

DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04

УДК 628.316.12

М.Ю. Дягелев

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

АВСТРИЙСКИЙ ОПЫТ УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА ИЗ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

Проведен обзор опыта и технологий удаления фосфора из осадков сточных вод, который применяется на очистных сооружениях Австрии. В последнее десятилетие в Австрии произошел сдвиг парадигмы очистки сточных вод от загрязняющих веществ на очистных сооружениях в сторону использования сточных вод и образующихся осадков сточных вод в качестве источника для извлечения ресурсов. Этот сдвиг сопровождается разработкой и применением нового европейского законодательства, направленного на более полное извлечение ресурсов из сточных вод. Однако длительный срок службы и множество требований к очистке требуют тщательного изучения того, как можно обеспечить устойчивое восстановление ресурсов. В работе основной акцент сделан на технологии извлечения фосфора из сточных вод и осадка сточных вод, приведены данные австрийских очистных сооружений, где используется технология глубокой очистки от фосфора и обработка осадка на очистных сооружениях населенных пунктов с населением более 2000 эквивалентного числа жителей. Среди применяемых технологий извлечения фосфора были рассмотрены метод извлечения фосфора из золы осадка сточных вод, метод прямого нанесения на почву сброженного осадка, извлечения фосфора из сточных вод химическим осаждением, адсорбцией, ионным обменом и биологическое поглощение. Результаты данного обзора могут быть полезными для других авторов и технологов, поскольку они описывают текущее состояние дел в Австрии и потенциально могут помочь в разработке стратегий очистки сточных вод и извлечения фосфора.

Ключевые слова: сточные воды, осадок сточных вод, удаление фосфора, стабилизация осадка, качество осадка, производство шлама.

Традиционная очистка сточных вод с помощью активного ила (механическая, биологическая и/или химическая) хорошо зарекомендовала себя и использовалась повсеместно к концу 1990-х гг. [1]. Однако в XXI в. в центре внимания оказались новые проблемы, связанные с очисткой сточных вод: сокращение потребления энергии [1–4], ужесточение требований к качеству сточных вод по углероду и питательным веществам [5], восстановление ресурсов [6, 7], повторное использование сточных вод [8, 9] и удаление специфических загрязняющих веществ [10, 11] и генов устойчивости к антибиотикам [12–15]. Это лишь некоторые из новых проблем. При этом решение ряда новых задач в области очистки сточных вод может иметь негативные побочные эффекты для окружающей среды из-за более высокой энергетической и/или материальной стоимости их решения [16]. Кроме того, основная функция очистных сооружений – безопасное и рентабельное удаление основных загрязнителей – не должна быть

нарушена будущим расширением спектра решаемых задач или изменением технологии очистки. Таким образом, принятие новых требований и конфигураций станций требует тщательного планирования, в первую очередь основанного на подробной информации о текущем состоянии, инфраструктуре и производительности очистных сооружений.

В данном ключе достаточно познавательным является пример Федерального министерства Австрийской Республики по борьбе с изменением климата, окружающей среды, энергетики, мобильности, инноваций и технологий (Federal Ministry of the Republic of Austria for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology), которое в настоящее время разрабатывает новую директиву¹ по извлечению фосфора из городских сточных вод. Возможность использования очистных сооружений для извлечения фосфора зависит от множества проектных параметров и инфраструктуры обработки осадка. Большое значение для потенциала восстановления фосфора имеет реализуемая технология удаления фосфора на очистных сооружениях (глубокое биологическое удаление фосфора или химическое удаление с использованием солей железа и алюминия) [17, 18], влияющая на биодоступность фосфора в иле [7] и золе после сжигания осадков сточных вод [19]. При химическом связывании фосфора из осадков сточных вод в виде струвитов более высокие концентрации фосфора будут преимуществом при использовании установок регенерации [20]. Технология извлечения фосфора из золы осадков сточных вод конкурирует в основном с технологией извлечения фосфора из фосфатной породы, где содержание фосфора, как правило, выше [21]. Поскольку при сжигании остаются только неорганические компоненты осадка, концентрация фосфора в активном иле сама по себе не будет коррелировать с концентрацией фосфора в золе ила. Поэтому необходима информация о содержании неорганического вещества в осадке. Помимо фосфора, концентрация тяжелых металлов также будет определять пригодность золы осадка для извлечения фосфора [22, 23].

Содержание фосфора в осадках сточных вод. Содержание фосфора и его соединений в городских сточных водах зависит от уровня жизни населения, степени урбанизации и уровня индустриального развития. На состав городских стоков в значительной степени влияют изменения в потреблении воды абонентами, инфильтрация и эксфильтрация. Концентрированные стоки наблюдаются при низком водопотреблении и/или

¹ BMK. Federal Waste Management Plan 2017. Part 1; Technical Report; Federal Ministry of the Republic of Austria for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology (BMK): Vienna, Austria, 2018.

небольшом объеме инфильтрации. Разбавленные стоки, напротив, являются результатом высокого водопотребления и значительного объема инфильтрации [17].

Количество фосфатов, поступающих в городскую канализационную сеть от промышленных и коммерческих предприятий города, может изменяться в широких пределах и зависит от количественных и качественных характеристик производственных стоков [1, 17]. Для городских сточных вод фосфаты отходов жизнедеятельности человека составляют порядка 0,6 кг фосфора фосфатов (P-PO₄) на человека в год, фосфаты, содержащиеся в моющих и чистящих средствах, – около 0,5 кг P-PO₄ на человека в год [24, 25].

Основная часть фосфора находится в городских сточных водах и растворенной форме – около 50 % в виде полифосфатов. Только порядка 10–20 % общего фосфора находится в нерастворенном виде и осаждается в первичных отстойниках без добавления реагентов [25]. В результате механической и биологической очистки сточных вод на очистных сооружениях образуются два основных продукта – очищенная вода и осадок сточных вод [26].

Очистка сточных вод в Австрии происходит в основном с помощью традиционной системы, включающей механическую очистку и биологическую очистку в аэротенках. Обычная аэробная стабилизация осадка в основном используется на очистных сооружениях менее 20 000 эквивалентного числа жителей (ЭЧЖ), в то время как анаэробная стабилизация посредством сбраживания в метантенках чаще применяется на очистных сооружениях мощностью более 20 000 ЭЧЖ. Другие технологии очистки встречаются редко, в большинстве случаев это реакторы периодического действия на небольших очистных сооружениях (крупнейшая установка SBR на 60 000 ЭЧЖ) [27]. При этом, если содержание фосфора в очищенной воде регламентируется, в Австрии данный норматив составляет не более 0,5 мг/л для отдельных очистных сооружений, или не менее 70 % эффективности очистки [28] (в России на выпуске в водоемы рыбохозяйственного назначения концентрация фосфора не должна превышать 0,05 мг/л для олиготрофных, 0,15 для мезотрофных и 0,2 для эвтрофных (по Р) водоемов²), то содержание фосфора в осадке сточных вод ничем не регламенти-

² Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс]: приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

ровано и высокие концентрации фосфора часто становятся проблемой на очистных сооружениях в Австрии при дальнейшей обработке осадка. Так, во время анаэробного сбраживания осадка сточных вод высвобождается большая часть фосфора, находящегося в осадке в виде полифосфатов, и часть фосфора, присутствующего в органическом веществе. Фосфор, высвобождаемый при анаэробном сбраживании в метантенках, осаждается в виде фосфатов металлов на стенках отводящих трубопроводов и сооружений, используемых для обезвоживания осадка [29]. При этом чаще всего образуются гидроксипатит и струвит, которые можно использовать в сельском хозяйстве в качестве удобрения пролонгированного действия. Поэтому решение проблем извлечения фосфора как из сточных вод, так и из осадков сточных вод является актуальной проблемой для Австрии и Европейского союза (ЕС). В связи с этим Европейская комиссия пересмотрела Регламент ЕС об удобрениях ((ЕС) 2003/2003) и опубликовала новый Регламент ЕС ((ЕС) 2019/1009), который включает удобрения на основе вторичного сырья [30]. В свою очередь, Австрия разработала федеральный план управления отходами на 2017 г. для стимулирования извлечения фосфора [31]. Принимая во внимание ограничения, указанные в табл. 1, правительство Австрии указывает на возможный 25-процентный потенциал замещения используемых природных ресурсов в виде фосфатов за счет извлечения фосфора из очистных сооружений, что снижает зависимость Австрии от импорта фосфатов. При этом технология моносжигания осадка сточных вод и последующее восстановление фосфора считается многообещающим подходом для достижения этих целей [16, 27, 31], но также рассматриваются и другие технологии извлечения фосфора.

Таблица 1

Действующее законодательство стратегии извлечения фосфора из канализационных стоков в Австрии [31]

Законодательство	Состояние реализации	Задача	Установленные ограничения
Регламент (ЕС) 2019/1009: удобрения	Выполняется	Устанавливает правила размещения на рынке удобрений ЕС	Минимальное содержание питательных веществ; пределы содержания загрязняющих веществ в удобрениях
Австрия: Федеральный план управления отходами, 2017 г.	Выполняется	Уменьшить количество производимых отходов	Восстановление P и снижение его концентрации на выпуске из очистных сооружений до 20 % или сжигание; извлечение 65–85 % P из осадков сточных вод к 2030 г.

Методы извлечения фосфора из осадков сточных вод. На рис. 1 обобщены технологии и европейские проекты по извлечению фосфора на очистных сооружениях, где процессы классифицированы в соответствии с конкретным источником фосфора (осадок сточных вод, зола осадка сточных вод и сточные воды) [31].

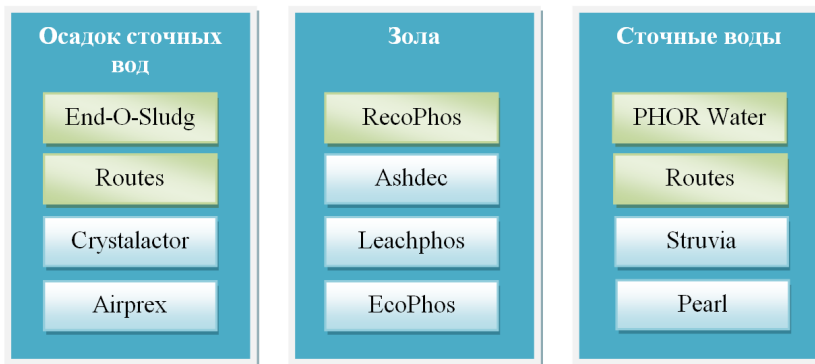


Рис. 1. Технологии восстановления фосфора и европейские исследовательские проекты (голубой – технология; зеленый – проект)

Извлечение фосфора из сточных вод. Удаление и извлечение фосфора из жидкой фазы на очистных сооружениях имеет решающее значение для соблюдения предельных значений сброса, установленных Директивой 91/271/ЕЕС, и, следовательно, для предотвращения эвтрофикации в водоемах. В сточных водах стратегии восстановления можно разделить на химическое осаждение, адсорбцию, ионный обмен и биологическое поглощение (рис. 2). В настоящее время наиболее широко используемыми технологиями извлечения фосфора являются технологии, основанные на химическом осаждении и адсорбции.

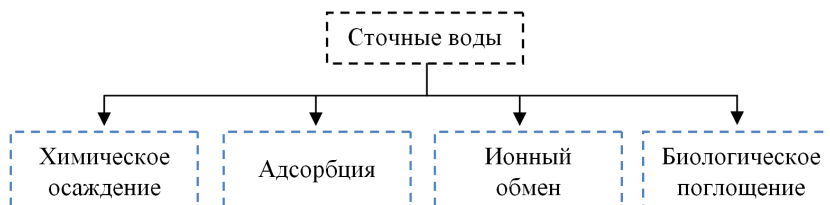


Рис. 2. Основные методы извлечения фосфора из сточных вод

Фосфор может осаждаться в виде фосфорных минералов, в основном в форме струвита или гидроксипатита. Хотя осаждение может происхо-

дить самопроизвольно, процесс обычно инициируется добавлением ионов двух- или трехвалентных металлов, таких как магний (Mg^{2+}), кальций (Ca^{2+}), алюминий (Al^{3+}) или трехвалентное железо (Fe^{3+}), особенно в сточных водах с наличием различных примесей [20, 24]. Как правило, ионы кальция и магния являются выбранными осаждающими агентами, используемыми для извлечения P, и добавляются в форме щелочных веществ (например, MgO и $Ca(OH)_2$) или солей (например, $MgCl_2$ и $CaCl_2$). В научной литературе имеется лишь небольшая информация об использовании осадков для замены этих обычных агентов в перспективе экономики замкнутого цикла. Реакция между этими ионами и фосфатом может привести к образованию двух различных конечных продуктов: гидроксиапатита $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ (уравнение (1)) и струвита $MgNH_4PO_4 \cdot nH_2O$ (уравнение (2)) [24, 30]:



В научной литературе восстановление фосфора путем осаждения сосредоточено на струвитных подходах, а не на других фосфорных минералах. Основными параметрами, сильно влияющими на процесс осаждения, являются pH и доза осадителя (молярное соотношение P и осаждающего агента). Согласно L. Egle и др. [32] и Y. Ye и др. [33], теоретическое молярное соотношение $Mg : N : P$, необходимое для осаждения струвита, составляет $1 : 1 : 1$, тогда как для гидроксиапатита молярное соотношение, необходимое для молярного содержания $Ca : P$, составляет $1,7 : 1$. Напротив, другие авторы утверждают, что для осаждения струвитов наилучшее соотношение $Mg : P$ составляет $1,05 : 1$, в то время как в технических масштабах уровень должен поддерживаться на уровне $1,3 : 1$. Соответственно молярное соотношение $N : P$ должно быть не менее $1 : 1$.

Австрийские очистные сооружения практически 90 % всего фосфора из поступающих сточных вод [27] удаляют технологией химического осаждения (табл. 2, 3). При этом чаще всего используются реагенты на основе ионов железа во всех классах очистных сооружений, и вероятность его использования увеличивается с увеличением производительности очистных сооружений. Реагенты на основе алюминия применяются примерно в 10 % случаев, в основном на очистных сооружениях производительностью менее 50 000 ЭЧЖ (~21 %). Реагенты на основе и алюминия, и железа используются в 11 % очистных сооружений производительностью

ниже 100 000 ЭЧЖ (19–27 %). Другие реагенты, такие как известь, применяются редко и только на сооружениях менее 100 000 ЭЧЖ.

Таблица 2

Распределение очистных сооружений Австрии по используемому осаждающему реагенту [27]

Показатель	Эквивалентное число жителей			
	от 2000 до 20 000	от 20 000 до 50 000	от 50 000 до 100 000	Свыше 100 000
Количество очистных сооружений	439	125	33	36
Процентное распределение сооружений по нагрузке очищаемого химического потребления кислорода, %	5	19	10	66
Процентное распределение сооружений по нагрузке очищаемого Р, %	14	19	9	58
Количество сооружений, где используется реагентное осаждение фосфора	114	97	25	28

Таблица 3

Распределение очистных сооружений по используемому реагенту в каждой категории ЭЧЖ

Показатель	Эквивалентное число жителей			
	от 2000 до 20 000	от 20 000 до 50 000	от 50 000 до 100 000	Свыше 100 000
Алюминий-содержащие реагенты, %	22	20	9	6
Железо-содержащие реагенты, %	49	47	59	89
Смесь реагентов с содержанием алюминия и железа, %	19	28	27	4
Другие реагенты, %	10	5	6	0

Двумя основными параметрами, влияющими на процесс адсорбции, являются рН раствора и дозировка адсорбента. рН раствора может влиять как на заряд поверхности адсорбента, так и на образование ионов ортофосфата. Нулевой заряд адсорбента играет важную роль, поскольку он определяет оптимальный диапазон рН для увеличения адсорбции. Таким образом, в зависимости от свойств адсорбента следует выбирать различные диапазоны рН для оптимизации эффективности, которая также определяется различными видами фосфатов в растворе.

Дозу адсорбента следует выбирать в соответствии с исходной концентрацией, поскольку высокая доза адсорбента может обеспечить боль-

шее количество активных центров для ионов фосфата. Так, анализ исследований показал, что адсорбенты на основе Mg-биоугля обладают более высокой адсорбционной способностью (> 100 мг P-PO₄/г). Однако следует отметить, что большинство исследований проводилось с использованием синтетических растворов вместо реальных сточных вод. Действительно, существующие в сточных водах ионы (такие как SO₄²⁻, NO₃³⁻ и Cl⁻) могут препятствовать адсорбции P. Несмотря на это, в некоторых исследованиях сообщалось, что эффективность удаления не снижалась при использовании настоящих сточных вод, когда в качестве адсорбента использовался слабокальцинированный магнезит. W.J. Xia с соавторами [34] пришли к выводу, что одновалентные анионы оказывают незначительное влияние на характеристики адсорбента, в то время как двухвалентные анионы (например, CO₃²⁻) могут снижать адсорбционную способность примерно на 30 %, сильно конкурируя с фосфатами за места адсорбции.

Процесс ионного обмена также широко исследовался и использовался при очистке сточных вод с некоторым применением в конкретных процессах, таких как предварительная очистка сточных вод кожевенного завода для удаления Cr (III). Что касается извлечения фосфора, то исследований, посвящённых ионному обмену для удаления фосфора из реальных сточных вод, достаточно мало. A. Bottini и L. Rizzo [35] изучали эффективность процессов ионного обмена в синтетических растворах (350 мг P-PO₄/л) и образцах шлама (475 мг P-PO₄/л) с использованием анионного оксида железа. Результаты показали, что эффективность поглощения P была ниже для образцов шлама по сравнению с синтетическими растворами, что указывает на то, что некоторые виды, такие как органические вещества и коллоиды, могут мешать процессу. Тем не менее эффективность извлечения фосфора на этапе регенерации составила около 95 %.

Что касается стратегий биологического поглощения, то одним из наиболее часто используемых методов является глубокое биологическое удаление фосфора. Этот метод позволяет извлекать органический P, хотя перед повторным использованием может потребоваться дополнительная обработка. Некоторые из полномасштабных технологий требуют предварительного накопления P с помощью метода глубокого биологического удаления фосфора, что показывает важность этого процесса. Данный метод основан на обогащении микробного сообщества полифосфатаккумулирующими организмами (ПАО), способными накапливать P внутриклеточно в виде полимеризованного фосфата [1, 6, 7, 17]. Эти ПАО поочередно подвергаются воздействию анаэробных и аэробных условий. Фосфор, полученный в данном случае, можно осадить и извлечь в виде

струвита, но концентрация ортофосфатов, как правило, ниже, чем в обычной системе с активным илом.

Несмотря на хорошую эффективность, продемонстрированную отдельными технологиями извлечения фосфора, интеграция некоторых из них позволяет достичь еще лучших результатов с эффективностью извлечения 99 % и конечными концентрациями общего фосфора ниже 0,1 мг/л. Действительно, Н. Zou и Z. Wang [36] разработали новый процесс глубокого удаления фосфора в сочетании с кристаллизацией фосфора в виде струвита. При этом удалось получить эффективность извлечения выше 85 %, и около 60 % фосфора было извлечено в виде гидроксиапатита для дальнейшего применения.

Сжигание осадка сточных вод. В связи с опасениями и правовыми ограничениями, связанными с внесением осадка сточных вод в землю, была разработана альтернатива для косвенного извлечения фосфора из осадков сточных вод. Термическая обработка (например, сжигание) стала одной из основных используемых технологий, которая обладает определенными преимуществами, такими как уменьшение объема осадка, уничтожение патогенных микроорганизмов и токсичных органических молекул, рекуперация энергии и образование ценных побочных продуктов [31]. Такие страны, как Германия, Словения, Нидерланды и Швейцария, выбрали данную технологию в качестве стратегии в обращении с осадками сточных вод. При сжигании P термически стабилен и не улетучивается, оставаясь сконцентрированным в золе. Тем не менее есть два основных препятствия для повторного использования фосфора из золы осадка сточных вод:

- фосфор, зафиксированный в твердой фазе, имеет низкую доступность для растений;
- тяжелые металлы, присутствующие в золе, часто превышают предельно допустимую концентрацию.

Основными элементами золы являются Ca, Si, Al и Fe, которые имеют большую активность с фосфором, что влияет на его видообразование. Согласно Q. Wang и соавторам [37], фосфат кальция, пирофосфат кальция и гидроксиапатит могут образовываться при сжигании при высоких температурах. X. Meng и соавторы [38] в своем обзоре указали, что сжигание следует проводить при температуре ниже 700 °C, чтобы предотвратить образование биологически недоступных соединений фосфора, таких как нерастворимый гидроксиапатит. Таким образом, извлечение фосфора из золы осадков сточных вод может быть сосредоточено на технологиях экстракции.

Химическое выщелачивание является наиболее распространенным методом извлечения фосфора из осадка сточных вод. Как правило, выщелачивание кислотами дает лучшие результаты, чем щелочными растворами, особенно в сильноокислых условиях (диапазон рН от 1 до 2). С одной стороны, этот метод имеет преимущества в виде низкого энергопотребления и производства фосфорной кислоты и других фосфатных продуктов. С другой стороны, несмотря на смену видов фосфора (например, Са-Р, Fe-Р и Al-Р), несколько других металлов одновременно растворяются вместе с фосфором. Важно отметить, что потенциально токсичные металлы могут осаждаться вместе с фосфором при повышении рН. Так, Al и Fe могут образовывать связи с P, образуя минералы Fe-Р и Al-Р при значении рН от 3 до 4, и присутствие этих примесей затрудняет применение конечного продукта в окружающей среде. Таким образом, экстракты должны быть очищены (например, путем осаждения, жидкостной экстракции, ионного обмена) перед их использованием в качестве фосфорных удобрений.

Согласно L. Fang и соавторам [39], на извлечение фосфора из кислых экстрактов золы осадков сточных вод сильно влияют примеси, особенно, тяжелые металлы. В данном исследовании был разработан двухэтапный метод экстракции для получения высокоочищенного экстракта фосфора. Осадок сточных вод, получаемый по технологии глубокого удаления фосфора, сжигали и затем обрабатывали серной кислотой. Результаты показали, что двухэтапный метод экстракции привел к эффективному снижению концентрации одиннадцати металлов по сравнению с одностадийным методом, в то время как первый метод давал осадок с высоким содержанием Са, но низким содержанием примесей Fe и Al. M. Li и соавторы [40] подтвердили, что увеличение концентрации экстракта (особенно с HNO₃) улучшили извлечение P, где концентрация P увеличилась с 2 до 36 миллиграмм P на грамм. Серная и щавелевая кислоты показали хорошую экстракционную способность (эффективность извлечения > 95 %), при этом процесс экстракции H₂SO₄ был быстрым и 72 % общего количества фосфора было извлечено за 10 мин [31, 41].

Разделение источников на очистных сооружениях. Для снижения концентрации фосфора можно также использовать систему разделения источников, в которых бытовые сточные воды отделяются от ливневых. Тем не менее из-за различных факторов окружающей среды и затрат на очистку сточных вод питательными веществами подход разделения источников бытовых сточных вод привлекает внимание в области очистки сточных вод. В этих системах можно фракционировать бытовые сточные воды на разные потоки (моча, фекалии и другие сточные воды) для более

эффективного управления. Стратегии извлечения фосфора, представленные ранее, обычно применяются к обычным очистным сооружениям без разделения источников на входе, когда и моча, и фекалии поступают в очистные сооружения единым потоком. Тем не менее в нескольких исследованиях [24, 31] обсуждается роль этих систем разделения источников в восстановлении питательных веществ. Действительно, это контролируемое разделение может повысить эффективность использования обеих биомасс, богатых питательными веществами, в качестве удобрений. В моче питательные вещества легко доступны для растений, и их можно использовать в качестве жидкого удобрения. Кроме того, использование мочи может стать хорошей альтернативой рециркуляции питательных веществ (прямое применение осадка сточных вод в качестве удобрения).

Прямое применение на сельскохозяйственных угодьях осадка сточных вод. Во всем мире производится большое количество осадка сточных вод, и 95 % фосфора, поступающего в очистные сооружения, сосредоточено в этом осадке. Кроме того, осадок сточных вод является не только ценным источником фосфора, но и азота, микроэлементов (например, Cu, Zn) и органических веществ. Самый простой способ извлечения фосфора из осадков сточных вод – вывоз осадка на сельскохозяйственные угодья [27]. При использовании осадка в качестве удобрения можно обеспечить извлечение фосфора, оказывая положительное влияние на запас углерода в почве благодаря добавлению органического вещества. Несмотря на преимущества прямого применения осадка сточных вод, это спорная стратегия, поскольку она представляет санитарную опасность и опасность для окружающей среды. Присутствие токсичных соединений, тяжелых металлов, патогенных микроорганизмов и микропластика ограничивает использование ила в сельском хозяйстве. Директива 86/278/ЕЕС регулирует применение осадка сточных вод в сельском хозяйстве в ЕС, при этом некоторые страны создают на ее основе свое национальное законодательство. Хотя Директива ЕС об осадках (Директива 86/278/ЕЕС) регулировала только потенциально токсичные металлы в осадках, такие страны, как Австрия, Дания, Франция, Италия и Португалия, ввели более строгие ограничения в рамках национального законодательства в отношении органических соединений и патогенов [31, 41]. Тем не менее в качестве примера прямого применения осадков сточных вод для сельскохозяйственных угодий можно привести обезвоженный осадок с очистных сооружений города Эйзенштадта (Бургенланд, Австрии), который после сушки и компостирования используется в качестве удобрения. В данном случае возможность применения обуслов-

лена отсутствием какой-либо промышленности в федеральной земле Бургенланд, однако перед использованием проводится бактериологический и физико-химические анализы осадка.

Выводы. Для хорошей работы на австрийских очистных сооружениях постоянно проводится обновление и модернизация существующего оборудования, что позволяет повышать не только эффективность очистки сточных вод, но и создает основу для извлечения отдельных ценных составляющих. При этом в обращении с осадками сточных вод происходит постепенный переход к анаэробной стабилизации с последующим обезвоживанием осадка. Чаще всего обезвоженный осадок обрабатываются компостированием или моносжиганием. Так, в некоторых федеральных землях (Вена) используется на 100 % моносжигание, а в других (Бургенланд) используется почти на 100 % нанесение на почву в качестве удобрения. Однако чаще всего компост из обезвоженного осадка используется для рекультивации свалок или для озеленения.

Среди рассмотренных технологий извлечения фосфора из сточных вод и из осадков сточных вод на данный момент в Австрии большее распространение получила технология моносжигания с частичным извлечением фосфора из золы – в восьми из девяти федеральных земель. В качестве пилотных проектов также есть опыт извлечения фосфора в виде струвита из осадка после анаэробного сбраживания на очистных сооружениях города Линца (административный центр федеральной земли Верхняя Австрия) с возможностью последующего крупномасштабного внедрения. Однако в каждом конкретном случае необходима детальная проработка и проведение ряда опытов для возможности применения той или иной технологии. Большую роль в вопросе извлечения фосфора из сточных вод и осадка сточных вод играет законодательство Австрии, которое нацелено на снижение объемов образующихся осадков и получение дополнительных ресурсов из этих осадков.

Библиографический список

1. Харькина О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. – Волгоград: Панорама, 2015. – 433 с.
2. Monitoring and Diagnosis of Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants. A State of the Art and Proposals for Improvement / S. Longo, B.M. d'Antoni, M. Bongards, A. Chaparro, A. Cronrath, F. Fatone, J.M. Lema, M. Mauricio-Iglesias, A. Soares, A. Hospido // Applied Energy. – 2016. – Vol. 179. – P. 1251–1268. DOI: org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043
3. Opportunities to Improve Energy Use in Urban Wastewater Treatment: A European-Scale Analysis / D. Ganora, A. Hospido, J. Husemann, J. Krampe, C. Loderer, S. Longo, L.M. Bouyat, N. Obermaier, E. Piraccini, S. Stanev // Environmental Research Letters. – 2019. – Vol. 14. – P. 044028. DOI: 10.1088/1748-9326/ab0b54
4. Кузнецов А.А., Непогодин А.М., Дягелев М.Ю. Анализ энергопотребления городских очистных сооружений канализации // Экология и безопасность в техносфере: современные проб-

лемы и пути решения: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов / Юргинский технологический институт. – Юрга, 2020. – С. 92–95.

5. Mapping Eutrophication Risk from Climate Change: Future Phosphorus Concentrations in English Rivers / M.B. Charlton, M.J. Bowes, M.G. Hutchins, H.G. Orr, R. Soley, P. Davison // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 613–614. – P. 1510–1526. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.218

6. Phosphorus Recovery from Municipal Wastewater: An Integrated Comparative Technological, Environmental and Economic Assessment of P Recovery Technologies / L. Egle, H. Rechberger, J. Krampe, M. Zessner // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 571. – P. 522–542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.019

7. Trends in the Recovery of Phosphorus in Bioavailable Forms from Wastewater / P.M. Melia, A.B. Cundy, S.P. Sohi, P.S. Hooda, R. Busquets // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 186. – P. 381–395. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.089

8. COST Action ES1403: New and Emerging Challenges and Opportunities in Wastewater ReUse (NEREUS) / D. Fatta-Kassinos, C. Manaia, T.U. Berendonk, E. Cytryn, J. Bayona, B. Chefetz, J. Slobodnik, N. Kreuzinger, L. Rizzo, S. Malato // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – Vol. 22. – P. 7183–7186. DOI: 10.1007/s11356-015-4278-0

9. Jaramillo M.F., Restrepo I. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9. – P. 1734. DOI: 10.3390/su9101734

10. Micropollutant Removal during Biological Wastewater Treatment and a Subsequent Ozonation Step / H. Schaar, M. Clara, O. Gans, N. Kreuzinger // *Environmental Pollution*. – 2010. – Vol. 158. – P. 1399–1404. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.12.038

11. Оценка специфических загрязнений в составе городских сточных вод / Н.М. Мезрин, А.А. Абрамова, М.Ю. Дягелев, В.Г. Исаков // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2022. – № 7. – С. 25–32. DOI 10.35776/VST.2022.07.05

12. Tackling Antibiotic Resistance: The Environmental Framework / T.U. Berendonk, C.M. Manaia, C. Merlin, D. Fatta-Kassinos, E. Cytryn, F. Walsh, H. Bürgmann, H. Sørum, M. Norström, M.N. Pons // *Nature Reviews Microbiology*. – 2015. – Vol. 13. – P. 310–317. DOI: 10.1038/nrmicro3439

13. Removal of Extracellular Free DNA and Antibiotic Resistance Genes from Water and Wastewater by Membranes Ranging from Microfiltration to Reverse Osmosis / K. Slipko, D. Reif, M. Wögerbauer, P. Hufnagl, J. Krampe, N. Kreuzinger // *Water Research*. – 2019. – Vol. 164. – P. 114916. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114916

14. Оценка загрязненности городских сточных вод антибиотическими препаратами цефалоспориновой группы и возможности их определения спектрофотометрическим методом / А.А. Абрамова, А.М. Батуева, А.В. Васильев, М.Ю. Дягелев, Е.Д. Наумкина, И.О. Чурсин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2021. – № 2 (42). – С. 53–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05

15. Classification of antibiotics contained in urban wastewater / A.A. Abramova, V.G. Isakov, A.M. Nepogodin, E.V. Grakhova, M.Y. Dyagelev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. – 2020. – P. 52078. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052078

16. Environmental Impacts of Phosphorus Recovery from Municipal Wastewater / A. Amann, O. Zoboli, J. Krampe, H. Rechberger, M. Zessner, L. Egle // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2018. – Vol. 130. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.002

17. Петухова Е.О., Ручкинова О.И. Дефосфотация сточных вод // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2017. – № 2 (26). – С. 123–141. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.11

18. Кель О.А., Фадеева О.Ю. Практическое применение метода химического удаления фосфатов при использовании различных преципитантов на сооружениях очистки хозяйственно-бытовых сточных вод // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2017. – № 2 (26). – С. 142–151. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.12

19. Effect of Various Types of Thermochemical Processing of Sewage Sludges on Phosphorus Speciation, Solubility, and Fertilization Performance / D. Steckenmesser, C. Vogel, C. Adam, D. Steffens // *Waste Management*. – 2017. – Vol. 62. – P. 194–203. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.019
20. Tansel B., Lunn G., Monje O. Struvite Formation and Decomposition Characteristics for Ammonia and Phosphorus Recovery: A Review of Magnesium-Ammonia-Phosphate Interactions // *Chemosphere*. – 2018. – Vol. 194. – P. 504–514. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.004
21. Kratz S., Schnug E. Trace Elements in Rock Phosphates and P Containing Mineral and Organo-Mineral Fertilizers Sold in Germany // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 542. – P. 1013–1019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.046
22. Krüger O., Grabner A., Adam C. Complete Survey of German Sewage Sludge Ash // *Environmental Science & Technology*. – 2014. – Vol. 48. – P. 11811–11818. DOI: 10.1021/es502766x
23. Smol M., Ada C., Kugler A.S. Inventory of Polish Municipal Sewage Sludge Ash (SSA) – Mass Flows, Chemical Composition, and Phosphorus Recovery Potential // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 116. – P. 31–39. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.042
24. Матюшенко Е.Н. Удаление фосфора из возвратных потоков площадки очистных сооружений канализации // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2019. – № 2 (78). – С. 40–49. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.40-49
25. Харькин С.В. Организация процессов удаления фосфора из сточных вод // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2013. – № 11 (71). – С. 46–52.
26. Post-treatment options for anaerobically digested sludge: Current status and future prospect / Z. Wang, T. Liu, H. Duan, Y. Song, X. Lu, S. Hu, Z. Yuan, D. Batstone, M. Zheng // *Water Research*. – 2021. – Vol. 205. – P. 117665. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117665
27. Operation and performance of Austrian wastewater and sewage sludge treatment as a basis for resource optimization / A. Amann, N. Weber, J. Krampe, H. Rechberger, O. Zoboli, M. Zessner // *Water*. – 2021. – Vol. 13 (21). – P. 2998. DOI: 10.3390/w13212998
28. Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für 1. AEV für kommunales Abwasser, Fassung vom 15.06.2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010980> (дата обращения: 29.06.2022).
29. Phosphorus recovery by struvite crystallization in WWTPs: Influence of the sludge treatment line operation / N. Martí, L. Pastor, A. Bouzas, J. Ferrer, A. Seco // *Water Research*. – 2010. – Vol. 44 (7). – P. 2371–2379. DOI: 10.1016/j.watres.2009.12.043
30. Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater / A. Siciliano, C. Limonti, G.M. Curcio, R. Molinari // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12 (18). – P. 7538. DOI: 10.3390/su12187538
31. From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries / F.A. Santos, V.P. Almeida, P. Alvarenga, M.L. Gando-Ferreira, J.M. Quina // *Chemosphere*. – Vol. 284. – P. 131258. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131258
32. Egle L., Rechberger H., Zessner M. Overview and description of technologies for Recovering phosphorus from municipal wastewater // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2015. – Vol. 105. – P. 325–346. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.09.016
33. Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater / Y. Ye, H.H. Ngo, W. Guo, Y. Liu, J. Li, Y. Liu, X. Zhang, H. Jia // *Science of The Total Environment*. – 2017. – Vol. 576. – P. 159–171. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.078
34. Conversion of municipal wastewater-derived waste to an adsorbent for phosphorus recovery from secondary effluent / W.J. Xia, L.Z.J. Xu, L.Q. Yu, Q. Zhang, Y.H. Zhao, J.R. Xiong, X.Y. Zhu, N.S. Fan, B.C. Huang, R.C. Jin // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 705. – P. 135959. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135959
35. Bottini A., Rizzo L. Phosphorus recovery from urban wastewater treatment plant sludge liquor by ion exchange // *Separation Science and Technology*. – 2012. – Vol. 47. – P. 613–620. DOI: 10.1080/01496395.2011.627904
36. Zou H., Wang Z. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization // *Bioresource Technology*. – 2016. – Vol. 211. – P. 87–92. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.073

37. Sustainable reclamation of phosphorus from incinerated sewage sludge ash as value-added struvite by chemical extraction, purification and crystallization / Q. Wang, J. Li, P. Tang, L. Fang, C.S. Poon // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 181. – P. 717–725. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.254

38. A review of phosphorus recovery from different thermal treatment products of sewage sludge / X. Meng, Q. Huang, J. Xu, H. Gao, J. Yan // *Waste Disposal & Sustainable Energy* volume. – 2019. – Vol. 1. – P. 99–115. DOI: 10.1007/s42768-019-00007-x

39. Recovery of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by combined two-step extraction and selective precipitation / L. Fang, J. Li, S. Donatello, C.R. Cheeseman, Q. Wang, C.S. Poon, D.C.W. Tsang // *Chemical Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 348. – P. 74–83. DOI: 10.1016/j.ccej.2018.04.201

40. Phosphorus recovery from synthetic biosolid digestion supernatant through lignin-induced struvite precipitation / M. Li, H. Sun, H. Zhang, A. Mohammed, Y. Liu, Q. Lu // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 276. – P. 124235. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124235

41. Future nutrient recovery from sewage sludge regarding three different scenarios – German case study / T.C. Sighler, C. Adam, D. Montag, M. Barjenbruch // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 333. – P. 130130. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130130

References

1. Khar'kina O.V. Effektivnaia ekspluatatsiia i raschet sooruzhenii biologicheskoi ochistki stochnykh vod [Efficient operation and calculation of biological wastewater treatment facilities]. Volgograd, Panorama, 2015, 433 p.

2. Longo S., d'Antoni B.M., Bongards M., Chaparro A., Cronrath A., Fatone F., Lema J.M., Mauricio-Iglesias M., Soares A., Hospido A. Monitoring and Diagnosis of Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants. A State of the Art and Proposals for Improvement. *Applied Energy*, 2016, vol. 179, pp. 1251–1268. DOI: org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043

3. Ganora D., Hospido A., Husemann J., Krampe J., Loderer C., Longo S., Bouyat L.M., Obermaier N., Piraccini E., Stanev S. Opportunities to Improve Energy Use in Urban Wastewater Treatment: A European-Scale Analysis. *Environmental Research Letters*. 2019, vol. 14, pp. 044028. DOI: org/10.1088/1748-9326/ab0b54

4. Kuznetsov A.A., Nepogodin A.M., Dyagelev M.Yu. Analiz energopotrebleniia gorodskikh ochistnykh sooruzhenii kanalizatsii [Analysis of the energy consumption of municipal sewage treatment plants]. *Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennye problemy i puti resheniia. Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov*. Yurga, Iurginskii tekhnologicheskii institute, 2020, pp. 92–95.

5. Charlton M.B., Bowes M.J., Hutchins M.G., Orr H.G., Soley R., Davison P. Mapping Eutrophication Risk from Climate Change: Future Phosphorus Concentrations in English Rivers. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 613-614, pp. 1510–1526. DOI: org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.218

6. Egle L., Rechberger H., Krampe J., Zessner M. Phosphorus Recovery from Municipal Wastewater: An Integrated Comparative Technological, Environmental and Economic Assessment of P Recovery Technologies. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 571, pp. 522–542. DOI: org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019

7. Melia P.M., Cundy A.B., Sohi S.P., Hooda P.S., Busquets R. Trends in the Recovery of Phosphorus in Bioavailable Forms from Wastewater. *Chemosphere*, 2017, vol. 186, pp. 381–395. DOI: org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.089

8. Fatta-Kassinos D., Manaia C., Berendonk T.U., Cytryn E., Bayona J., Chefetz B., Slobodnik J., Kreuzinger N., Rizzo L., Malato S. COST Action ES1403: New and Emerging Challenges and Opportunities in Wastewater ReUse (NEREUS). *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, pp. 7183–7186. DOI: 10.1007/s11356-015-4278-0

9. Jaramillo M.F., Restrepo I. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, 2017, vol. 9, pp. 1734. DOI: org/10.3390/su9101734

10. Schaar H., Clara M., Gans O., Kreuzinger N. Micropollutant Removal during Biological Wastewater Treatment and a Subsequent Ozonation Step. *Environmental Pollution*, 2010, vol. 158, pp. 1399–1404. DOI: org/10.1016/j.envpol.2009.12.038

11. Mezrin N.M., Abramova A.A., Diagelev M.Yu., Isakov V.G. Otsenka spetsificheskikh zagriaznenii v sostave gorodskikh stochnykh vod [Estimation of the specific pollutants in municipal wastewater]. *Water Supply and Sanitary Technique*, 2022, no. 7, pp. 25–32. DOI 10.35776/VST.2022.07.05

12. Berendonk T.U., Manaia C.M., Merlin C., Fatta-Kassinos D., Cytryn E., Walsh F., Bürgmann H., Sørum H., Norström M., Pons M.N. Tackling Antibiotic Resistance: The Environmental Framework. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, vol. 13, pp. 310–317. DOI: org/10.1038/nrmicro3439
13. Slipko K., Reif D., Wögerbauer M., Hufnagl P., Krampe J., Kreuzinger N. Removal of Extracellular Free DNA and Antibiotic Resistance Genes from Water and Wastewater by Membranes Ranging from Microfiltration to Reverse Osmosis. *Water Research*, 2019, vol. 164, pp. 114916. DOI: org/10.1016/j.watres.2019.114916
14. Abramova A.A., Batueva A.M., Vasil'ev A.V., Diagelev M.Yu., Naumkina E.D., Chursin I.O. Otsenka zagriaznenosti gorodskikh stochnykh vod antibioticheskimi preparatami tsefalosporinovoi gruppy i vozmozhnosti ikh opredeleniia spektrofotometricheskim metodom [Assessment of wastewater pollution with antibiotic drugs of the cephalosporin group and the possibility of their determination by spectrophotometric method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2021, no. 2 (42), pp. 53–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05
15. Abramova A.A., Isakov V.G., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Dyagelev M.Y. Classification of antibiotics contained in urban wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*, 2020, pp. 52078. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052078
16. 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: org/10.1016/j.resconrec.2017.11.002
17. Petukhova E.O., Ruchkinova O.I. Defosfotatsiia stochnykh vod [Dephosphorization of wastewater]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2017, no. 2 (26), pp. 123–141. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.11
18. Kell O.A., Fadeeva O.Iu. Prakticheskoe primeneniye metoda khimicheskogo udaleniia fosfatov pri ispol'zovanii razlichnykh pretsipitantov na sooruzheniakh ochestki khoziaistvenno-bytovykh stochnykh vod [Practical application of the method of chemical removal of phosphates when using different precipitates at domestic wastewater treatment facilities]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2017, no. 2 (26), pp. 142–151. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.12
19. Steckenmesser D., Vogel C., Adam C., Steffens D. Effect of Various Types of Thermochemical Processing of Sewage Sludges on Phosphorus Speciation, Solubility, and Fertilization Performance. *Waste Management*, 2017, vol. 62, pp. 194–203. DOI: org/10.1016/j.wasman.2017.02.019
20. Tansel B., Lunn G., Monje O. Struvite Formation and Decomposition Characteristics for Ammonia and Phosphorus Recovery: A Review of Magnesium-Ammonia-Phosphate Interactions. *Chemosphere*, 2018, vol. 194, pp. 504–514. DOI: org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.004
21. Kratz S., Schnug E. Trace Elements in Rock Phosphates and P Containing Mineral and Organo-Mineral Fertilizers Sold in Germany. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 542, pp. 1013–1019. DOI: org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.046
22. Krüger O., Grabner A., Adam C. Complete Survey of German Sewage Sludge Ash. *Environmental Science & Technology*, 2014, vol. 48, pp. 11811–11818. DOI: org/10.1021/es502766x
23. Smol M., Ada, C., Kugler A.S. Inventory of Polish Municipal Sewage Sludge Ash (SSA) –Mass Flows, Chemical Composition, and Phosphorus Recovery Potential. *Waste Management*, 2020, vol. 116, pp. 31–39. DOI: org/10.1016/j.wasman.2020.07.042
24. Matiushenko E.N. Udalenie fosfora iz vozvratnykh potokov ploshchadki ochestnykh sooruzhenii kanalizatsii [Phosphorus removal from return flows of a wastewater treatment plant]. *Water and Ecology*, 2019, no. 2 (78), pp. 40–49. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.40-49
25. Khar'kin S.V. Organizatsiia protsessov udaleniia fosfora iz stochnykh vod [Organization of phosphorus removal processes from wastewater]. *Vodoochestka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2013, no. 11 (71), pp. 46–52.
26. Wang Z., Liu T., Duan H., Song Y., Lu X., Hu S., Yuan Z., Batstone D., Zheng M. Post-treatment options for anaerobically digested sludge: Current status and future prospect. *Water Research*, 2021, vol. 205, pp. 117665. DOI: org/10.1016/j.watres.2021.117665

27. Amann A., Weber N., Krampe J., Rechberger H., Zoboli O., Zessner M. Operation and performance of Austrian wastewater and sewage sludge treatment as a basis for resource optimization. *Water*, 2021, vol. 13 (21), pp. 2998. DOI: [org/10.3390/w13212998](https://doi.org/10.3390/w13212998)
28. Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für 1. AEV für kommunales Abwasser, Fassung vom 15.06.2022, available at: URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010980> (accessed 29 June 2022).
29. Martí N., Pastor L., Bouzas A., Ferrer J., Seco A. Phosphorus recovery by struvite crystallization in WWTPs: Influence of the sludge treatment line operation. *Water Research*, 2010, vol. 44 (7), pp. 2371–2379. DOI: [org/10.1016/j.watres.2009.12.043](https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.043)
30. Siciliano A., Limonti C., Curcio G.M., Molinari R. Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (18), pp. 7538. DOI: [org/10.3390/su12187538](https://doi.org/10.3390/su12187538)
31. Santos F.A., Almeida V.P., Alvarenga P., Gando-Ferreira M.L., Quina J.M. From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries. *Chemosphere*, 2021, vol. 284, pp. 131258. DOI: [org/10.1016/j.chemosphere.2021.131258](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131258)
32. Egle L., Rechberger H., Zessner M. Overview and description of technologies for References recovering phosphorus from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, vol. 105, pp. 325–346. DOI: [org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016)
33. Ye Y., Ngo H.H., Guo W., Liu Y., Li J., Liu Y., Zhang X., Jia H. Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater. *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 576, pp. 159–171. DOI: [org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.078](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.078)
34. Xia W.J., Xu L.Z.J., Yu L.Q., Zhang Q., Zhao Y.H., Xiong J.R., Zhu X.Y., Fan N.S., Huang B.C., Jin R.C. Conversion of municipal wastewater-derived waste to an adsorbent for phosphorus recovery from secondary effluent. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 705, pp. 135959 DOI: [org/10.1016/j.scitotenv.2019.135959](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135959)
35. Bottini A., Rizzo L. Phosphorus recovery from urban wastewater treatment plant sludge liquor by ion exchange. *Separation Science and Technology*, 2012, vol. 47, pp. 613–620. DOI: [org/10.1080/01496395.2011.627904](https://doi.org/10.1080/01496395.2011.627904)
36. Zou H., Wang Z. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization. *Bioresource Technology*, 2016, vol. 211, pp. 87–92. DOI: [org/10.1016/j.biortech.2016.03.073](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.073)
37. Wang Q., Li J., Tang P., Fang L., Poon C.S. Sustainable reclamation of phosphorus from incinerated sewage sludge ash as value-added struvite by chemical extraction, purification and crystallization. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 181, pp. 717–725. DOI: [org/10.1016/j.jclepro.2018.01.254](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.254)
38. Meng X., Huang Q., Xu J., Gao H., Yan J. A review of phosphorus recovery from different thermal treatment products of sewage sludge. *Waste Disposal & Sustainable Energy volume*, 2019, vol. 1, pp. 99–115. DOI: [org/10.1007/s42768-019-00007-x](https://doi.org/10.1007/s42768-019-00007-x)
39. Fang L., Li J., Donatello S., Cheeseman C.R., Wang Q., Poon C.S., Tsang D.C.W. Recovery of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by combined two-step extraction and selective precipitation. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 348, pp. 74–83. DOI: [org/10.1016/j.cej.2018.04.201](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.201)
40. Li M., Sun H., Zhang H., Mohammed A., Liu Y., Lu Q. Phosphorus recovery from synthetic biosolid digestion supernatant through lignin-induced struvite precipitation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 276, pp. 124235. DOI: [org/10.1016/j.jclepro.2020.124235](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124235)
41. Sichler T.C., Adam C., Montag D., Barjenbruch M. Future nutrient recovery from sewage sludge regarding three different scenarios – German case study. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 333, pp. 130130. DOI: [org/10.1016/j.jclepro.2021.130130](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130130)

M. Dyagelev

AUSTRIAN EXPERIENCE IN THE REMOVAL OF PHOSPHORUS COMPOUNDS FROM DIGESTED SEWAGE SLUDGE

This paper gives an overview of experiences and technologies for phosphorus removal from sewage sludge, which are applied in Austrian wastewater treatment plants. In the last decade, Austria has seen a paradigm shift in wastewater treatment in wastewater treatment plants towards using wastewater and the resulting sewage sludge as a source for resource recovery. This shift has been accompanied by the development and application of new European legislation aimed at better resource recovery from wastewater. However, the long service life and many treatment requirements require careful consideration of how sustainable resource recovery can be achieved. The paper focuses on technologies for phosphorus recovery from wastewater and sewage sludge, presenting data from Austrian sewage treatment plants that use deep phosphorus treatment technology and sludge treatment in sewage treatment plants in settlements with a population of over 2000 equivalent inhabitants. Among the applied phosphorus recovery technologies, the method of phosphorus recovery from sewage sludge ash, the method of direct soil application of digested sludge, phosphorus recovery from sewage by chemical precipitation, adsorption, ion exchange and biological absorption were considered. The results of this review may be useful for other countries as they describe the current state of play in Austria and can potentially help in developing strategies for wastewater treatment and phosphorus recovery.

Keywords: sewage, sewage sludge, phosphorus removal, sludge stabilization, sludge quality, sludge production.

Дягелев Михаил Юрьевич (Ижевск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоподготовка», Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, 426069, ул. Студенческая, 7, e-mail: mdyagelev@yandex.ru).

Mikhail Dyagelev (Izhevsk, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department "Water supply and water treatment", Kalashnikov Izhevsk state technical University (7, Studencheskaya str., 426069, Izhevsk, e-mail: mdyagelev@yandex.ru).

Финансирование. Исследования были выполнены в рамках программы для Postdocs Австрийского агентства по образованию и интернационализации (OeAD – Österreichs Agentur für Bildung und Internationalisierung).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад 100 %.

Поступила: 22.07.2022

Одобрена: 15.08.2022

Принята к публикации: 22.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Дягелев, М.Ю. Австрийский опыт удаления соединений фосфора из осадков сточных вод / М.Ю. Дягелев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2022. – № 3. – С. 48–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04

Please cite this article in English as: Dyagelev M. Austrian experience in the removal of phosphorus compounds from digested sewage sludge. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2022, no. 3, pp. 48-65. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04