологии и прочности флоков в микроскопии и сдвиговых тестах. Чувствительность к ионной силе помогает разделить вклад электростатики: при мостиковании умеренный рост солесодержания обычно снижает оптимальную дозу, при доминировании зарядовой нейтрализации ключевой фактор – валентность противоионов [5].

Основные риски связаны с передозировкой полимера и вторичной стабилизацией мелких агрегатов, избыточно высокой молекулярной массой, затрудняющей растворение и распределение, а также низкой температурой, повышающей вязкость и замедляющей кинетику. В схемах коагулянт плюс флокулянт критична правильная последовательность и точки ввода, иначе полимер преждевременно фиксируется на гидроксидных фазах. Для сополимеров акриламида и метакриловой кислоты оптимальные условия

обычно достигаются при средней степени нейтрализации, умеренной ионной силе и двухступенчатом перемешивании, что обеспечивает быстрое укрупнение, низкую остаточную мутность и устойчивый режим осветления и фильтрации [5].

Мостиковая флокуляция реализуется, когда одна макромолекула адсорбируется на нескольких частицах, а незакреплённые сегменты образуют межчастичные связи. Критично неполное покрытие: нужны петли и хвосты, достигающие соседних частиц; при сплошной адсорбции цепи лежат ковром, мостики не формируются. Поэтому механизм работает в узком окне доз: ниже порога контактов мостиков нет, при передозе они подавляются.

Кинетика включает перенос цепей к поверхности, первичную фиксацию на активных центрах, конформационную перестройку и диффузионный поиск соседних частиц свободными сегментами. Вязкость и размер гидродинамического клубка задают время переноса; размер частиц и поле скоростей мешалки частоту эффективных сближений. Практически разделяют режимы: быстрое смешение для равномерного распределения полимера и мягкое для роста флоков без разрушения.

Конформация у поверхности описывается долями поездов, петель и хвостов. На слабонеоднородных подложках больше петель и хвостов, что повышает способность к мостикованию, но снижает прочность контакта; на сильно аффинных – растёт доля поездов и уменьшается число свободных сегментов. Баланс регулируют степенью ионизации, ионной силой и присутствием многовалентных ионов, экранирующих заряд и меняющих структуру приповерхностного слоя.

Молекулярная масса определяет длину потенциального моста и число контактных точек: рост массы увеличивает размер и прочность флоков, но повышает вязкость и чувствительность к сдвигу. Полидисперсность даёт смешанный режим: длинные фракции инициируют укрупнение, средние «достраивают» структуру, короткие экранируют поверхность; чрезмерно широкий состав частично «отравляет» адсорбцию. На практике применяют двухступенчатую подачу доз: малая стартовая доза для зародышевых мостиков и корректирующая добавка до целевого размера флоков.

Гидрохимия напрямую влияет на протяжённость свободных сегментов. Повышение ионной силы компактирует заряжённые цепи и сокращает эффективную длину мостиков, но одновременно облегчает первичное сближение; существует оптимум солесодержания. Смещение pH меняет ионизацию функциональных групп, а значит аффинность к поверхности и конфигурацию цепей; возле изоэлектрических состояний частиц мостики формируются легче, но возрастает риск хрупких переукрупнённых структур.

Конкурентная адсорбция ПАВ, природной органики и низкомолекулярных электролитов снижает доступность центров и число закрепляющихся сегментов. Это компенсируют предварительной коагуляцией, изменением очередности ввода реагентов и увеличением времени быстрого смешения для равномерного распределения полимера.

Механическая устойчивость мостиков определяется числом контактных узлов, гибкостью цепи и скоростью релаксации. Высокие сдвиговые напряжения разрушают длинные и слабозакреплённые мостики, уменьшая размер флоков и повышая остаточную мутность. Слабая сшивка или гребенчатая архитектура повышают сдвигостойкость, однако чрезмерная жёсткость ухудшает растворение и увеличивает время набухания.

Признаки мостикового режима: рост размера агрегатов без выраженного минимума ζ -потенциала, плато остаточной мутности в области оптимума дозы и характерная пористая, разветвлённая морфология флоков; сдвиговые тесты показывают ступенчатое разрушение и неполное восстановление. Для анионных сополимеров акриламида целесообразны средняя молекулярная масса, умеренная ионная сила и двухступенчатое смешение, что обеспечивает быстрый рост устойчивых флоков при экономичных дозах.

Заключение

Как показывают литературные данные, флокуляция полиакриламидом и его сополимерами является одним из наиболее эффективных методов осветления и разделения дисперсных систем при очистке природных и сточных вод. Эффективность процесса определяется совокупностью факторов — строением и молекулярными характеристиками полимера, pH, ионной силой, жёсткостью воды и гидродинамическими условиями перемешивания.

Поли(акриламид) и его сополимеры обеспечивают укрупнение частиц за счёт мостикового и зарядового механизмов. Наилучшие результаты достигаются при средней молекулярной массе, умеренной ионной силе и рациональном дозировании реагента. Нарушение этих условий приводит к вторичной стабилизации дисперсий и снижению эффективности осветления.

Полимерные флокулянты, по данным различных исследований, превосходят традиционные коагулянты по технологичности и экономичности. Перспективным направлением является создание экологически безопасных гибридных систем на основе природных полимеров, сочетающих высокую флокуляционную активность, сдвигостойкость и биоразлагаемость.

Таким образом, анализ литературных источников подтверждает ключевую роль полиакриламида и его сополимеров в интенсификации процессов водоочистки и демонстрирует, что учёт физико-химических параметров среды и гидродинамических условий обеспечивает повышение эффективности флокуляции и стабильное качество очистки водных систем.

Использованная литература

1. Молоканов Д.А. Комплексный подход к очистке сточных вод // Экология производства. - 2011. - № 5.- С. 79-81.
2. Кузнецов Ю.Н. Новая технология очистки промышленных сточных вод // Энергия: экономика, техника, экология. - 2008. - № 1.- С. 52-62.
3. Amonova M.M, Ravshanov K.A. Polymeric composition for purification of wastewater from various impurities in textile industry // Journal of chemistry and chemical technology. Moscow. - 2019. - № 10. Vol. 62. - № 10. – Р. 147-153.

4. Гандурина Л. В. Очистка сточных вод с применением синтетических флокулянтов. Монография. М.: «ДАР/ВОДГЕО» 2007. - 198 с.
5. Современные методы обследования различных комплексов очистных сооружений [Электронный ресурс]: монография / В.Д. Баширов и др. // Эл. изд.-Электрон. текстовые дан. (50с.). 2018.
6. Абдуқодиров Э., Хайитов Б., Туражанова Р. Тўрақўргон иссиқлик электр стансиясида фойдаланиладиган сувнинг кимёвий таркибини ўзгаришига турли омилларнинг таъсири // Экономика и социум. 2023. №4-1 (107).