Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.58.63.007

УДК 628.38

М.Ю. Дягелев

КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФОСФОРА ИЗ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

Аннотация. Статья посвящена систематическому анализу кристаллизационных методов извлечения фосфора из осадков сточных вод – одного из наиболее перспективных направлений решения глобальной проблемы истощения запасов фосфатных руд и предотвращения эвтрофикации водоёмов. В работе рассмотрены основные формы фосфора в осадках, классифицированы современные технологии извлечения фосфора (кристаллизационные, биологические, термические, химические и физические методы) и проанализированы их технологические особенности. Особое внимание уделено кристаллизации струвита ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) как наиболее зрелой и широко применяемой технологии, обеспечивающей эффективность извлечения фосфора. Рассмотрены требования к качеству получаемых продуктов, включая биодоступность фосфора для растений и содержание тяжёлых металлов. Анализируются экономические барьеры и косвенные выгоды от внедрения технологий.

Ключевые слова: фосфор; осадки сточных вод, струвит, кристаллизация, биологическое удаление фосфора.

Для цитирования: Дягелев М.Ю. Кристаллизационные методы извлечения фосфора из осадков сточных вод // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып.2. С. 360–380. DOI: 10.35634/UdSU.2026.58.63.007.

Введение

Фосфор является незаменимым элементом для поддержания жизни на Земле и выступает ключевым компонентом современного сельского хозяйства. Однако глобальные запасы фосфатных руд, являющихся основным источником фосфорных удобрений, неуклонно истощаются, что создаёт серьёзные риски для продовольственной безопасности. По различным оценкам, природные запасы фосфора могут быть исчерпаны в течение следующих 30-

200 лет [1, 2]. Одновременно с этим, избыточное поступление фосфора в водные объекты с бытовыми и промышленными сточными водами приводит к эвтрофикации, нарушая экологический баланс водных экосистем [3, 4]. Эта двойственная проблема – дефицит фосфора как ресурса и его избыток как загрязнителя – делает актуальным развитие технологий извлечения и рециклирования фосфора из вторичных источников [5].

Осадки сточных вод представляют собой один из наиболее перспективных источников для восстановления фосфора [6]. Ежегодно один человек производит приблизительно 1,2 кг фосфора, который попадает на очистные сооружения [7]. В осадках сточных вод содержание фосфора может достигать 8% в сухом веществе, что сопоставимо с концентрацией в некоторых фосфатных рудах [8].

Актуальность проблемы также подтверждается принятием законодательных актов в ряде развитых стран. Так, в Германии с 2029 года обязательным становится извлечение фосфора из осадков сточных вод с содержанием фосфора более 20 г/кг сухого вещества, а Швейцария с 2026 года требует обязательного извлечения фосфора из сточных вод, осадков или золы осадков [9]. Эти регуляторные требования стимулируют развитие и внедрение технологий извлечения фосфора на полномасштабных очистных сооружениях.

Целью данной обзорной статьи является систематический анализ кристализационных технологий извлечения фосфора из осадков сточных вод, включая их принципы действия, эффективность, экономическую целесообразность и экологическую оценку.

Теоретические основы

Формы фосфора в осадках сточных вод

Фосфор в осадках сточных вод присутствует в различных химических формах, что определяет выбор технологии его извлечения. Основные формы включают [10, 11]:

1. Органические соединения фосфора, связанные с биомассой;
2. Неорганические фосфаты, ассоциированные с металлами (железом, алюминием, кальцием);
3. Полифосфаты, аккумулированные микроорганизмами;
4. Минеральные формы, такие как струвит ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) и вивианит ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$).

Распределение фосфора по различным фракциям зависит от технологии очистки сточных вод. При химическом осаждении с использованием солей железа или алюминия большая часть фосфора связывается с гидроксидами этих металлов. В системах с глубоким биологическим удалением фосфора (Enhanced Biological Phosphorus Removal, EBPR) значительная доля фосфора аккумулируется в клетках полифосфат-аккумулирующих организмов в виде полифосфатов, при этом содержание фосфора в биомассе может достигать 5-7 % вместо обычных 1-2 % [12, 13].

При анаэробной стабилизации осадков происходит высвобождение растворимого ортофосфата в жидкую фазу, что создаёт благоприятные условия для кристаллизационных методов извлечения [11, 14]. В присутствии достаточного количества железа в анаэробных условиях может формироваться вивианит, парамагнитный минерал, содержащий до 28% фосфора по массе и пригодный для использования в качестве удобрения.

Классификация технологий извлечения фосфора

Современные технологии извлечения фосфора из осадков сточных вод можно классифицировать по нескольким критериям. По стадии применения в технологической цепочке очистных сооружений различают [15]:

- извлечение из жидкой фазы (сточная вода, фугат после обезвоживания);
- извлечение непосредственно из осадков;

- и извлечение из золы после термической обработки осадков.

Существующие технологии извлечения фосфора из сточных вод и осадка сточных вод приведены в табл. 1 с описанием каждого метода и обозначением особенностей [10, 16-18].

Таблица 1.

Технологии извлечения фосфора из сточных вод и осадка сточных вод

Метод извлечения фосфора	Описание метода	Технологические особенности метода
Кристаллизационные методы	Основаны на осаждении фосфора в форме минералов, таких как струвит, гидроксиапатит или фосфаты кальция.	Требуют корректировки pH и добавления соответствующих реагентов.
Биологические методы	Ииспользуют способность определённых микроорганизмов к избыточному накоплению фосфора в клетках.	Необходима комбинация с другими методами, т.к. фосфор биологически связан.
Термические методы	Включают сжигание, пиролиз и гидротермальную карбонизацию осадков с последующим извлечением фосфора из твёрдых продуктов.	Фосфор концентрируется в золе или биоугле, откуда может быть извлечён химическими методами.
Химические методы	Предполагают использование кислотного или щелочного выщелачивания для перевода фосфора в растворимую форму с последующим осаждением.	Выбор типа кислоты (серная, соляная, органические кислоты) и условий процесса существенно влияет на эффективность извлечения и селективность по отношению к тяжёлым металлам.
Физические методы	Включают магнитную сепарацию для выделения фосфорсодержащих минералов, мембранные технологии для концентрирования фосфора, ионный обмен и адсорбцию.	

Требования к продуктам извлечения фосфора

Эффективность технологии извлечения фосфора определяется не только степенью извлечения, но и качеством получаемого продукта. Для использования в качестве удобрения извлечённый фосфор должен обладать достаточной

биодоступностью для растений. Биодоступность зависит от химической формы фосфора и pH почвы. Струвит демонстрирует превосходную биодоступность, сопоставимую с водорастворимыми фосфатами, и эффективен как в кислых, так и в щелочных почвах [19]. Фосфаты кальция и термически обработанная зола осадков проявляют хорошую биодоступность преимущественно в кислых почвах.

Критически важным является содержание тяжёлых металлов в конечном продукте, которое должно соответствовать нормативным требованиям для удобрений. Селективное извлечение фосфора при минимальном соизвлечении кадмия, свинца, меди и других токсичных элементов представляет собой ключевую технологическую задачу, особенно при работе с золой после сжигания осадков [20].

Экономические аспекты извлечения фосфора

Экономическая целесообразность извлечения фосфора определяется соотношением затрат на процесс извлечения и стоимости получаемого продукта. В работах [16, 21, 22] приведен расчет стоимости извлечения фосфора из сточных вод, полученные расчетные данные в пересчете на рубли по текущему курсу варьируется от 200 до 800 рублей за килограмм фосфора, тогда как цена фосфатной руды составляет от 50 до 100 рублей за килограмм фосфора. Это создаёт существенный экономический барьер для широкомасштабного внедрения технологий.

Однако комплексная экономическая оценка должна учитывать не только прямые доходы от продажи продукта, но и косвенные выгоды:

- сокращение потребления реагентов для химического осаждения фосфора;
- уменьшение объёмов образующегося осадка и затрат на его утилизацию;

- предотвращение неконтролируемого образования струвита в трубопроводах и оборудовании, что снижает эксплуатационные расходы;
- экологические выгоды от предотвращения эвтрофикации водоёмов.

При учёте вышеуказанных цен, отражающих экологический ущерб от сброса фосфора в окружающую среду, экономическая целесообразность проектов извлечения фосфора существенно возрастает. Введение законодательных требований по обязательному извлечению фосфора также меняет экономическую парадигму, делая такие технологии не опциональными, а необходимыми инвестициями.

Методы исследования

Для проведения систематического обзора технологий извлечения фосфора из осадков сточных вод был выполнен анализ научных публикаций, технических отчётов, патентной документации и данных о полномасштабных установках за период с 2015 по 2025 годы. Поиск литературы осуществлялся в базах данных Web of Science, Scopus, PubMed, РИНЦ, а также в специализированных источниках по водоочистке и управлению отходами.

Отбор публикаций производился по следующим критериям:

- релевантность теме извлечения фосфора из осадков сточных вод;
- наличие количественных данных об эффективности извлечения;
- описание механизмов процессов;
- информация о составе получаемых продуктов; данные об экономических или экологических аспектах.

Приоритет отдавался исследованиям, выполненным на пилотном или полномасштабном уровне, а также работам, содержащим сравнительный анализ различных технологий.

Для оценки эффективности кристаллизационной технологии использовались следующие показатели:

- степень извлечения фосфора (процент от общего содержания в исходном материале);
- содержание фосфора в конечном продукте (% P_2O_5 или % P);
- биодоступность фосфора для растений;
- содержание тяжёлых металлов и других загрязнителей;
- энергозатраты процесса; потребление реагентов;
- капитальные и эксплуатационные затраты.

Экономический анализ основывался на данных о стоимости капитального строительства установок различной мощности, операционных расходах (энергия, реагенты, персонал, обслуживание), доходах от продажи продуктов извлечения и экономии на сокращении других затрат очистных сооружений.

Обсуждение результатов

Развитие и внедрение технологий усиленного биологического удаления фосфора (Enhanced Biological Phosphorus Removal, EBPR) в процессах очистки сточных вод привело к повышенной концентрации фосфора в избыточном активном иле, и в целом, во всей системе очистки сточных вод [23]. EBPR представляет собой биотехнологический метод, основанный на культивировании специализированных полифосфат-аккумулирующих организмов (*PAO*). Процесс EBPR реализуется путём циклического воздействия на активный ил анаэробных и аэробных условий.

Механизм EBPR включает две стадии. В анаэробной зоне *PAO* поглощают летучие жирные кислоты (ЛЖК) из сточной воды и накапливают их в клетках в форме полигидроксиалканоатов (ПГА), используя для этого энергию гидролиза внутриклеточных полифосфатов. При этом происходит высвобождение ортофосфатов в жидкую фазу. Одновременно расходуется гликоген для обеспечения восстановительного потенциала. В последующей аэробной зоне *PAO* окисляют накопленные ПГА, получая энергию для роста и

избыточного поглощения фосфора из воды с образованием полифосфатных гранул. Содержание фосфора в биомассе *PAO* может достигать 5-7 % от сухой массы, что в 3-5 раз превышает обычное содержание в бактериальных клетках [24].

Для эффективной работы EBPR критически важно наличие достаточного количества легкодоступных органических веществ, предпочтительно ЛЖК, в анаэробной зоне. При дефиците ЛЖК конкурентное преимущество могут получить гликоген-аккумулирующие организмы (*GAO*), не способные к избыточному накоплению фосфора. Оптимальное время удержания ила для максимального удаления фосфора составляет 16-24 дня при 5°C и 12-17 дней при 10°C. Современные исследования выявили функциональное разнообразие среди различных клад *PAO*, обозначаемых как *PAO*I и *PAO*II. Эти группы различаются по стехиометрии метаболических процессов и способности использовать различные электронные акцепторы. *PAO*I может использовать нитрит, но не нитрат, в качестве акцептора электронов в аноксических условиях, тогда как *PAO*II способна к полноценной денитрификации [25]. Понимание этих различий важно для оптимизации работы систем совместного удаления азота и фосфора.

Основные ограничения EBPR включают:

- чувствительность к колебаниям нагрузки и состава сточных вод;
- необходимость тщательного контроля процесса;
- возможность нестабильной работы при недостатке легкодоступного органического субстрата;
- конкуренция с *GAO*;
- влияние температуры на активность микроорганизмов.

Тем не менее, EBPR характеризуется низкими операционными затратами, отсутствием потребности в химических реагентах для осаждения фосфора и возможностью совмещения с биологическим удалением азота, что делает этот

метод привлекательным для крупных очистных сооружений. Один из методов осаждения фосфора – высвобождение фосфора в растворимую форму при анаэробном сбраживании осадка с последующим осаждением струвита из сброженного осадка или фугата после обезвоживания осадка, что является сутью кристаллизационных технологий извлечения фосфора. Данные технологии основаны на осаждении фосфора в форме минералов и представляют собой наиболее зрелую и широко применяемую группу методов. Ведущее положение занимает осаждение струвита – магний-аммоний-фосфатного минерала с формулой $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ [26].

Образование струвита происходит согласно уравнению реакции:

$$Mg^{2+} + NH_4^+ + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$$

Процесс наиболее эффективен при молярном соотношении Mg:N:P = 1:1:1 и значении pH в диапазоне 8,2-9,0 [10, 19, 27]. Произведение растворимости струвита составляет 10^{-13}, что обеспечивает его стабильность в растворе при достижении соответствующего пересыщения. Проведенный анализ результатов отдельных исследований, представленных в работах [10, 11, 15, 16, 19, 20, 26-28], дал возможность автору установить благоприятные параметры процесса осаждения фосфора в виде струвита из осадков сточных вод (см. табл. 2).

Технологические схемы кристаллизации струвита включают несколько коммерческих решений. Процесс *Pearl*® (компания *Ostara*) использует реактор с псевдоожиженным слоем, где происходит рост кристаллов струвита на затравочных частицах при контролируемом перемешивании [19, 29]. Система обеспечивает эффективность извлечения фосфора до 85-90 % из иловой воды после анаэробного сбраживания осадков с EBPR. Важным преимуществом является получение высококачественного гранулированного продукта *Crystal Green* с размером частиц 2-4 мм, содержащего 12,6% *P* (29% P_2O_5), 9,9% *N* и 9,9% *Mg*.

Таблица 2.

Факторы, влияющие на кристаллизацию струвита

Показатели	Оптимальный диапазон	Положительное влияние с ростом параметра	Отрицательное влияние
pH	8-10,5	При значении более 9 – более высокая эффективность связывания фосфора, скорость роста реакции при 9,5	При значении более 9 снижается чистота, при 10,5 уменьшается размер кристаллов, растет растворимость
Температура и смешивание	15-35°C, 160 об/мин	При увеличении температуры до 50°C вырастает скорость роста кристаллов, изменяется кристаллическая структура, растет индекс насыщения, растворимость, удаление фосфора, скорость зародышеобразования	С ростом температуры снижается чистота, размеры и мутность кристаллов
Добавление магния	Молярное соотношение *Mg*:*P* 1:2	Растет доля связанного фосфора и размер кристаллов	Увеличение стоимости процесса
Посторонние ионы	*Ca*:*Mg* 0,5	Увеличивается эффективность удаления *P*	Уменьшается размер, чистота кристаллов, снижается эффективность удаления фосфора, растет время индукции

Процесс *AirPrex*® (компания *CNP-Technology*) применяет кристаллизацию непосредственно в реакторе, расположенном в линии рециркуляции дигестера [19, 30]. Добавление оксида магния и контроль pH при 8,2-8,3 обеспечивают эффективность извлечения фосфора 94%. Преимущество технологии заключается в предотвращении неконтролируемого образования струвитных отложений в трубопроводах и насосах, что снижает эксплуатационные проблемы.

Процесс *Crystalactor*® (компания *DHV*) использует реактор с циркулирующим псевдоожиженным слоем песка, на поверхности которого происходит кристаллизация фосфатов кальция или струвита в зависимости

от добавляемых реагентов [19, 31]. Технология характеризуется быстрой кинетикой процесса и высокой эффективностью удаления фосфора.

Экспериментальные исследования показывают, что эффективность извлечения фосфора кристаллизацией струвита сильно зависит от концентрации фосфора в исходной воде и pH среды. При снижении концентрации фосфора со 100 до 20 мг/л скорость реакции осаждения уменьшается с 396,65 до 70,46 мг/(л*ч). Это указывает на необходимость работы с концентрированными потоками, такими как иловая вода или фугат после обезвоживания сброженного осадка.

Присутствие ионов кальция в исходной воде может ингибировать образование струвита и влиять на чистоту продукта. Высокие концентрации Ca^{2+} способствуют образованию аморфного фосфата кальция или гидроксиапатита, конкурирующих за фосфат-ионы. Органические вещества в сточной воде также могут воздействовать на морфологию кристаллов струвита и кинетику процесса.

Альтернативой струвиту является кристаллизация фосфатов кальция, включая брушит ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) и гидроксиапатит ($Ca_5(PO_4)_3OH$). Процесс *CalPrex*® основан на осаждении брушита при обработке дигестата органических кислот гидроксидом кальция [32]. Преимуществом кальций-фосфатных продуктов является отсутствие необходимости в дорогостоящем источнике магния, однако их биодоступность для растений ниже, чем у струвита, особенно в щелочных почвах.

Более 50 полномасштабных установок по кристаллизации струвита функционируют по всему миру, демонстрируя технологическую зрелость метода [15, 29]. Однако экономическая целесообразность ограничивается высокой стоимостью источников магния (хлорид магния, оксид магния), которые должны добавляться в стехиометрических количествах. Стоимость магниевых реагентов может составлять значительную долю операционных расходов процесса.

Заключение

Кристаллизационные методы извлечения фосфора из осадков сточных вод представляют собой технологически зрелое и экологически обоснованное решение для преодоления двойственного вызова: предотвращения истощения глобальных запасов фосфатных руд и снижения эвтрофикации водных экосистем. Анализ современного состояния этой области показывает, что кристаллизация струвита остаётся доминирующей коммерческой технологией благодаря высокой степени извлечения фосфора, получению высококачественного продукта и отличной биодоступностью для растений, сопоставимой с синтетическими фосфорными удобрениями.

Более 50 полномасштабных установок по всему миру демонстрируют технологическую надёжность метода и возможность его интеграции в существующие системы очистки сточных вод. Технологические решения, такие как *Pearl*® (*Ostara*), *AirPrex*® (*CNP-Technology*) и *Crystalactor*® (*DHV*), предлагают различные подходы к кристаллизации струвита, обеспечивая гибкость в выборе систем для конкретных условий производства.

Вместе с тем, основным препятствием к широкому внедрению остаётся экономический аспект: стоимость процесса извлечения фосфора (200–800 рублей за килограмм) значительно превышает стоимость первичного фосфатного сырья (50–100 рублей за килограмм). Однако комплексная экономическая оценка, учитывающая косвенные выгоды – сокращение потребления химических реагентов, снижение объёмов образующегося осадка, предотвращение дорогостоящих струвитных отложений в оборудовании, а также экологические выгоды от предотвращения эвтрофикации – существенно улучшает финансовые показатели проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегтярев А. П. Фосфор в биосфере и для человечества: на пороге глобального голода // Биосфера. 2023. Т. 15, № 3. С. 167 – 183. DOI: 10.24855/biosfera.v15i3.818
2. Магазаник Д. В. Мировой рынок фосфатного сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2023. № 4(183). С. 79 – 84.
3. Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации / Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 28 – 33. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-3-028-033
4. Nikitina A. V., Semenyakina A. A. Mathematical modeling of eutrophication processes in Azov Sea on supercomputers // Computational Mathematics and Information Technologies, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 82 – 101. DOI: 10.23947/2587-8999-2017-1-82-101
5. Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В. Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство ГЕОС», 2019. 164 с. DOI: 10.34756/GEOS/2019.16.37827
6. Соколов Л. И., Силинский В. А. Переработка водопроводного осадка в почвогрунт // Управление техносферой. 2022. Т. 5. № 2. С. 181 – 192. DOI: 10.34828/UdSU.2022.65.80.005
7. Харькина О. В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
8. Witek-Krowiak A., Gorazda K., Szopa D., Trzaska K., Moustakas K., Chojnacka K. Phosphorus recovery from wastewater and bio-based waste: an overview, Bioengineered. 2022, vol. 13, issue 5, pp. 13474 – 13506. DOI: 10.1080/21655979.2022.2077894
9. Sichler T.C., Montag D., Barjenbruch M., Mauch T., Sommerfeld T., Ehm J.-H., Adam C. Variation of the element composition of municipal sewage sludges in the context of new regulations on phosphorus recovery in Germany, Environmental Sciences Europe, 2022, vol. 34, 84 p. DOI: 10.1186/s12302-022-00658-4.
10. Матюшенко Е. Н. Удаление фосфора из возвратных потоков площадки очистных сооружений канализации // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. Т.24. №2 (78). С. 40–49.

11. Кофман В. Я. Извлечение азота и фосфора в виде струвита из сточных вод с высоким содержанием биогенов // Водоснабжение и водоотведение, загрязнение водной среды. Зарубежные исследования: сборник статей. М.: Издательский дом ВСТ, 2023. С. 278 – 287.
12. Dyagelev M. Y. Removing Biogenic Elements from Urban Sewage: Technology Review // Lecture Notes in Civil Engineering, 2024, vol. 400, pp. 463 – 473. DOI: 10.1007/978-3-031-47810-9_42
13. Большаков Н. Ю. Метод интенсификации биологической очистки от фосфора на городских очистных сооружениях // Гидротехника. 2024. № 2(75). С. 39 – 43.
14. Франк Ю. А., Ивасенко Д. А., Герасимчук А. Л. Перспективы биокомпостирования органических отходов в условиях низких температур // Управление техносферой. 2022. Т. 5, № 2. С. 208 – 220. DOI: 10.34828/UdSU.2022.34.23.007.
15. Donatello S., Donatello S., Cheeseman C. R. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): a review, Waste Management, 2013, vol. 33, issue. 11, pp. 2328 – 2340. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.024
16. Dou Y., Du Y., Xu Y., Li Y., Wu X., Wang D. Phosphorus recovery from sewage sludge: progress, challenges, policies, and future directions, Chemical Engineering Journal, 2025, vol. 520, pp. 165735. DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2025.165735.
17. Влияние редокс-потенциала на фосфатацию иловой жидкости в технологиях биологического удаления фосфора / В. А. Юрченко, А. В. Смирнов, М. А. Есин, Ю. С. Левашова // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3(79). С. 26 – 37. – DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.26-37.
18. Daneshgar S., Callegari A., Capodaglio A.G., Vaccari D. The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review, Resources, 2018, vol. 7, p. 37. DOI: 10.3390/resources7020037.
19. Дягелев М. Ю. Австрийский опыт удаления соединений фосфора из осадков сточных вод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 3(47). С. 48 – 65. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04.
20. Ружицкая О. А., Липатов В. С., Жолобова А. В. Анализ физико-химических методов удаления фосфора из сточных вод с целью получения струвита // Системные технологии. 2023. № 2(47). С. 84 – 92. DOI: 10.55287/22275398_2023_2_84.

21. Molinos-Senante M., Hernández-Sancho F., Sala-Garrido R., Garrido-Baserba M. Economic Feasibility Study for Phosphorus Recovery Processes, Ambio, 2010, vol. 40, pp. 408 – 416. DOI: 10.1007/s13280-010-0101-9.
22. Vučić V., Harms H., Müller S. Vučić, V. Biological recovery of phosphorus (BioP-Rec) from wastewater streams using brewer's yeast on pilot-scale, Engineering in Life Sciences, 2023, vol. 24, P. e2300208. DOI: 10.1002/elsc.202300208
23. Ершова О. И. Оптимизация работы очистных сооружений канализации. Глубокое удаление фосфатов из хозяйственно-бытовых сточных вод // Бурение и нефть. 2019. № 10. С. 46-47.
24. Tian W.-D., Lopez-Vazquez C.M., Li W.-G., Brdjanovic D., Van Loosdrecht M.C.M. Occurrence of PAOI in a low temperature EBPR system, Chemosphere, 2013, vol. 92, issue. 10, pp. 1314 – 1320. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.05.009.
25. Tayà C., Garlapati V. K., Guisasola A., Baeza J. A. The selective role of nitrite in the PAO/GAO competition, Chemosphere, 2013, vol. 93, issue. 4, pp. 612 – 618. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.006
26. Инновационные направления развития Люберецких очистных сооружений / А. М. Пономаренко, Д. Ю. Власов, Н. А. Белов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 1. С. 36–48. DOI: 10.35776/VST.2021.01.05.
27. Яковлева А. А., Якушева Н. И., Федотова О. А. Способы получения струвита из сточных вод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2019. № 4. С. 62–72. DOI: 10.15593/2224-9400/2019.4.06.
28. Олинджер К. Н., Махмуд Р. Д. Определение возможности образования осадка струвита с помощью компьютерной модели // Вода и экология: проблемы и решения. 2004. № 4(21). С. 40 – 48.
29. Amann A., Zoboli O., Krampe J., Rechberger H., Zessner M., Egle L. Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater, Resources, Conservation and Recycling, 2018, vol. 130, pp. 127 – 139. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.002.
30. Long A., Weber N., Krampe J., Peer S., Rechberger H., Zessner M., Zoboli O. Multi-criteria analysis of strategies towards sustainable recycling of phosphorus from sewage sludge in Austria, Journal of Environmental Management, 2024, vol. 362, P. 121339. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121339.

31. Santos A. F., Almeida P. V., Alvarenga P., Gando-Ferreira L. M., Quina M. J. From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries, Chemosphere, 2021, vol. 284, P. 131258. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131258
32. Zhao Q., Ying H., Liu Y., Wang H., Xu J., Wang W., Ren J., Meng S., Wang N., Mu R., Wang S, Li J. Towards low energy-carbon footprint: Current versus potential P recovery paths in domestic wastewater treatment plants, Journal of Environmental Management, 2023, vol. 344, P. 118653. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118653.

Поступила в редакцию: 12.12.25

Сведения об авторе

Дягелев Михаил Юрьевич
к.т.н., доцент кафедры «Водоснабжение и водоподготовка», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», 426069, ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, Россия. E-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

M.Yu. Dyagelev

CRYSTALLIZATION METHODS FOR EXTRACTING PHOSPHORUS FROM WASTEWATER SEDIMENTS

Annotation. The article is devoted to a systematic analysis of crystallization methods for extracting phosphorus from wastewater sludge, which is one of the most promising approaches to solving the global problem of depleting phosphate ore reserves and preventing eutrophication of water bodies. The article discusses the main forms of phosphorus in the sludge, classifies modern technologies for extracting phosphorus (crystallization, biological, thermal, chemical, and physical methods), and analyzes their technological features. Special attention is given to the crystallization of struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), which is the most mature and widely used technology for efficiently extracting phosphorus. The requirements for the quality of the resulting products, including the bioavailability of phosphorus for plants and the content of heavy metals, are considered. Economic barriers and indirect benefits from the implementation of technologies are analyzed.
Keywords: phosphorus, sewage sludge, struvite; crystallization, biological phosphorus removal, pyrolysis, magnetic separation; circular economy.

For citation: Dyagelev M.Yu. [Crystallization methods for extracting phosphorus from wastewater sediments] *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 2, pp. 360–380. DOI: 10.35634/UdSU.2026.58.63.007. (In Russ.).

REFERENCES

1. Degyarev A.P. Fosfor v biosfere i dlya chelovechestva: na poroge global'nogo goloda [Phosphorus in the Biosphere and for Humanity: On the Verge of Global Hunger]. *Biosfera* [*Biosphere*], 2023, vol. 15, no. 3, pp. 167 – 183. DOI: 10.24855/biosfera.v15i3.818 (In Russ.).
2. Magazanik D.V. Mirovoi rynok fosfatnogo syr'ya [Global Market of Phosphate Raw Materials]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [*Mineral Resources of Russia. Economics and Management*], 2023, no. 4(183), pp. 79 – 84. (In Russ.).
3. Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov dlya opredeleniya granits vodoemov i izucheniya processov evtroficacii [Using Space Images to Determine Water Boundaries and Study Eutrophication Processes]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [*Theoretical and Applied Ecology*], 2019, no. 3, pp. 28 – 33. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-3-028-033 (In Russ.).

4. Nikitina A.V., Semenyakina A.A. Mathematical modeling of eutrophication processes in Azov Sea on supercomputers. *Computational Mathematics and Information Technologies*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 82 – 101. DOI: 10.23947/2587-8999-2017-1-82-101.
5. Yunev O.A., Konovalov S.K., Velikova V. Antropogennaya evtroficaciya v pelagicheskoi zone Chernogo morya: dolgovremennye trendy, mekhanizmy, posledstviya [Anthropogenic Eutrophication in the Pelagic Zone of the Black Sea: Long-term Trends, Mechanisms, Consequences]. Moscow, Publ., GEOS, 2019, 164 p. DOI: 10.34756/GEOS/2019.16.37827 (In Russ.).
6. Sokolov L.I., Silinskii V.A. Pererabotka vodoprovodnogo osadka v pochvogrunt [Processing Water Supply Sludge into Soil Ground]. *Upravlenie tekhnosferoi* [*Management of the technosphere*], 2022, vol. 5, no. 2, pp. 181 – 192. DOI: 10.34828/UdSU.2022.65.80.005 (In Russ.).
7. Khar'kina O.V. Effektivnaya ekspluataciya i raschet sooruzhenij biologicheskoi ochistki stochnykh vod [Efficient Operation and Calculation of Facilities for Biological Treatment of Wastewater]. Volgograd, Panorama, 2015, 433 p. (In Russ.).
8. Witek-Krowiak A., Gorazda K., Szopa D., Trzaska K., Moustakas K., Chojnacka K. Phosphorus recovery from wastewater and bio-based waste: an overview. *Bioengineered*, 2022, vol. 13, issue. 5, pp. 13474 – 13506. DOI: 10.1080/21655979.2022.2077894.
9. Sichler T.C., Montag D., Barjenbruch M., Mauch T., Sommerfeld T., Ehm J.-H., Adam C. Variation of the element composition of municipal sewage sludges in the context of new regulations on phosphorus recovery in Germany. *Environmental Sciences Europe*, 2022, vol. 34, p. 84. DOI: 10.1186/s12302-022-00658-4.
10. Matyushenko E.N. Udalenie fosfora iz vozvratnykh potokov ploshchadki ochistnykh sooruzhenij kanalizacii [Phosphorus Removal from Return Flows at the Wastewater Treatment Plant Site]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [*Water and Ecology: Problems and Solutions*], 2019, vol. 24, no. 2(78), pp. 40 – 49 (In Russ.).
11. Kofman V.Ya. Izvlechenie azota i fosfora v vide struvita iz stochnykh vod s vysokim soderzhaniem biogenov [Extraction of Nitrogen and Phosphorus as Struvite from Wastewater with High Content of Biogenic Elements]. Vodosnabzhenie i vodootvedenie, zagryaznenie vodnoi sredy. Zarubezhnye issledovaniya: Sbornik statei [Water Supply and Sewerage, Water Environmental Pollution. Foreign Research: Collected Papers]. Moscow, Publ., VCT, 2023, pp. 278 – 287. (In Russ.).

12. Dyagelev M.Y. Removing Biogenic Elements from Urban Sewage: Technology Review. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024, vol. 400, pp. 463 – 473. DOI: 10.1007/978-3-031-47810-9_42
13. Bol'shakov N.Yu. Metod intensifikacii biologicheskoi ochistki ot fosfora na gorodskikh ochistnykh sooruzheniyakh [Method of Intensification of Biological Phosphorus Removal at Urban Wastewater Treatment Plants]. *Gidrotekkhnika* [*Hydraulic Engineering*], 2024, no. 2(75), pp. 39 – 43. (In Russ.).
14. Frank Yu.A., Ivasenko D.A., Gerasimchuk A.L. Perspektivy biokompostirovaniya organicheskikh otkhodov v usloviyakh nizkikh temperature [Prospects for Biocomposting of Organic Waste under Low Temperature Conditions]. *Upravlenie tekhnosferoi* [*Management of the technosphere*], 2022, vol. 5, no. 2, pp. 208 – 220. DOI: 10.34828/UdSU.2022.34.23.007 (In Russ.).
15. Donatello S., Cheeseman C.R. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Management*, 2013, vol. 33, issue 11, pp. 2328 – 2340. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.024
16. Dou Y., Du Y., Xu Y., Li Y., Wu X., Wang D. Phosphorus recovery from sewage sludge: Progress, challenges, policies, and future directions. *Chemical Engineering Journal*, 2025, vol. 520, p. 165735. DOI: 10.1016/j.cej.2025.165735.
17. Yurchenko V.A., Smirnov A.V., Esin M.A., Levashova Yu.S. Vliyanie redoks-potenciala na fosfataziju ilovoi zhidkosti v tekhnologiyakh biologicheskogo udaleniya fosfora [Influence of Redox Potential on Phosphatation of Sludge Liquor in Biological Phosphorus Removal Technologies]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [*Water and Ecology: Problems and Solutions*], 2019, no. 3(79), pp. 26 – 37. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.26-37 (In Russ.).
18. Daneshgar S., Callegari A., Capodaglio A.G., Vaccari D. The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review. *Resources*, 2018, vol. 7, p. 37. DOI: 10.3390/resources7020037.
19. Dyagelev M.Yu. Avstriiskii opyt udaleniya soedinenii fosfora iz osadkov stochnykh vod [Austrian Experience in Removing Phosphorus Compounds from Wastewater Sludge]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika* [*Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanism*], 2022, no. 3(47), pp. 48 – 65. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04 (In Russ.).
20. Ruzhitskaya O.A., Lipatov V.S., Zholobova A.V. Analiz fiziko-khimicheskikh metodov udaleniya fosfora iz stochnykh vod s cel'yu polucheniya struvita [Analysis of Physicochemical

Methods for Phosphorus Removal from Wastewater for Struvite Production]. *Sistemnye tekhnologii* [*System Technologies*], 2023, no. 2(47), pp. 84 – 92. DOI: 10.55287/22275398_2023_2_84 (In Russ.).

21. Molinos-Senante M., Hernández-Sancho F., Sala-Garrido R., Garrido-Baserba M. Economic Feasibility Study for Phosphorus Recovery Processes. *Ambio*, 2010, vol. 40, pp. 408 – 416. DOI: 10.1007/s13280-010-0101-9.
22. Vučić V., Harms H., Müller S. Biological recovery of phosphorus (BioP-Rec) from wastewater streams using brewer's yeast on pilot-scale. *Engineering in Life Sciences*, 2023, vol. 24, p. e2300208. DOI: 10.1002/elsc.202300208.
23. Ershova O.I. Optimizaciya raboty ochistnykh sooruzhenij kanalizacii. Glubokoe udalenie fosfatov iz khozyaistvenno-bytovykh stochnykh vod [Optimization of Wastewater Treatment Plants. Deep Removal of Phosphates from Domestic Wastewater]. *Burenie i neft'* [*Drilling and Oil*], 2019, no. 10, pp. 46-47. (In Russ.).
24. Tian W.-D., Lopez-Vazquez C.M., Li W.-G., Brdjanovic D., van Loosdrecht M.C.M. Occurrence of PAOI in a low temperature EBPR system. *Chemosphere*, 2013, vol. 92, issue 10, pp. 1314 – 1320. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.05.009.
25. Tayà C., Garlapati V.K., Guisasola A., Baeza J.A. The selective role of nitrite in the PAO/GAO competition. *Chemosphere*, 2013, vol. 93, issue 4, pp. 612 – 618. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.006.
26. Ponomarenko A.M., Vlasov D.Yu., Belov N.A., et al. Innovacionnye napravleniya razvitiya Lyubereckhikh ochistnykh sooruzhenij [Innovative Directions in the Development of Lyubertsy Wastewater Treatment Plants]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [*Water Supply and Sanitary Engineering*], 2021, no. 1, pp. 36 – 48. DOI: 10.35776/VST.2021.01.05 (In Russ.).
27. Yakovleva A.A., Yakusheva N.I., Fedotova O.A. Sposoby polucheniya struvita iz stochnykh vod [Methods for Obtaining Struvite from Wastewater]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [*Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*], 2019, no. 4, pp. 62 – 72. DOI: 10.15593/2224-9400/2019.4.06 (In Russ.).
28. Olindzher K.N., Makhmud R.D. Opredelenie vozmozhnosti obrazovaniya osadka struvita s pomoshch'yu komp'yuternoi modeli [Determination of the Possibility of Struvite Precipitate Formation Using Computer Modeling]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [*Water and Ecology: Problems and Solutions*], 2004, no. 4(21), pp. 40 – 48. (In Russ.).

29. Amann A., Zoboli O., Krampe J., Rechberger H., Zessner M., Egle L. Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 130, pp. 127 – 139. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.002.
30. Long A., Weber N., Krampe J., Peer S., Rechberger H., Zessner M., Zoboli O. Multi-criteria analysis of strategies towards sustainable recycling of phosphorus from sewage sludge in Austria. *Journal of Environmental Management*, 2024, vol. 362, p. 121339. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121339.
31. Santos A.F., Almeida P.V., Alvarenga P., Gando-Ferreira L.M., Quina M.J. From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries. *Chemosphere*, 2021, vol. 284, p. 131258. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131258.
32. Zhao Q., Ying H., Liu Y., Wang H., Xu J., Wang W., Ren J., Meng S., Wang N., Mu R., Wang S., Li J. Towards low energy-carbon footprint: Current versus potential P recovery paths in domestic wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 344, p. 118653. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118653.

Received: 12.12.25

About the Author

Dyagelev Mikhail Yurievich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Water Treatment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, 426069, Studencheskaya Street, 7, Izhevsk, Russia. E-mail: mdyagelev@yandex.ru