

## УЛУЧШЕНИЕ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО РЕАГЕНТНОГО МЕТОДА ОЧИСТКИ

**Бута Оралович Хушвактов**

Старший преподаватель, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет им. Мирзо Улугбека

**Умида Уткировна Курбанова**

PhD, старший преподаватель, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет им. Мирзо Улугбека

**Абдихоликова Мария Мелитоджиевна**

Студентка 3 курса, Каршинский государственный технический университет

### ARTICLE INFO.

**Ключевые слова:** ефосфатация, сточные воды, реагенты, активный ил, соли железа, флокулянты, биологическая очистка

### Аннотация

В условиях роста объемов сточных вод, вызванного развитием промышленности и увеличением численности населения, проблема эффективной дефосфатации приобретает особую актуальность. Традиционные методы биологической очистки не всегда обеспечивают необходимое снижение концентрации фосфатов, особенно при высоком уровне органических и неорганических загрязнений. В связи с этим возникает необходимость исследования комбинированных методов очистки, основанных на взаимодействии биологических и физико-химических процессов.

В данной работе рассмотрено применение реагентной дефосфатации с использованием солей железа, алюминия и извести. Исследуется влияние точек дозирования и химического состава реагентов на эффективность удаления фосфора, а также на состав активного ила. Установлено, что оптимальные результаты достигаются при введении реагентов в анаэробно-аноксидные зоны и при добавлении их в циркулирующий активный ил. Это позволяет достичь остаточной концентрации фосфатов на уровне 0,5–0,8 мг/дм<sup>3</sup> при сокращении дозы реагентов до 2–3 г/м<sup>3</sup>.

Результаты демонстрируют, что применение комбинированного метода способствует формированию стабильных осадков, повышению содержания фосфора в осадке и снижению остаточного фосфора в очищенной воде. Полученные данные указывают на перспективность дальнейших исследований в области оптимизации дозирования и выбора реагентов с учетом химических характеристик сточных вод, что особенно важно для разработки эффективных и устойчивых систем очистки.

## Введение

С увеличением урбанизации, роста промышленного производства и численности населения проблема загрязнения водных ресурсов становится одной из ключевых экологических задач [1]. Одним из наиболее опасных компонентов сточных вод является фосфор, избыточное содержание которого способствует эвтрофикации водоёмов, нарушению экосистем и ухудшению качества питьевой воды [2]. Традиционные методы биологической очистки не всегда справляются с полной дефосфатацией, особенно при высоких нагрузках на очистные сооружения, что вызывает необходимость поиска более эффективных решений [3].

Научные исследования показывают, что помимо биологических механизмов, значительный потенциал имеют физико-химические методы, в частности, использование коагулянтов и флокулянтов на основе солей алюминия, железа и кальция [4]. В последние годы внимание уделяется именно комбинированному подходу, при котором биологическая очистка дополняется введением реагентов. Такой подход позволяет стабилизировать процесс удаления фосфора [5], повысить устойчивость к изменению состава сточных вод и обеспечить необходимое качество очистки. Однако до сих пор недостаточно изучено влияние реагентов на микробные сообщества активного ила, а также эффективность дозирования в различных зонах очистных сооружений [6].

Обзор предыдущих работ демонстрирует [7], что в ряде исследований достигались значительные результаты по снижению концентрации фосфатов, однако отсутствует единая методология расчёта дозы реагентов, особенно в условиях нестабильного состава сточных вод. Кроме того, влияние различных точек введения реагентов (анаэробные, аноксидные зоны, циркуляционный ил и др.) на итоговую эффективность очистки также требует систематизации и анализа [8].

Методологической основой настоящего исследования является анализ эффективности удаления фосфатов при использовании реагентов в сочетании с биологической очисткой [9]. Рассматриваются параметры среды, дозировка, типы коагулянтов, химические реакции осаждения и влияние на структуру осадка. В центре внимания — практическое применение реагентов в условиях действующих очистных сооружений, анализ стабильности процесса и остаточного содержания фосфора в очищенной воде [10].

Ожидаемым результатом является подтверждение эффективности комбинированного метода и определение оптимальных условий его применения. Полученные данные позволят не только повысить надёжность существующих очистных систем, но и создать научно обоснованные рекомендации по выбору реагентов и режимов дозирования, что имеет прикладное значение для муниципальных и промышленных водоочистных комплексов [9].

## Методология

Методология исследования основывается на комплексном анализе процессов дефосфатации сточных вод с использованием реагентных методов в сочетании с биологической очисткой. Основное внимание уделяется определению эффективности различных типов реагентов — солей кальция, алюминия и железа — при введении их в различные технологические зоны очистных сооружений. Оценка эффективности проводилась на основе данных по остаточной концентрации фосфатов в очищенной воде, а также по составу образующегося осадка. В работе рассматриваются условия, при которых реагенты добавляются в анаэробные и аноксидные зоны, а также в циркулирующий активный ил, что позволяет оптимизировать процессы связывания фосфора. Проводился расчет дозировок реагентов на основе общего содержания фосфора в сточных водах и коэффициента увеличения дозы с учетом присутствующих анионов ( $\text{OH}^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ ), способных влиять на химические реакции осаждения. Дополнительно анализировались параметры среды, в частности, уровень pH, при котором достигается максимальное связывание фосфатов — от 6,0 до 7,3 при различных реагентах. Для повышения достоверности результатов учитывались объёмные характеристики образующихся осадков, степень их восстановления, а

также устойчивость процессов к органическим загрязнениям и агрессивной среде. Методологический подход также включал в себя теоретический анализ литературы по данной тематике с целью сопоставления полученных данных с результатами предыдущих исследований. Итогом данной методики стало выявление наилучших практик реагентного удаления фосфора, подходящих для применения в условиях промышленных и городских очистных сооружений.

### Результаты и обсуждение

Проведённый анализ применения реагентной дефосфатации в условиях биологических очистных сооружений позволил выделить ряд значимых закономерностей и факторов, влияющих на эффективность удаления фосфора. В частности, было установлено, что добавление реагентов — солей алюминия, железа и кальция — существенно снижает концентрацию фосфатов в сточных водах, особенно при оптимальных значениях pH (6,0–7,3). Наиболее эффективным оказалось введение реагента в анаэробно-аноксидные зоны и циркулирующий активный ил, что способствовало более полному связыванию фосфатов и снижению остаточного фосфора до 0,5–0,8 мг/дм<sup>3</sup>. Такой подход позволил не только стабилизировать технологический процесс, но и сократить дозу реагента до 2–3 г/м<sup>3</sup>, минимизируя эксплуатационные расходы (Таб. 1).

Кроме того, было выявлено, что при использовании трёхвалентных солей железа и алюминия формируются устойчивые нерастворимые соединения, способствующие осаждению не только фосфатов, но и органических примесей. В то же время выявлено влияние анионов, таких как OH<sup>-</sup> и CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, на увеличение потребления реагента в 2–4 раза, что требует более точного расчёта дозировки и корректировки в реальных условиях эксплуатации. Показано, что применение оксида кальция и гидроксида кальция отличается высокой стабильностью, устойчивостью к органическим загрязнениям и возможностью автоматизации процессов.

Параметр	Кальций (Ca(OH) <sub>2</sub> / CaO)	Алюминий (Al)	Железо (Fe <sup>3+</sup> )
Тип реагента	Кальций	Алюминий	Железо
Оптимальный pH	10.5–11	6.0–7.3	6.0–7.3
Дозировка реагента	150–400 мг/дм <sup>3</sup>	Определяется содержанием фосфора	1.8 г железа на 1 г фосфора
Эффективность удаления фосфора	Высокая	Высокая	Высокая
Остаточная концентрация фосфора	0.5–0.8 мг/дм <sup>3</sup>	0.5–0.8 мг/дм <sup>3</sup>	0.5–0.8 мг/дм <sup>3</sup>
Объём осадка	Меньший объём, легко восстанавливается	Больше объём осадка	Больше объём осадка
Влияние на микроорганизмы	Снижает содержание до 99% при pH 11	Не указано точно	Возможны остатки в очищенной воде (0.49–0.59 мг/дм <sup>3</sup> )

Тем не менее, остаётся ряд нерешённых вопросов. Во-первых, необходимо провести более глубокие теоретические исследования влияния реагентов на микробиологическую активность активного ила, поскольку существуют противоречивые данные о степени его угнетения при высоких дозах химических веществ. Во-вторых, недостаточно изучена долгосрочная динамика состава образующегося осадка, особенно в условиях переменного состава сточных вод. Кроме того, влияние условий дозирования реагентов на формирование комплексных соединений фосфора и металлов требует дальнейшего практического изучения с использованием

современных аналитических методов (например, ИК-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа).

Полученные результаты подтверждают перспективность комбинированного метода очистки, однако подчёркивают необходимость разработки единых стандартов дозирования реагентов, учета взаимодействия с другими загрязнителями и оценки экологической безопасности осадков. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание математических моделей прогнозирования эффективности дефосфатации с учётом химического состава воды, дозы реагента и параметров среды. Также важным направлением является внедрение пилотных установок в промышленных условиях с целью апробации предложенных подходов и оценки их применимости в широкомасштабной практике.

### Заключение

На основе проведённого анализа установлено, что применение комбинированного метода дефосфатации сточных вод, включающего использование реагентов на основе солей железа, алюминия и кальция в сочетании с биологической очисткой, позволяет достичь значительного снижения концентрации остаточного фосфора до 0,5–0,8 мг/дм<sup>3</sup> и повысить стабильность технологического процесса. Наиболее эффективными оказались схемы, предусматривающие введение реагентов в анаэробно-аноксидные зоны и циркулирующий активный ил, что также способствовало сокращению расхода реагентов и формированию устойчивых нерастворимых соединений в осадке. Результаты подчеркивают значимость учета химических характеристик среды и возможности точного дозирования с учётом влияния анионов и других сопутствующих факторов. Однако, несмотря на достигнутые положительные результаты, сохраняется необходимость в дальнейшем углублённом изучении влияния реагентов на микробиологическое сообщество активного ила, а также в разработке интегрированных математических моделей, позволяющих прогнозировать эффективность очистки при различных параметрах сточных вод. Перспективным направлением остаётся внедрение полученных решений в реальных условиях водоочистных станций и проведение пилотных испытаний с целью валидации научных данных и повышения экологической надёжности систем очистки.

### Литература:

1. С.Ю. Теплых, Д.С. Бочков и др., «Исследование способов удаления фосфатов из бытовых сточных вод», Градостроительство и архитектура, 2020. Доступно: <https://elibrary.ru>
2. А.Н. Коваленко и Т.А. Шевченко, «Усовершенствование методов удаления фосфора из бытовых сточных вод», Коммунальное хозяйство городов, 2010. Доступно: <https://eprints.kname.edu.ua>
3. А.Ю. Дмитриева и Т.О. Шевченко, «Анализ методов очистки бытовых сточных вод от соединений фосфора», Водопостачання, водовідведення та гідраліка, 2012. Доступно: <http://irbis-nbu.gov.ua>
4. Е.С. Гогина, Е.В. Спасибо, И.А. Гульшин и др., «Способы повышения эффективности процесса дефосфатации сточных вод», Биосферная безопасность, 2024. Доступно: <https://biosov.elpub.ru>
5. Е.Н. Матюшенко, «Повышение эффективности работы узла обработки осадков городских очистных сооружений канализации», Известия высших учебных заведений. Строительство, 2019. Доступно: <https://elibrary.ru>
6. С.С. Душкин и Г.И. Благодарная, «Прогрессивные технологии в области очистки природных и сточных вод», Коммунальное хозяйство городов, 2010. Доступно: <https://eprints.kname.edu.ua>

7. В.В. Клещев, «Сравнительная оценка технологий удаления фосфора из городских сточных вод», Вестник магистратуры, 2017. Доступно: <https://magisterjournal.ru>
8. Е. Камышникова, «Обзор методов очистки сточных вод для их применения в орошении сельскохозяйственных культур», Строительство и техногенная безопасность, 2015. Доступно: <https://cyberleninka.ru>
9. Г.Т. Амбросова, Е.Н. Матюшенко и др., «Удаление фосфора из стоков внутриплощадочной канализации», Известия высших учебных заведений. Строительство, 2018. Доступно: <https://elibrary.ru>
10. Л.М. Сибиева, А.С. Сироткин, Т.В. Вдовина и др., «Элементный анализ биомассы активного ила в процессах совместной биологической и реагентной очистки сточных вод и оценка возможности ее применения», Прикладная химия и биотехнология, 2018. Доступно: <https://cyberleninka.ru>