

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ КОАГУЛЯНТОВ-ФЛОКУЛЯНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

Н. Ю. Кирюшина, И. В. Старостина,  
Ю. Л. Макридина, Е. В. Локтионова, А. Е. Хапугина

*ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия*

**Ключевые слова:** алюмокремниевый флокулянт-коагулянт; бентонит; городские сточные воды; известняк; комбинированные коагулянты-флокулянты; регулятор кислотности; эффективность очистки; pH среды.

**Аннотация:** Рассмотрено использование алюмокремниевого коагулянта-флокулянта (АКФ) для очистки городских сточных вод, отобранных на стадии механической очистки после песколовок. Показано, что применение АКФ сопровождается снижением величины pH очищенных стоков до 4,39 при расходе  $2,0 \text{ г/дм}^3$ . Представлено использование в качестве регуляторов кислотности тонкодисперсных порошков бентонитовой глины и отсева дробления известняка цеха получения металлургической извести. Показано, что наиболее эффективным является использование известняка в количестве  $0,8 \text{ г/дм}^3$  совместно с АКФ ( $1 \text{ г/дм}^3$ ), что обеспечивает максимальную эффективность очистки сточной воды 73,7 % и pH среды 6,78, и совместное использование АКФ, известняка и глины в количестве по  $0,4 \text{ г/дм}^3$  каждого, что обеспечивает эффективность очистки 75,4 % и pH среды 6,94.

### Введение

Загрязнение городских сточных вод представляет собой одну из наиболее острых экологических проблем современного мира, причины которой многочисленны и связаны как с быстрым ростом городского населе-

---

Кирюшина Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры экобиотехнологии; Старостина Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, ведущий кафедрой экобиотехнологии, e-mail: starostinairinav@yandex.ru; Макридина Юлия Леонидовна – старший преподаватель кафедры экобиотехнологии; Локтионова Екатерина Владимировна – младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории по нанесению и исследованию защитных и функциональных покрытий, аспирант кафедры промышленной экологии; Хапугина Анастасия Евгеньевна – студент, ФГБОУ ВО «БГТУ им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия.

ния, так и интенсификацией промышленной деятельности и увеличением объемов бытовых отходов. В результате водные ресурсы подвергаются значительному негативному воздействию, что влечет за собой целый ряд экологических, социальных и экономических последствий [1, 2].

Один из основных источников загрязнения – сток различных промышленных предприятий, содержащий тяжелые металлы, токсичные химические соединения и другие вредные вещества. Такое загрязнение оказывает непосредственное влияние на водные экосистемы, ухудшая качество воды и нарушая биологическое разнообразие. Дополнительные проблемы возникают при использовании загрязненной воды для сельскохозяйственных и бытовых нужд.

Ситуация усугубляется неэффективностью существующих систем очистки сточных вод. Многие методы очистки либо недостаточно эффективны для удаления определенных типов загрязнителей, либо требуют значительных капитальных вложений и операционных расходов. Кроме того, в некоторых регионах отсутствует необходимая инфраструктура или ресурсы для адекватной очистки сточных вод.

В свете данных проблем поиск новых, более эффективных и экономически выгодных методов очистки сточных вод становится критически важным для устойчивого развития городов и защиты окружающей среды. В данном контексте применение инновационных технологий, таких как комбинированные коагулянты-флокулянты, представляет собой перспективное направление, которое может способствовать решению этой сложной экологической задачи.

Алюминий- и железосодержащие коагулянты являются распространенными реагентами при осуществлении коагуляционно-флокуляционных процессов при очистке воды. Они эффективны при удалении различных загрязнителей, включая мелкие частицы, коллоиды и некоторые типы бактерий, поэтому часто используются на начальных этапах обработки для удаления взвешенных твердых частиц и уменьшения мутности воды. Их применяют в сочетании с другими методами очистки, такими как флокуляция и фильтрация, для более результативного процесса очистки.

Авторами [3] разработана технология получения железоалюминиевого коагулянта из железосодержащих отходов в виде шламов и растворов травления. При гидролизе  $\text{FeCl}_3$  высвобождаются ионы  $\text{Cl}^-$ , которые являются депассиваторами и вытесняют либо частично замещают на поверхности металла пассивирующий кислород с образованием поверхностного комплекса. Также хлорид-ионы участвуют в кинетической стадии ионизации алюминия. Окисление алюминия сопровождается восстановлением доноров протонов (водородная деполяризация), а также окислителя – ионов железа. Процесс завершается растворением алюминия и образованием поливалентных полиядерных гидроксоаквакомплексов. Проведена сравнительная оценка эффективности использования очистки природной воды р. Казанки данным коагулянтом, расход которого составил  $0,5 \text{ мл/дм}^3$ . Установлено, что нормы расхода разработанного коагулянта и промышленного «Аква-аурат 10» не отличаются при содержании алюминия (III) в промышленном коагулянте 5,3 %, алюминия (III) и железа

(Ш) в предлагаемом – 1,2 и 0,1 % соответственно, что представляется важным в плане повышения экономичности процесса водоочистки.

Одним из коагулянтов нового поколения является алюможелезосодержащий коагулянт ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,28\text{FeCl}_3 \cdot 25\text{H}_2\text{O}$ ), получаемый в результате смешения растворов хлорного железа и сульфата алюминия. Однако у такой технологии существуют значительные недостатки – трудность подбора и поддержание определенных пропорций, а также применение реагентов в виде кислых растворов [4].

Использование комбинированных коагулянтов-флокулянтов в очистке сточных вод является инновационным подходом, обеспечивающим более эффективное удаление загрязнителей по сравнению с традиционными методами. Данный подход сочетает в себе два процесса: коагуляцию и флокуляцию, которые традиционно применяются последовательно, но в случае комбинированных препаратов работают более синергетически [5, 6].

Комбинированные коагулянты-флокулянты представляют собой препараты, в которых приведенные две функции объединены в одно вещество, что позволяет оптимизировать процесс очистки, сократить время обработки и уменьшить количество добавляемых реагентов.

Ученые Цилинского университета (Чанчунь, Цилинь, КНР) разработали новый экологичный и высокоэффективный композиционный флокулянт – полимерный алюмокремневокрахмальный (PSiAl-St). Представленные результаты показали, что при введении крахмала в состав алюмокремниевого флокулянта происходит взаимодействие солей кремниевой кислоты с гидроксильными группами молекул крахмала. Это обеспечивает увеличение длины молекулярной цепи получаемого флокулянта, формирование крупнозернистой структуры с нерегулярной пористостью, что способствует повышению эффективности процесса коагуляции [7].

Практический интерес представляет разработка и применение неселективных, то есть удаляющих большинство загрязняющих веществ минеральных композиционных реагентов, получаемых из относительно недорогого алюмокремниевого сырья. Такие неселективные реагенты сочетают в себе коагуляционные и сорбционные свойства за счет возможного образования в различных условиях (pH, температура и т.д.) мезопористых мезоструктурных материалов, обладающих порами одинаковой формы и размера и кристаллографически упорядоченных в пространстве [8].

Использование кремнезема в виде полисиликатов существенно улучшило эффективность удаления из стоков неорганических и органических частиц и патогенных микроорганизмов [9].

Алюмокремниевые коагулянты-флокулянты представляют собой относительно новый класс химических веществ, используемых в процессе очистки воды. Эти соединения комбинируют в себе свойства алюминия и кремния, благодаря чему обладают улучшенными коагуляционными и флокуляционными характеристиками по сравнению с традиционными коагулянтами и флокулянтами.

Основной механизм действия алюмокремневых коагулянтов-флокулянтов заключается в образовании полимерных структур, которые эффек-

тивно связывают и удаляют загрязнители из воды. Эти соединения способствуют агломерации и осаждению частиц, тем самым улучшая процесс очистки. Присутствие кремния в составе данных коагулянтов помогает формировать более стабильные и крупные флоккулы, что улучшает процесс отделения осадка от очищенной воды.

Одним из ключевых преимуществ алюмокремниевых коагулянтов-флокулянтов является способность эффективно работать в широком диапазоне видов и концентраций загрязнителей, что делает их пригодными для использования в различных условиях очистки сточных вод. Кроме того, они обладают хорошей способностью к удалению органических загрязнителей, тяжелых металлов и других токсичных веществ, что делает их особенно ценными в современных технологиях очистки воды.

Однако для эффективной работы алюмокремниевых коагулянтов-флокулянтов необходимо поддерживать определенный уровень pH воды, что может потребовать добавления корректирующих добавок [10].

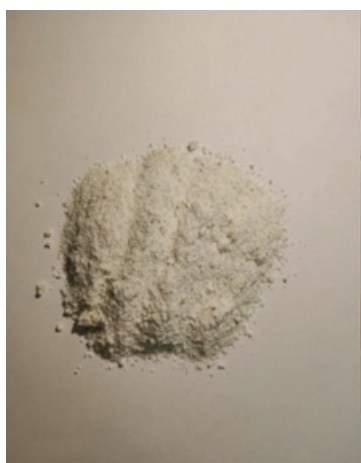
Кроме того, в настоящее время для очистки водных сред коагулянты и флокулянты традиционно применяются в виде растворов или суспензий. При этом необходимо отметить целый ряд недостатков: растворы имеют низкий уровень pH и, как следствие, являются реакционно активными средами, что приводит к коррозии оборудования; для хранения и транспортирования необходимы специальное оборудование – емкости, дозаторы и т.д.; ограниченная дальность перевозок готовых реагентов; изменение физико-химических свойств в результате длительного хранения реагентов и т.д.

Использование композиционных реагентов в сухом порошкообразном или гранулированном виде обеспечивает ряд преимуществ: упрощение их транспортирования, хранения и дозирования; возможность автоматизирования процесса введения реагентов и в итоге – снижение себестоимости процесса водоочистки.

### **Объекты и методы исследования**

В качестве комбинированного реагента использовали коагулянт-флокулянт алюмокремниевоего состава (**АКФ**) в порошкообразном виде, предоставленный ООО «Промышленная компания “Юго-Запад-Химпром”» (Белгород, Россия). Химический состав АКФ представлен содержанием следующих оксидов, масс. %:  $\text{SiO}_2$  – 25,43;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 16,47;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 9,51;  $\text{K}_2\text{O}$  – 3,04;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 1,25;  $\text{CaO}$  – 0,70;  $\text{MgO}$  – 0,24;  $\text{SO}_3^{2-}$  – 43,10. Внешний вид и процесс коагулирования взвешенных веществ при использовании АКФ представлены на рис. 1.

Очистка сточных вод проводили на реальных стоках очистных сооружений (**ОС**) ГУП «Водоканал» (Белгород, Россия), отобранных на стадии механической очистки – после решеток с исходными показателями: мутность 194 NTU и pH 7,06. Эффективность очистки оценивали по снижению мутности и величине pH среды. Мутность водной среды до и после очистки определяли на портативном турбидиметре-мутномере HANNA HI 98307.



а)



б)

**Рис. 1. Внешний вид АКФ (а) и процесс коагулирования взвешенных веществ (б) при использовании АКФ**

В качестве регуляторов кислотности очищенных стоков использовали бентонитовую глину и отсев дробления известняка цеха обжига извести АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А. А. Угарова» (Старый Оскол, Белгородская обл.). Химический состав бентонитовой глины представлен содержанием следующих оксидов, масс. %:  $\text{SiO}_2$  – 64,29;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 11,51;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,44;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,33;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4,7;  $\text{CaO}$  – 2,24;  $\text{MgO}$  – 1,5; потери при прокаливании составили 11,65 %. Химический состав отсева известняка:  $(\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3)$  – 96,5 %, в том числе  $\text{MgCO}_3$  – не более  $3,0 \pm 0,1$ ;  $\text{SiO}_2$  – не более 3,5 %. Материалы подвергали дополнительному помолу в шаровой мельнице до порошкообразного состояния, дисперсность которых характеризовалась остатком на сите № 014 – 5 масс. %.

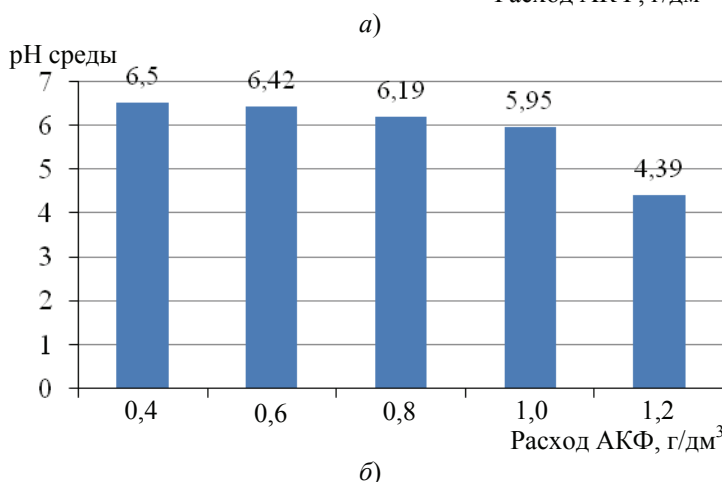
Экспериментальные исследования по использованию АКФ для осветления проб городских сточных вод проводили следующим образом: в стеклянный стакан помещали  $1000 \text{ см}^3$  воды и навески АКФ и регуляторов кислотности. Полученную смесь перемешивали с помощью магнитной мешалки: время быстрого перемешивания – 3 мин, медленного – 12 мин. Далее пробы переливали в цилиндры и отстаивали в течение 1 ч. Эффективность очистки рассчитывали по формуле

$$\Xi = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}} \cdot 100 \%,$$

где  $M_{\text{н}}$ ,  $M_{\text{к}}$  – мутность сточной воды до и после очистки соответственно, NTU.

### Результаты и обсуждение

Результаты, представленные на рис. 2, показали, что с увеличением расхода АКФ мутность очищенной сточной воды уменьшается, что является результатом наращивания коагуляционно-флокуляционной или сгу-



**Рис. 2. Влияние расхода АКФ на эффективность очистки по мутности (а) и pH очищенного стока (б)**

стительной активности реагента, а также увеличения числа связей коагулянта со взвешенными веществами. Максимальные значения эффективности очистки сточных вод находятся в интервале 80,88 – 82,16 % при расходе АКФ 0,4...0,8 г/дм³. При этом pH осветленной воды снижается с 7,06 в исходной воде до 4,39 при расходе 2,0 г/дм³. Такое резкое снижение pH связано с гидролизом  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . В условиях закисления среды затормаживается процесс формирования  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , часть алюминия остается в ионной форме, не участвует в процессе коагуляции, что отражается на снижении эффективности очистки по мутности до 75 %. Следовательно, необходима корректировка состава реагента, обеспечивающая доведение pH среды после использования АКФ до нормативных показателей  $\text{pH} = 6,5 \dots 8,0$ .

Согласно литературным данным, для получения требуемых значений pH очищенного стока в качестве регуляторов кислотности среды используют различные материалы: гидроксиды, карбонаты или гидрокарбонаты натрия, калия, кальция в виде растворов, суспензий и твердых материалов.

Так, в работах [11, 12] для повышения эффективности процессов коагуляции в качестве регулятора pH добавляют раствор гидроксида натрия – как к индивидуальным алюминийсодержащим коагулянтам, так и к композиционным реагентам на их основе. Введение NaOH рассматривается как одностадийное и трехстадийное. Показано, что коллоидно-химические характеристики коагуляционных агрегатов, получаемых из сульфата алюминия при трехстадийном введении регулятора pH, сопоставимы с параметрами агрегатов, образующихся при гидролизе высокоосновного пентагидроксохлорида. Такое техническое решение увеличивает коагулирующую способность сульфата алюминия и способствует снижению стоимости процесса очистки, но усложняет технологическую схему и не позволяет использовать регулятор в составе реагента на основе сульфата алюминия.

Для корректирования pH очищенных стоков использовали регуляторы кислотности – бентонитовую глину и отсев дробления известняка цеха обжига извести, которые вводили в очищаемую воду совместно с АКФ в различных комбинациях.

Результаты оценки влияния различного количества вводимого известняка при фиксированном расходе АКФ – 1,0 и 2,0 г/дм<sup>3</sup> на эффективность очистки и величину pH очищенного стока представлены на рис. 3. Введение тонкодисперсного известняка в количестве 0,8 г/дм<sup>3</sup> совместно с АКФ обеспечивает максимальную эффективность очистки сточной воды 73,7 и 81,2 % и pH среды 6,78 и 6,40 при расходе АКФ 1,0 и 2,0 г/дм<sup>3</sup> соответственно. Необходимо отметить, что pH очищенного стока 6,78 достигается при расходе АКФ = 1 г/дм<sup>3</sup>, что можно выбрать в качестве оптимального.

Далее в качестве регулятора кислотности рассматривали использование бентонитовой глины и смеси глины и известняка.

Результаты, представленные в табл. 1 и на рис. 4, показали, что использование бентонитовой глины, несмотря на то что обеспечивает высокие значения эффективности очистки по величине мутности – от 78,6 до 81,3 %, но pH очищенных стоков находится у нижнего предела нормативных значений – от 6,01 до 6,12.

Бентонит – сложный минерал, состав которого определяется содержанием монтмориллонита, имеющего формулу  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \times n\text{H}_2\text{O}$ , где кремний может замещаться различными катионами ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и др.). Согласно химическому составу используемый бентонит относится к кальциевому типу, обладающему большими значениями порового пространства, которые участвуют в процессе сорбции крупных молекул преимущественно органических веществ. Кроме того, кальциевые бентониты содержат двухвалентные обменные катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и характеризуются значительным количеством активных центров на поверхности частиц, что в совокупности способствует увеличению их сорбционной активности [13].

Таким образом, в слабокислой среде происходит частичное разрушение бентонита на поверхности частиц с выделением в жидкую среду соединений алюминия и кремниевой кислоты, что способствует некоторому увеличению общего количества коагулянтов и флокулянтов. Осуществление сорбционно-коагуляционных процессов обеспечивают высокую эффективность очистки стоков – 81,2 %.

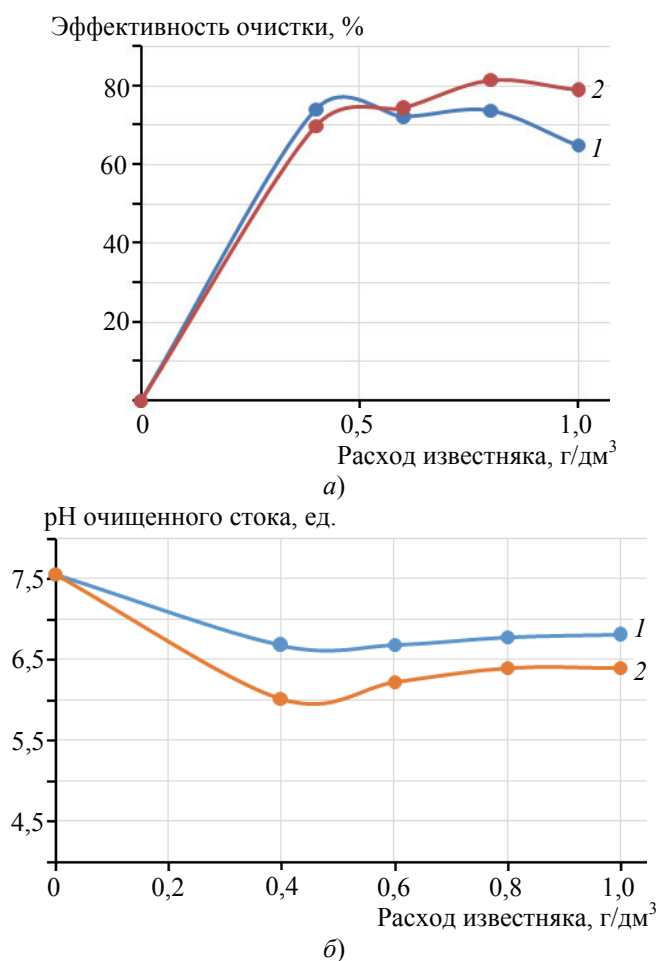
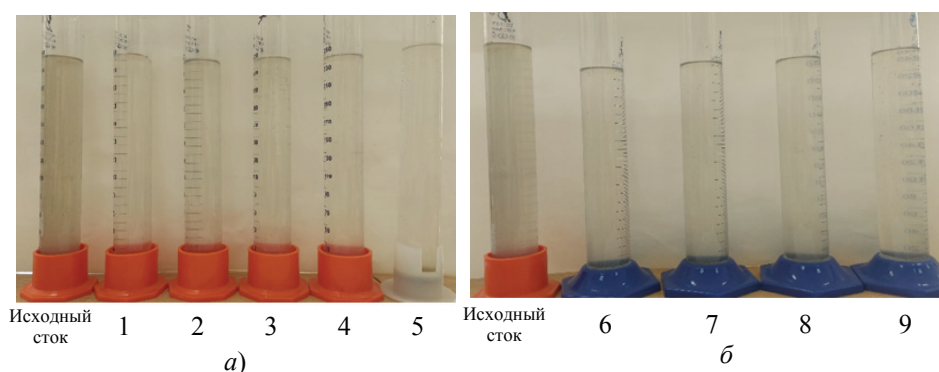


Рис. 3. Влияние расхода известняка в качестве регулятора кислотности на эффективность очистки стоков по мутности (а) и величину pH среды (б)

Таблица 1

**Влияние состава и расхода композиционного реагента на характеристики очищенной воды**

| Номер варианта | Расход, г/дм <sup>3</sup> |          |           | pH воды | Мутность, NTU | Эффективность очистки по мутности, % |
|----------------|---------------------------|----------|-----------|---------|---------------|--------------------------------------|
|                | АКФ                       | бентонит | известняк |         |               |                                      |
| 1              | 1,0                       | 0,2      | –         | 6,01    | 36,2          | 81,3                                 |
| 2              |                           | 0,4      |           | 6,03    | 36,7          | 81,1                                 |
| 3              |                           | 0,6      |           | 6,08    | 41,5          | 78,6                                 |
| 4              |                           | 0,8      |           | 6,11    | 39,6          | 79,6                                 |
| 5              |                           | 1,0      |           | 6,12    | 36,4          | 81,2                                 |
| 6              | 0,4                       | 0,4      | 0,4       | 6,94    | 47,8          | 75,4                                 |
| 7              | 0,6                       |          |           | 6,85    | 58,3          | 70,0                                 |
| 8              | 0,8                       |          |           | 6,78    | 49,2          | 74,6                                 |
| 9              | 1,0                       |          |           | 6,56    | 45,1          | 76,8                                 |



**Рис. 4. Результаты использования в качестве регулятора кислотности бентонитовой глины (а) и смеси известняка и глины (б)**  
(номера вариантов в соответствии с табл. 1)

Низкое содержание основных катионов в составе бентонита не обеспечивает достаточной нейтрализации серной кислоты, образующейся в результате гидролиза АКФ, поэтому pH очищенного стока не превышает 6,12. Тогда как использование в качестве регулятора кислотности смеси известняка и глины уже при минимальных расходах (опыт № 6) обеспечивает эффективность очистки 75,4 % и pH среды 6,94, что является более перспективным.

### Заключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно констатировать следующее. В составе твердых порошкообразных композиционных реагентов на основе алюмокремниевых коагулянтов-флокулянтов в качестве регуляторов кислотности среды возможно использование тонкомолотых материалов – известняка и смеси известняка и бентонитовой глины в соотношении 1 : 1. Использование  $\text{CaCO}_3$  в количестве  $0,8 \text{ г/дм}^3$  совместно с АКФ ( $1 \text{ г/дм}^3$ ) обеспечивает максимальную эффективность очистки сточной воды 73,7 % и pH среды 6,78. Совместное использование АКФ, известняка и глины в количестве по  $0,4 \text{ г/дм}^3$  обеспечивает эффективность очистки 75,4 % и pH среды 6,94.

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

### Список литературы

1. Василенко, Т. А. Применение осадка механической и биологической очистки бытовых и производственных сточных вод в качестве удобрения / Т. А. Василенко, А. Х. Моххамед // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 211 – 219.

2. Порожнюк, Л. А. Интегральная оценка водных сред, обработанных зоо-компостом с использованием Allium сера / Л. А. Порожнюк, Н. С. Лупандина, А. В. Непоменко // Chemical Bulletin. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 5 – 14.
3. Сорокина, И. Д. Синтез и оценка эффективности использования железо-алюминиевого коагулянта для очистки воды / И. Д. Сорокина, А. Ф. Дресвянников // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 4. – С. 146 – 158.
4. Горелая, О. Н. Сорбент для очистки нефтесодержащих сточных вод на основе отходов станций обезжелезивания / О. Н. Горелая, В. И. Романовский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 10. – С. 48 – 54.
5. Настенко, А. О. Современные коагулянты и флокулянты в очистке природных и сточных вод / А. О. Настенко, О. И. Зосуль // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4. – С. 531 – 537.
6. Vinogradov, S. A. Improvement of Nepheline Speck Leaching Technology Based on the Use of Combined Coagulants-Flocculants of the Carboaluminate-Alkalar Type / S. A. Vinogradov // Journal of Mining Institute. – 2004. – Vol. 159, No. 1. – P. 142 – 144.
7. Flocculant Containing Silicon, Aluminum, and Starch for Sewage Treatment / R. Wang, H. Zhang, L. Lian [et al.] // Journal of Chemical Engineering of Japan. – 2020. – Vol. 53, No. 10. – P. 592 – 598. doi: 10.1252/jcej.17we009
8. Investigation of the Water Treatment Process Using a Hybrid Alumosilicic Reagent / R.A. Alexandrov, D.Yu. Feklistov, V. Salomasov [et al.] // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2018. – Vol. 40, No. 3. – P. 136 – 142. doi: 10.3103/S1063455X18030049
9. Очистка сточных вод от нефтепродуктов на модифицированном диатомите и регенерация сорбента / М. В. Бузаева, Е. М. Булыжев, И. Т. Гусева, Е. С. Климов // Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 125 – 127.
10. Chemical and Electro-Coagulation Techniques in Coagulation-Flocculation in Water and Wastewater Treatment – A Review / L. N. Ukiwe, I. Ikechukwu, D. Chidi [et al.] // Journal of Advances in Chemistry. – 2014. – Vol. 9, No. 3. – P. 1988 – 1999. doi: 10.24297/jac.v9i3.1006
11. Анушко, Р. А. Изучение процесса коагуляции алюминийсодержащими соединениями и композиционными реагентами на их основе / Р. А. Анушко, А. В. Зыгмант, Д. Д. Гриншпан // Водоснабжение, химия и прикладная экология : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 22 марта 2021 г.) / под общ. ред. Е. Ф. Кудиной. – Гомель, 2021. – С. 8 – 11.
12. Коллоидно-химические характеристики дисперсий, образуемых высоко- и низкоосновными коагулянтами при различных условиях коагулирования / Р. А. Анушко, А. В. Зыгмант, Т. А. Савицкая [и др.] // Свиридовские чтения : сб. ст. / редкол.: О. А. Ивашкевич (пред.) [и др.]. – Минск, 2020. – Вып. 16. – С. 9 – 19.
13. Махкамова, Д. Н. Bentonитовая глина, ее физико-химическая характеристика и применение в народном хозяйстве / Д. Н. Махкамова, Ш. А. Содикова, З. Т. Усмонова // UNIVERSUM: Технические науки. – 2019. – № 6(63). – С. 95 – 98.

## Reference

1. Vasilenko T.A., Mokhamed A.Kh. [Use of the sediment from mechanical and biological treatment of domestic and industrial wastewater as a fertilizer], *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova* [Bulletin of the BGTU named after V.G. Shukhov], 2016, no. 6, pp. 211-219. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Porozhnyuk L.A., Lupandina N.S., Nepomenko A.V. [Integral assessment of water environments treated with zoocompost using Allium test], *Chemical Bulletin*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 5-14. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Sorokina I.D., Dresvyannikov A.F. [Synthesis and evaluation of the effectiveness of iron-aluminum coagulant for water purification], *Vesnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2009, no. 4, pp. 146-158. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Gorelaya O.N., Romanovsky V.I. [Sorbent for the purification of oil-containing wastewater based on waste from iron removal stations], *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering], 2020, no. 10, pp. 48-54. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Nastenka A.O., Zosul O.I. [Modern coagulants and flocculants in the purification of natural and wastewater], *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik* [International Student Scientific Bulletin], 2015, no. 3-4, pp. 531-537. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Vinogradov S.A. Improvement of nepheline speck leaching technology based on the use of combined coagulants-flocculants of the carboaluminate-alkal type, *Journal of Mining Institute*, 2004, vol. 159, no. 1, pp. 142-144.
7. Wang R., Zhang H., Lian L., Wang X., Zhu B., Lou D. Flocculant Containing Silicon, Aluminum, and Starch for Sewage Treatment, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2020, vol. 53, no. 10, pp. 592-598. doi: 10.1252/jcej.17we009
8. Alexandrov R.A., Feklistov D.Yu., Salomasov V., Tikhonov S., Laguntsov N.I., Kurchatov I.M. Investigation of the Water Treatment Process Using a Hybrid Alumosilicic Reagent, *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2018, vol. 40, no. 3, pp. 136-142. doi: 10.3103/S1063455X18030049
9. Buzaeva M.V., Bulyzhev E.M., Guseva I.T., Klimov E.S. [Wastewater treatment from oil products on modified diatomite and sorbent regeneration], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. North Caucasian region. Series: technical sciences], 2011, no. 4, pp. 125-127. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Ukiwe L.N., Ikechukwu I., Chidi D., Okolue B.N., Gerald O., Nweze C.A. Chemical and Electro-Coagulation Techniques in Coagulation-Flocculation in Water and Wastewater Treatment – A Review, *Journal of Advances in Chemistry*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 1988-1999. doi: 10.24297/jac.v9i3.1006
11. Anushko R.A., Zygmant A.V., Grinshpan D.D. *Vodosnabzheniye, khimiya i prikladnaya ekologiya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Water supply, chemistry and applied ecology: materials of the International. scientific-practical conf. (Gomel, March 22, 2021)], Gomel', 2021, pp. 8-11. (In Russ.)
12. Anushko R.A., Zygmant A.V., Savitskaya T.A., Tsygankova N.G., Grinshpan D.D. [Colloid-chemical characteristics of dispersions formed by high- and low-basic coagulants under various coagulation conditions], *Sviridovskiye chteniya: sb. st.* [Sviridov readings: collection. art.], Minsk, 2020, Is. 16, pp. 9-19. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Makhkamova D.N., Sodikova Sh.A., Usmonova Z.T. [Bentonite clay, its physical and chemical characteristics and application in the national economy], *UNIVERSUM: Tekhnicheskie nauki* [Technical Sciences], 2019, no. 6(63), pp. 95-98. (In Russ., abstract in Eng.)

## The Use of Combined Coagulants-Flocculants for Municipal Wastewater Treatment

N. Yu. Kuryushina, I. V. Starostina,  
Yu. L. Makridina, E. V. Loktionova, A. E. Khapugina

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Belgorod, Russia*

**Keywords:** aluminum-silicon flocculant-coagulant; bentonite; municipal wastewater; limestone; combined coagulants-flocculants; acidity regulator; purification efficiency; pH of the environment.

**Abstract:** The article is devoted to the current topic of improving methods for treating urban wastewater using innovative combined coagulants-flocculants. In an environment of increasing water pollution and stringent environmental standards, the search for effective and cost-effective methods of wastewater treatment becomes especially important. The paper discusses the use of aluminum-silicon coagulant-flocculant (ACF) for the purification of municipal wastewater collected at the stage of mechanical treatment after sand traps. It has been shown that the use of ACF is accompanied by a decrease in the pH value of treated wastewater to 4.39 at a flow rate of  $2.0 \text{ g/dm}^3$ . The paper discusses the use of finely dispersed bentonite clay powders and limestone crushing screenings from a metallurgical lime production shop as acidity regulators. It has been shown that the most effective is the use of limestone in an amount of  $0.8 \text{ g/dm}^3$  together with ACF ( $1 \text{ g/dm}^3$ ), which ensures maximum wastewater treatment efficiency of 73.7% and pH of the environment 6.78, and the joint use of ACF, limestone and clay in an amount of  $0.4 \text{ g/dm}^3$  each, which ensures a cleaning efficiency of 75.4% and a pH of 6.94.

---

© Н. Ю. Кирюшина, И. В. Старостина,  
Ю. Л. Макридина, Е. В. Локтионова, А. Е. Хапугина, 2024