

**БИОЛОГИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА ИЗ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД  
В ПРОЦЕССЕ БИОСУЛЬФИДНОЙ ОБРАБОТКИ**

**Е. Ю. Черныш, Л. Д. Пляцук**

Сумской государственной университет

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина. E-mail: e.chernish@ecolog.sumdu.edu.ua

Рассмотрена проблематика удаления фосфатов из сточных вод и их осадков. При этом все большее значение приобретает необходимость удаление соединений фосфора в связи с высоким концентрированием его в осадках сточных вод. Гидроксиды железа и гидратные комплексы, содержащие К, Al и Si, являются составными частями осадков, которые ответственны за удерживание фосфат-ионов. В избыточном активном иле механизм сорбции фосфатов дополнен процессом накопления фосфорсодержащих соединений в клетках микроорганизмов. Проведено экспериментальное исследование процесса удаления фосфора при биосульфидной обработке осадков сточных вод. Определены закономерности биохимических трансформаций соединений фосфора в анаэробных условиях в процессе обработки осадков. При этом значительная часть фосфат-ионов химически связывается с кальцием в малорастворимых соединениях, а также частично переходит в жидкую фазу с удалением из биотехнологической системы.

**Ключевые слова:** биологическое удаление фосфора, биосульфидная обработка, осадки сточных вод.

**БИОЛОГІЧНЕ ВИДАЛЕННЯ ФОСФОРУ ІЗ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД  
У ПРОЦЕСІ БІОСУЛЬФІДНОЇ ОБРОБКИ**

**Є. Ю. Черниш, Л. Д. Пляцук**

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна. E-mail: e.chernish@ecolog.sumdu.edu.ua

Розглянуто проблематику видалення фосфатів із стічних вод та їх осадів. При цьому все більшого значення набуває необхідність видалення сполук фосфору внаслідок високого його концентрування в осадах стічних вод. Гідроксиди заліза та гідратні комплекси, що містять К, Al та Si, є складовими частинами осадів стічних вод, що відповідальні за утримування фосфат-іонів. У надлишковому активному мулі механізм сорбції фосфатів доповнений процесом акумуляції фосфоровмісних сполук у клітинах мікроорганізмів. Проведено експериментальне дослідження процесу видалення фосфору при біосульфідній обробці осадів стічних вод. Визначені закономірності біохімічних трансформацій сполук фосфору в анаеробних умовах у процесі обробки осадів. При цьому значна частина фосфат-іонів хімічно зв'язується з кальцієм в малорозчинних сполуках, а також частково видалюється з біотехнологічної системи з рідкою фазою.

**Ключові слова:** біологічне видалення фосфору, біосульфідна обробка, осади стічних вод.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В настоящее время одной из главных проблем в области очистки сточных вод является удаление биогенных элементов – соединений азота, фосфора, серы, вызывающих эвтрофикацию водных объектов. При этом наибольшее значение приобретает удаление соединений фосфора в связи с высоким концентрированием его в осадках сточных вод. Это обусловлено использованием фосфорсодержащих моющих средств, которые поступают на очистные сооружения в составе бытовых сточных вод, а также наличием фосфатов в составе производственных стоков. Например, фосфорсодержащие сточные воды, получаемые от контакта воды с фосфором и фосфорными шламами из хранилищ фосфора цехов термической фосфорной кислоты, от промывки коммуникаций и железнодорожных цистерн из под фосфора и от других источников.

Комплексный экологический подход к решению проблемы эффективного удаления соединений фосфора из сточных вод и их осадков предполагает решения следующих задач:

- наиболее полное восстановление фосфора биодоступную форму;
- понижение мобильности тяжелых металлов, связывание их в устойчивой форме;

- снижение концентрации токсических органических соединений;

- обеспечение возможности последующей утилизации фосфора.

Целью работы является определение закономерностей трансформации фосфатов в анаэробных условиях в процессе биосульфидной обработки осадков сточных вод (ОСВ) и возможности их биологического удаления. Согласно поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- анализ существующих методов извлечения фосфора из сточных вод и их осадков;

- изучение содержания биогенных элементов в ОСВ;

- изучение соединений фосфора в минеральной структуре осадков сточных вод до и после биосульфидной обработки;

- определение закономерностей биохимических процессов аккумуляции и трансформации соединений фосфора в осадках сточных вод.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Анализ методов извлечения фосфора из сточных вод и их осадков. Существующие методы удаления соединений фосфора со сточных вод и их осадков можно обобщить в следующие направления: биологическое удаление фосфора, химическое

осаждение и термическая обработка ОСВ с последующим реагентным извлечением фосфора. В настоящее время возможности извлечения фосфора на станциях очистки сточных вод ограничены. Наиболее используемые направления в этой сфере представлены на рис. 1.

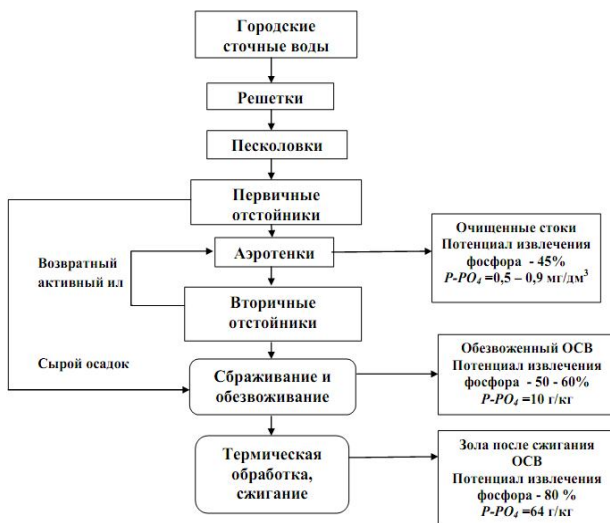


Рисунок 1 – Возможности извлечения фосфора, потенциал извлечения (числовые данные [1–4])

В работах [3, 4] предложено направление повышения производительности сооружений биологической очистки с помощью формирования быстрооседающих высококонцентрированных илов в биореакторах. Данная линия работает по технологии биологического удаления азота и фосфора и имеет свою изолированную от других аэротенков иловую систему (Люберецкие очистные сооружения, Россия). Биологическое удаление соединений фосфора активным илом совместно с денитрификацией в условиях чередования аэробных и анаэробных условий на очистных сооружениях рассматривается также в работах [5, 6]. При этом важным является поддержание нормального функционирования факультативной анаэробных зон в аэротенках. Для этого необходимо точное регулирование насыщения потока сточных вод кислородом и наличием в них достаточного количества легкорастворимого органического вещества для обеспечения жизнедеятельности анаэробных фосфоруудаляющих микроорганизмов. Следует отметить, что состав сточных вод, поступающих на очистные сооружения, не является постоянным, поэтому интенсивность аэрации требует постоянной корректировки.

Разработана технология с использованием процесса ацидофикации [7]. В ацидофикаторах реализуется процесс незаконченного анаэробного сбраживания сырого осадка. Ацидофикация применяется для ферментации осадка с целью уменьшения осаждаемых и коагулируемых частиц с переводом этой массы в растворенный субстрат (гидролизат). Удаление 1 мг/фосфора требует от 7 до 10 мг ацетата или биологически быстрорастворимого ХПК. Ацидофикация сырого осадка в схемах с биологи-

ческим удалением фосфора, по утверждению авторов [7], позволит дополнительно изъять из сточной воды до 160 кг растворенного фосфора из всей массы поступающего растворимого фосфора (930 кг/сут.). Анаэробное ступенчатое сбраживание известно давно, однако ацидофикация и гидролиз сложных органических соединений могут быть разобраны во времени, и этот фактор необходимо учитывать при реализации данной технологии в промышленных масштабах.

В Японии действуют реакторы Unitika PHOSNIX (извлечение фосфора с помощью  $Mg(OH)_2$  и  $NaOH$ ) производительностью 6–20 м<sup>3</sup>/ч [8]. Этот процесс отделен от основного и предназначен для очистки жидкой фазы, образующейся в ходе ряда технологических процессов, включая сбраживание в метантенке и удаление биогенных элементов.

Существует также ряд процессов «влажного» извлечения фосфора из ОСВ с различным содержанием сухого вещества под действием кислоты, давления, температуры и окислителей. Наиболее распространенными из них являются технологии KREPRO, LOPROX, Aqua Reci и Seaborne/Gifhorn [2]. Так, в Германии разработаны промышленные установки Seaborne с извлечением фосфора с помощью  $MgO$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2S$ ,  $H_2SO_4$  и флокулянта [9]. Однако эти установки отличаются высокой капиталоемкостью и техническими трудностями при реализации в промышленных масштабах.

Процесс Mephrec (Германия) представляет собой термический метод извлечения фосфора из обезвоженного осадка, а также из золы, полученной при моносжигании [2, 10]. Он основан на процессах плавки и газификации при температуре около 2000 °С.

Таким образом, методы извлечения и вторичного использования биогенных элементов разрабатываются в ряде зарубежных стран Европы, СНГ, США и Канаде, а также в Украине [1–10]. При этом можно отметить ряд особенностей их эксплуатации: все они являются дорогостоящими; эффективность удаления соединений фосфора варьирует в значительных пределах (от 40 до 80 %); многие методы разрабатываются специально для решения проблем, возникающих в ходе эксплуатации, поэтому они эффективны лишь при определенных, очень специфических условиях на данных очистных сооружениях.

Биологическое удаление соединений фосфора из сточных вод на очистных сооружениях позволяет получить биодоступную форму фосфора, что является важным аспектом при утилизации его в сельском хозяйстве. При этом возникает ряд проблем: снижение эффективности обезвоживания ОСВ, «вспухание» активного ила, отложение струвита в трубопроводах. Коммерческая реализация данных технологий также зависит от мировых цен на фосфориты, что связано с возможностью использования извлеченного из сточных вод и ОСВ фосфора для производства фосфорного удобрения.

В Сумском государственном университете была разработана биосульфидная технология обезвреживания ОСВ [11–15], которая основана на биохимическом связывании тяжелых металлов в сульфидной

фракции в процессе жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий (СВБ) в анаэробных условиях. При этом происходит биологическое восстановление соединений фосфора.

*Лабораторная экспериментальная установка.* Исследования проводились с использованием биореактора и термостата ТЖ–ТС–01/8–100 (Россия). Биореактор – анаэробная камера брожения, цилиндрической формы с нержавеющей стали, объемом  $V_1=5 \text{ дм}^3$ , рабочий объем не превышал 7/10 общего объема. Камера покрыта теплоизоляционной пленкой, под которой по термостойким пластиковым трубам циркулирует подогретая вода ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В нижней части корпуса биореактора находилось отверстие для выгрузки обезвреженных ОСВ. В верхней части биореактора был установлен патрубок для отвода газовой фазы с регулирующим клапаном.

Технологические параметры работы анаэробного биореактора в процессе биосульфидного обезвреживания ОСВ [11, 12]: соотношение избыточного активного ила к осадкам с иловой карты составило 1,5:1, доза серосодержащей минеральной добавки (фосфогипса) – 14 г на  $1 \text{ дм}^3$ , рН системы – от 7,0 до 7,5 ед., время удержания – 10 суток.

*Методы исследования.* Контроль рН проводился с помощью рХ-метр рХ–150 (ионометр) (Беларусь) с электродом стеклянным комбинированным «ЭКС–10603». Предел допускаемой основной погрешности прибора  $\pm 0,05$  единиц рН.

Влажность ОСВ определялась по общепринятой методике [16] гравиметрическим методом с высушиванием пробы при 378 К.

Исследование структуры образцов ОСВ рентгенодифракционным методом были выполнены на автоматизированном дифрактометре ДРОН–4–07 (Россия).

Исследование качественного и количественного химического состава образцов ОСВ (твердой фракции) проводились с помощью микроскопа-микроанализатора растрового электронного РЭМ–МА–102 (Украина). Кроме того, определение содержания общего азота (%) в образцах проводили фотометрическим методом «индофеноловой зелени» по ЦИНАО [17] на фотоколориметре КФК–3–01 (Россия).

Исследование микробиологических препаратов. Окраску по Грамму и методу Циля–Нильсона проводили согласно общепринятым методикам [18]. Микрофотографии микробных препаратов получали и обрабатывали с помощью цифровой системы вывода изображения «SEO Scan ICX 285 AK-F IEE-1394» и морфометрической программы «SEO Image Lab 2.0». Идентификация культур проводилась по определителю Берги [19] на основании данных по морфологии, физиологии и по биохимическим свойствам микробных клеток.

*Содержание общих форм биогенных элементов в ОСВ.* Результаты анализа представлены в таблице 1. При этом влажность осадков из иловых карт меняется от 53,8 до 86,9 %,  $pH_{\text{кол}}$  – от 6,5 до 7,2. Такой диапазон изменения влажности можно объяснить неравномерностью микрорельефа иловых площадок и разным возрастом ОСВ, которые на них находят-

ся. Избыточный активный ил имеет  $pH_{\text{кол}}=7,7$  и влажность 96 %.

Таблица 1 – Содержание общих форм биогенных элементов в ОСВ, г. Сумы

Вид ОСВ	Общий фосфор, %	Общий азот, %	Общий калий, %
Осадок с иловой карты	1,24–4,96	0,75–0,80	1,45–2,46
Избыточный активный ил	2,45–4,45	0,83–2,95	1,37–4,00

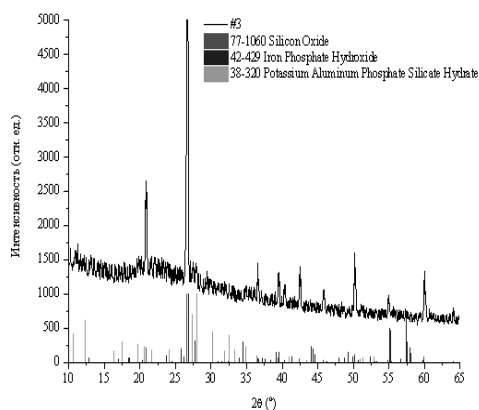
*Изучение соединений фосфора в минеральной структуре осадков сточных вод до и после обработки.* По результатам рентгенодифракционного анализа (рис. 2а,б) было установлено, что одной из особенностей минерального состава ОСВ до биосульфидной обработки является наличие соединений железа в виде  $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ . Кроме того, в осадок с иловой карты (рис. 2а) соединения фосфора также представлены совместно с соединениями алюминия и кремния в виде двухслойного гидратного комплекса потассиума с октаэдрическим расположением молекулы  $\text{H}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1,73}(\text{SiO}_2)_{0,37}(\text{P}_2\text{O}_5)_{2,98}\text{H}_2\text{O}$ .

После обработки ОСВ приобрели черную окраску и характерный запах разложившихся органических остатков. При отделении жидкой фазы от твердой был получен органоминеральный продукт обезвреживания ОСВ, который в высушенном виде приобрел серовато-коричневый оттенок.

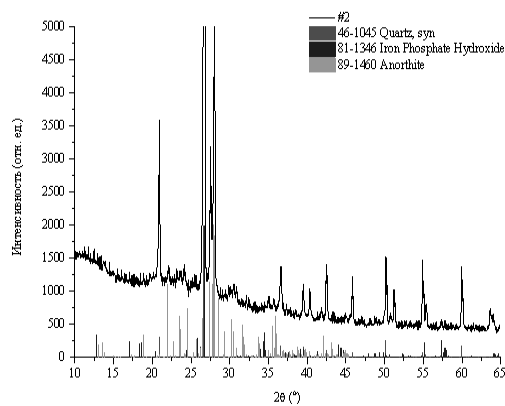
Среди основных компонентов минеральной составляющей конечного продукта биосульфидного обезвреживания ОСВ можно выделить следующие соединения, содержащие фосфор (рис. 3): потассиум гидроген фосфат гидрат –  $\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot x/2\text{H}_2\text{O}$ , брусит –  $\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot x2\text{H}_2\text{O}$ , которые относятся к малорастворимым соединениям. Например, за [20] в слабокислой среде (рН ,5) брусит является устойчивым. Также в структуре образца в качестве примеси встречается оксид фосфора –  $\text{P}_2\text{O}_5$ . При детальном фазовом анализе видно смещение пиков к фоновым значениям, что свидетельствует про остаточные концентрации оксида фосфора. Нужно отметить, что фосфорный ангидрит взаимодействует с водой и удаляется из системы в жидкой фазе.

*Микробиологические исследования.* В сброженных в условиях биосульфидогенеза ОСВ содержится значительное количество микроорганизмов, в том числе СВБ, количество которых достигает  $1,0 \times 10^9 \text{ КОЕ/см}^3$ . Часть из этих микроорганизмов способна развиваться, используя фосфогипс как источник минерального питания и органические компоненты ОСВ. Полученные микроснимки сброженных ОСВ позволили наблюдать различной формы

клеточных агрегатов по мере увеличения скорости роста микроорганизмов (рис. 4).



а



б

Рисунок 2 – Спектр минеральной составляющей ОСВ: а – осадков из иловой карты; б – избыточного активного ила

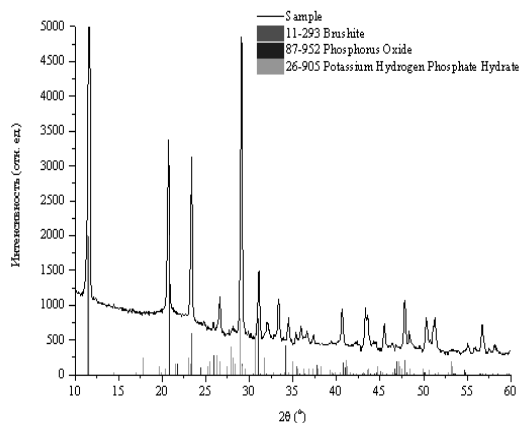


Рисунок 3 – Спектр минеральной составляющей обезвреженных ОСВ (соединения фосфора)

В ассоциации микроорганизмов доминируют ацетатотрофы, что связано с неполным окислением органического вещества до ацетатов. Следовательно, первостепенное значение для стабильной работы системы имеет удаление летучих жирных кислот

(ЛЖК), в первую очередь ацетатов. В ином случае происходит закисание среды, снижение pH до 5,0.

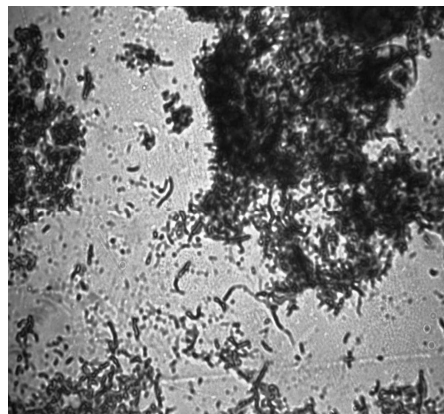


Рисунок 4 – Формирование агрегатов бактерий в условиях сульфидогенеза. Световая микроскопия. Окраска по методу Грамма: Ув. x40

В поле зрения на рис. 5 видны рубиново-красные кислотоустойчивые спорообразующие микроорганизмы, относящиеся к *Desulfomicrobium sp.* Также в сульфидогенной ассоциации присутствуют микроорганизмы, относящиеся к *Desulfovibrio sp.*

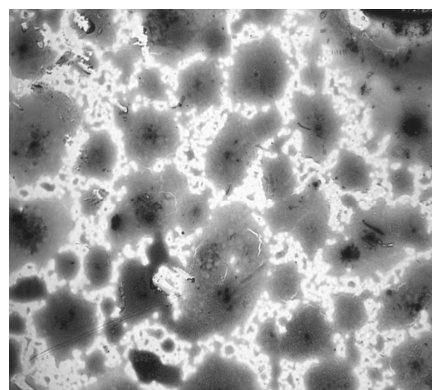


Рисунок 5 – Кислотоустойчивые спорообразующие бактерии сульфидогенной ассоциации микроорганизмов. Световая микроскопия. Окраска по методу Циля-Нильсона: Ув. x100

Таким образом, сульфидогенный ил, полученный в процессе обезвреживания ОСВ, является ассоциацией анаэробных микроорганизмов, в которой доминируют ацетатотрофные микроорганизмы.

Многие гетеротрофные микроорганизмы, содержащиеся в сточных водах и активном иле, способны аккумулировать фосфор. В процессе анаэробного биосульфидного обезвреживания вследствие активного выделения ЛЖК происходит диффузия фосфат-ионов из микробной клетки. Общая схема биологического удаления фосфора в анаэробных условиях показана на рис. 6. Кроме того, возможен лизинг данных микробных клеток с выделением полифосфатов.

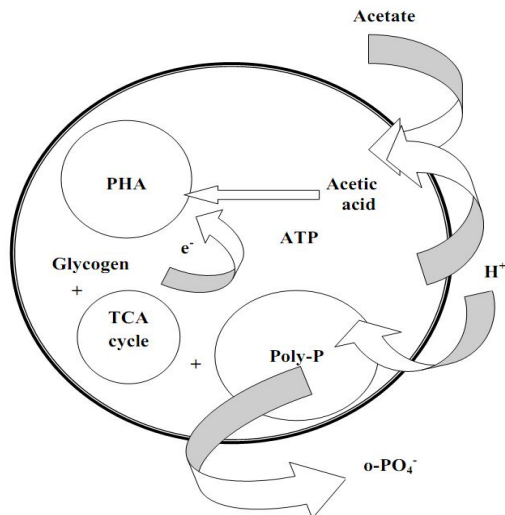


Рисунок 6 – Биологического удаления фосфора из микробной клетки в анаэробных условиях (данные взяты из [21])

*Обсуждение результатов исследования.* В осадках из иловых карт фосфор (P) в виде анионов солей сорбируется гидроксидом железа, присутствующим в верхнем окисленном слое ОСВ, в соединениях типа  $Fe_4(PO_4)_3(OH)_3$  (рис. 2), а также в гидратных комплексах, содержащих K, Al и Si. В избыточном активном иле этот механизм дополнен процессом накопления фосфора в биомассе гетеротрофных микроорганизмов.

Закономерности биохимических трансформаций фосфора в процессе биосерульфидной обработки сводятся к следующим положениям:

– гидроксид железа (III), который связал P, оказывается в лишенном доступа кислорода простран-

стве (в анаэробном биореакторе) и восстанавливается Fe (III) присутствующим в ОСВ органическим веществом в процессе микробной редукции. Поскольку соли Fe (II) растворимы, ионы  $Fe^{2+}$  и P начинают диффундировать;

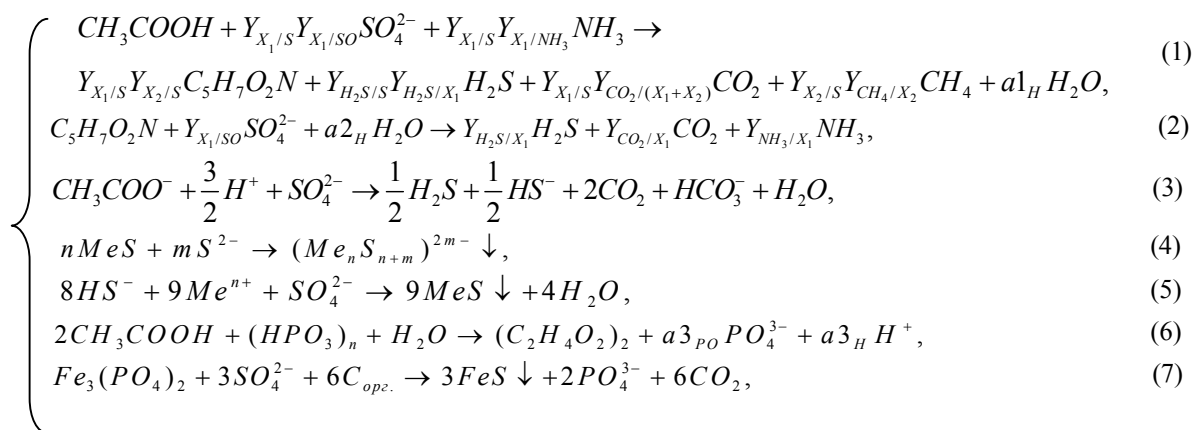
– в анаэробных условиях благодаря процессу ферментации органических веществ происходит образование ЛЖК и выделение полифосфатов  $(HPO_3)_n$  из клеток ила в жидкую фазу;

– ионы  $Fe^{2+}$  реагируют с растворенным сульфидом, который находится в избытке в пространстве анаэробного биореактора с образованием персульфидов. В процессе изоморфизма образуется сложная устойчивая сульфидная фракция, связывающая тяжелые металлы, что обосновано в предыдущих работах [11–14];

– фосфат-ионы, в свою очередь, вступают в реакцию с ионами кальция с образованием малорастворимых соединений (рис. 3). Часть фосфат-ионов переходит в жидкую фазу и удаляется из биотехнологической системы.

Следует отметить, что в структуре потассиумов (рис. 2,а, 3) присутствует фосфор до и после биосерульфидного обезвреживания, что свидетельствует о наличии стойких связей в минеральных комплексах осадков из иловых карт, которые резистентны к биологическим процессам минерализации.

Процессы сорбции и трансформации соединений фосфора осложняются биохимическими превращениями, которые осуществляются серульфидогенной ассоциацией микроорганизмов. В целом анаэробный процесс биосерульфидного обезвреживания ОСВ с восстановлением соединений фосфора можно описать следующей системой биохимических реакций:



где  $Y_{X_1/S}$ ,  $Y_{X_2/S}$ ,  $Y_{X_1/SO}$ ,  $Y_{X_1/NH_3}$ ,  $Y_{H_2S/X_1}$ ,

$Y_{CO_2/(X_1+X_2)}$ ,  $Y_{CH_4/X_2}$ ,  $Y_{CO_2/X_1}$ ,  $Y_{NH_3/X_1}$  экономические коэффициенты: выхода биомасс СВБ и метаногенов по органическому субстрату, выхода биомассы СВБ по сульфатам и аммиаку, выхода сероводорода по биомассе СВБ и углекислого газа по биомассе СВБ и метаногенов, выхода метана по биомассе метаногенов и углекислого газа по биомассе СВБ, выхода аммиака при разложении биомассы СВБ соответ-

ственно;  $a_{1H}$ ,  $a_{2H}$ ,  $a_{3PO}$ ,  $a_{3H}$  – стехиометрические коэффициенты;  $C_{opr.}$  – органический субстрат.

Процесс разложения ацетатов до сероводорода, метана и углекислого газа с синтезом микробной биомассы ( $C_2H_7NO_2$ ) и распадом этой биомассы представлены в уравнениях (1) и (2) соответственно при условии доминирования СВБ в пространстве биореактора (конкурентное ингибирование процесса метаногенеза). Так как процесс анаэробного обезвреживания ведется в условиях стимулирования серульфидогенеза, то в уравнении (3) показано про-

цесс диссимиляционного восстановления сульфатов при разложении ацетатов без учета метаногенеза. В уравнениях (4) и (5) представлены химические реакции осаждения ионов тяжелых металлов биогенным сероводородом. Кроме того, в процессе сульфидогенеза происходит выделение полифосфатов  $(\text{HPO}_3)_n$  из клеток ила в жидкую фазу, что упрощенно описано в уравнении (6), при этом  $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2)_2$  – резервное органическое вещество, присутствующее в жидкой фазе ОСВ. Биологическое восстановление фосфатов из соединений железа (III) представлено в уравнении (7).

**ВЫВОДЫ.** Механизм сорбции фосфатов в сырых ОСВ сводится к процессу связывания фосфат-ионов гидроксидом железа. Кроме того, фосфор включен в гидратные комплексы потассиумов, представленных в осадках. В избыточном активном иле данный механизм дополнен процессом аккумуляции фосфорсодержащих соединений в клетках микроорганизмов. В процессе биосульфидного обезвреживания ОСВ при соосаждения сероводорода и ионов тяжелых металлов происходит биологическое восстановление фосфатов. Значительная часть освободившихся фосфат-ионов химически связывается с кальцием в малорастворимые соединения, а также частично переходит в жидкую фазу ОСВ с удалением из биотехнологической системы. Определены закономерности трансформации фосфатов в анаэробных условиях в процессе биосульфидного обезвреживания ОСВ. Предлагаемый процесс потенциально может использоваться для биологического восстановления соединений фосфора из ОСВ с последующей их утилизацией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base / K.Stark, E. Plaza, B. Hultman // *Chemosphere*. – 2006. – № 62 (5). – PP. 827–832.
2. Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery / C. Adam, B. Peplinski, M. Michaelis, G. Kley, F.G. Simon // *Waste Management*. – 2009. – № 29, – PP. 1122–1128.
3. Очистка сточных вод от биогенных элементов в аэротенках с повышенными дозами активного ила / Д.А. Данилович, М.Н. Козлов, М.И. Алексеев и др. // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2009. – Тематический выпуск. – С. 52–54.
4. Опыт культивирования гранулированного активного ила для очистки городских сточных вод / Д.А. Данилович, О.В. Мойжес, М.И. Алексеев и др. // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2009. – Тематический выпуск. – С. 55–57.
5. Удаление соединений фосфора при биологической очистке сточных вод / В.А. Юрченко, М.А. Есин, А.В. Смирнов и др. // *Научный вестник строительства*. – 2011. – Вып. 65. – С. 344–349.
6. Active sludge bulking control using technological parameters of water treatment / Е.М. Воронова, А.В. Астапова, В.О. Юрченко // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сбор. науч. трудов*. – 2011. – Вып. 52. – С. 69–71.
7. Ацидофикация сырого осадка как способ получения легкоокисляемой органики для биологического удаления фосфора при анаэробной очистке сточных вод / П.В. Трунов, Е.А. Пономаренко, С.В. Толстых, Е.В. Чуев // *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сборник*. – 2010. – № 93. – С. 220–225.
8. Nawa Y. P-recovery in Japan the PHOSNIX process [Электронный ресурс] // *BALTIC 21. Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice*, September 28–30 2009. – Режим доступа: <http://gcus.jp/en/>
9. Die Seaborne-Anlagentechnik zur Aufbereitung organischer Reststoffe / M. Schulz, N. Schulze, H. Simon // *Wasser und Abfall*. – 2000. – № 9. – PP. 36–40.
10. Nanzer S. Evaluation of a phosphate fertilize from sewage sludge ashes: a journey from the molecule to the field [Электронный ресурс]: A dissertation submitted to ETH ZURICH for the degree of Doctor of Sciences. – 2012. – 131 p. – Режим доступа: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:6861/eth-6861-02.pdf>.
11. Исследование эффективности биосульфидной обработки осадков городских сточных вод/ С.Ю. Черниш, Л.Д. Пляцук // *Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки»*. – 2012. – № 4. – С. 168–179.
12. Анализ производительности биореактора в процессе биосульфидной обработки осадков сточных вод / Л.Д. Пляцук, Е.Ю. Черныш // *Наука и образование Южного Казахстана*. – 2012. – № 3/4 (94/95). – С. 198–204.
13. Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge under bio-sulfidogenic conditions / L.D. Plyatsuk, E.Y. Chernish // *Environment Protection Engineering*. – 2013. – № 3. – PP. 101–118.
14. Пат. на винахід № 103087 України, МПК (2013.01) C02F 3/00. Спосіб обробки органічних відходів з видаленням важких металів / С.Ю. Черниш, Л.Д. Пляцук; заявник та утримувач патенту Сумський державний університет. – № а 201113337; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.
15. Проектування систем біосульфідної обробки осадів міських стічних вод/ С.Ю. Черниш, Л.Д. Пляцук // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2012. – № 2/2013 (73) – С. 174–178.
16. Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. – М.: Стройиздат, 1977. – 303 с.
17. Почвы. Методы определения общего азота. ГОСТ 26107–84. Утв. 2.03.1984., № 661 М., 1984.
18. Практична мікробіологія: посібник / С.І. Климнюк, І.О. Ситник, М.С. Творко та ін. – Тернопіль: Укрмедкнига, 2004. – 440 с.
19. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* / John G. Holt, Peter H. Sneath, Noel R. Krieg – Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 1994. – 816 p.
20. Медицинское неорганическое материаловедение в России: кальцийфосфатные материалы / Т.В. Сафронова, В.И. Пугляев // *Наносистемы: физика, химия, математика*. – 2013. – № 1(4). – С. 24–47.
21. Henze M. *Wastewater treatment: Biological and Chemical Processes* – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – 468 p.



**BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL FROM SEWAGE SLUDGE DURING BIO-SULFIDOGENIC TREATMENT**

**E. Chernish, L. Plyatsuk**

Sumy State University

vul. Rymaskogo-Korsakova 2, Sumy, 40007, Ukraine. E-mail: e.chernish@ecolog.sumdu.edu.ua

This paper focuses on the study the problems of removing phosphate from wastewater and sewage sludge. The need for phosphorus recycling in municipal wastewater treatment plants has received an immense attention the last decade as phosphate rock prices have risen and the direct application of sewage sludge to agriculture has been difficult due to high pollution levels (heavy metals and organic pollutants). The main phosphorus removal technologies were discussed in the paper. The sorption mechanism of phosphate in sewage sludge was formed. The process of binding phosphate ions with iron hydroxide and hydrated complexes of K, Al and Si was dominated in sewage sludge. This mechanism supplemented by phosphorus accumulation in the microorganisms cells of the excess activated sludge. An experimental study of the phosphorus removal during bio-sulfidogenic treatment of sewage sludge was carried out. Specificity of biological recovery of phosphorus compounds under anaerobic conditions in the sludge treatment was determined. The biochemical model of sewage sludge treatment with phosphorus transformation under bio-sulfidogenic condition was formed. The most part of the phosphate ions chemically binds with calcium in low-solubility compounds and partially removal in the liquid phase from the biotechnology system.

**Key words:** biological phosphorus removal, bio-sulfidogenic treatment, sewage sludge.

REFERENCES

1. Stark, K., Plaza, E., and Hultman, B. (2006), "Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base", *Chemosphere*, no. 62(5), pp. 827–832.
2. Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., and Simon, F.G. (2009), "Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery", *Waste Management*, no. 29, pp. 1122–1128.
3. Danilovich, D.A., Kozlov, M.N., Alekseev, M.I. et al. (2009), "Wastewater from the nutrients in the aeration tanks with higher doses of activated sludge", *Water supply and sanitary engineering*, thematic issue, pp. 52–54.
4. Danilovich, D.A., Moyzhes, O.V., Alekseev, M.I. et al. (2009), "Experience the culture of granular activated sludge for municipal wastewater", *Water supply and sanitary engineering*, thematic issue, pp. 55–57.
5. Yurchenko, V.A., Esin, M.A., Smirnov, A.V. et al. (2011), "Removal of phosphorus compounds in biological wastewater treatment", *Scientific Bulletin of construction*, iss. 65, pp. 344–349.
6. Voronov, E.M., Astapova, A.V., and Yurchenko, V.A. (2011), "Active sludge bulking control using technological parameters of water treatment", *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University: collection of scientific papers*, iss. 52, pp. 69–71.
7. Trunov, P.V., Ponomarenok, E.A., Tolsty, S.V., and Chuev, E.V. (2010), "Acidification of raw sludge as a way of easily oxidized organic matter for biological phosphorus removal in anaerobic wastewater treatment", *Utilities cities. Scientific and technical collection*, no. 93, pp. 220–225.
8. Nawa, Y. (2009), P-recovery in Japan – the PHOSNIX Process. *BALTIC 21 – Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice*, available at: <http://gcus.jp/en/> (accessed May 30, 2014).
9. Schulz, M., Schulze, N., Simon, H. (2000), Die Seaborne-Anlagentechnik zur Aufbereitung organischer Reststoffe, *Wasser und Abfall*, no. 9, pp. 36–40.
10. Nanzer, S. (2012), "Evaluation of a phosphate fertilizer from sewage sludge ashes: a journey from the molecule to the field", A dissertation submitted to ETH ZURICH for the degree of Doctor of Sciences, Switzerland, available at: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:6861/eth-6861-02.pdf> (accessed May 25, 2014).
11. Chernish, E.Y. and Plyatsuk, L.D. (2012), "Research efficiency of sewage sludge biosulfidogenic treatment", *Visnyk of Sumy State University. Technical Sciences Series*, no. 4, pp. 168–179.
12. Plyatsuk, L.D. and Chernish, E.Y. (2012), "Analysis of bioreactor's productivity during biosulfidogenic sewage sludge treatment", *Science and Education of South Kazakhstan*, no. 3/4 (94/95), pp. 198–204.
13. Plyatsuk, L.D. and Chernish, E.Y. (2013), "Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge under bio-sulfidogenic conditions", *Environment Protection Engineering*, no. 3, pp. 101–118.
14. Patent of Ukraine for invention 103087 (2013). Process for the treatment of organic wastes with removal of heavy metals. Published on 10.09.2013, bul. no. 17.
15. Chernish, E.Y. and Plyatsuk, L.D. (2012), "System engineering of biosulfid sewage sludge treatment", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 2, no. 73, pp. 174–178.
16. Process control technique of sewage treatment plants of urban sanitation (1977). Strovizdat. Moscow.
17. Soils. Methods for determination of total nitrogen (1984), GOST 26107–84, no. 66, Moscow.
18. Klymnyuk, S.I., Sytnyk, I.O., Tvoriko, N.S. et al. (2004), *Practychna microbiologia* [Applied Microbiology], Ukrmedknyha, Ternopol, Ukraine.
19. Holt, J.G., Sneath, P.H. and Krieg, N.R. (1994), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, USA.
20. Safrans, T.V. and Putlyaev, V.I. (2013), "Medical inorganic material in Russia: calcium phosphate materials", *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*, no. 1(4), pp. 24–47.
21. Henze, M. (1995), *Wastewater treatment: Biological and Chemical Processes*, Springer-Verlag. Berlin.

Стаття надійшла 30.06.2014.