

Досліджені характеристики впливу окисно-відновлювального потенціалу середовища на процес біологічної очистки стічних вод від фосфатів. Кількісні залежності встановлювали при лабораторному моделюванні аеробних і анаеробних умов культивування мулової рідини, а також при дослідженні діючих очисних споруд каналізації. Встановлено, що чим нижче ОВП середовища, тим більше фосфатів мобілізується з мулу у водне середовище в анаеробних умовах обробки і тим більш фосфатів іммобілізуються з водного середовища в мул в аеробних умовах

Ключові слова: стоки, активний мул, фосфати, окисно-відновлювальний потенціал, летучі жирні кислоти

Исследованы характеристики влияния окислительно-восстановительного потенциала среды на процесс биологической очистки сточных вод от фосфатов. Количественные зависимости устанавливали при лабораторном моделировании аэробных и анаэробных условий культивирования иловой жидкости, а также при обследовании действующих очистных сооружений канализации. Установлено, что чем ниже ОВП среды, тем больше фосфатов мобилизуется из ила в водную среду в анаэробных условиях обработки и тем больше фосфатов иммобилизуется из водной среды в ил в аэробных условиях

Ключевые слова: стоки, активный ил, фосфаты, окислительно-восстановительный потенциал, летучие жирные кислоты

УДК 628.35

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55395

ВЛИЯНИЕ РЕДОКС ПОТЕНЦИАЛА СРЕДЫ НА МИГРАЦИЮ ФОСФОРА В ИЛОВОЙ СМЕСИ

В. А. Юрченко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: yurchenko.valentina@gmail.com

А. В. Смирнов

Аспирант*

E-mail: ecoman2009@gmail.com

А. Ю. Бахарева

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра охраны труда и окружающей среды

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: baharevaann@gmail.com

*Кафедра безопасности

жизнедеятельности и инженерной экологии

Харьковский национальный

университет строительства и архитектуры

ул. Сумская, 40, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

Фосфор – один из главных биогенных элементов, является основным лимитирующим фактором развития эвтрофикации природных водоемов, которая создает чрезвычайные природоохранные и рыбохозяйственные проблемы, а также значительно усложняет водоподготовку для питьевого и промышленного водоснабжения. Главным источником поступления фосфора в природные водоемы являются недостаточно очищенные хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды [1]. На очистных сооружениях, работающих по традиционной технологии, распространенной в отечественной инженерной практике, эффективность удаления соединений фосфора составляет 20–40 %, что, безусловно, недостаточно для предотвращения загрязнения водоемов соединениями этого элемента. Концентрация соединений фосфора в сточных водах Украины за последние годы значительно увеличилась вследствие повышения использования фосфорсодержащих моющих и противонакипных средств, применения фосфорсодержащих добавок в мясной и рыбной продукции. Поэтому остаточные концентрации фосфорсодержащих соединений в сточных водах после обработки на очистных сооружениях устойчиво возрастают и эмиссия фосфора в природные водоемы также растет. Поэтому уменьшение количества фосфатов,

поступающих в поверхностные природные водоемы со сбросами бытовых и промышленных сточных вод, является одним из основных направлений борьбы с эвтрофикацией поверхностных источников питьевого водоснабжения.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Фосфор, содержащийся в сточной воде, представлен целым рядом фосфорсодержащих веществ: растворенным неорганическим ортофосфатом и полифосфатом, растворенным органическим фосфором, органическим фосфором во взвешенных веществах. Сумма фосфора перечисленных веществ представляет собой показатель «общий фосфор». Характерная концентрация общего фосфора в городских сточных водах $\approx 3\text{--}10\text{ мг/дм}^3$ (доля фосфатов $\approx 60\text{--}70\%$) [2].

При использовании традиционной схемы биологической обработки сточных вод фосфор удаляется согласно соотношению Р:БПК = 1:100 [3], в то время как нормативное соотношение Р:БПК при отведении от одного жителя составляет 2,4:100 [4], а в промышленных сточных водах – еще выше. В процессе биологической очистки сточных вод фосфаты потребляются микроорганизмами на прирост биомассы активного ила. Из

системы очистных сооружений соединения фосфора выводятся с избыточным активным илом. Для достижения нормативных требований при сбросе в природные водоемы эффективность удаления фосфатов на очистных сооружениях (20–40 %) необходимо существенно повысить и довести как минимум до 90–95 %.

Биологическая очистка сточных вод в аэротенках является эффективным и экономически выгодным способом удаления, как органических соединений, так и соединений фосфора, которые в городских сточных водах представлены главным образом (80–90 %) ортофосфатами [5]. Согласно современным представлениям, процесс биологического удаления фосфора в реакторах с активным илом осуществляется микроорганизмами, аккумулирующими гликоген (ГАО) или фосфат-аккумулирующими организмами (ФАО) [6]. Эти микроорганизмы (которые относятся к различным таксонам гетеротрофных бактерий) объединены по способности накапливать в клетках в аэробных и анаэробных условиях фосфор в форме полифосфатов, который в анаэробных условиях используется ими для энергетического обмена [7]. Разработку биологического способа удаления соединений фосфора относят к главным достижениям в области биологической очистки сточных вод второй половины XX века. Очистные сооружения с использованием активного ила, содержащего микробные сообщества, аккумулирующие полифосфаты, используют для очистки сточных вод уже на протяжении нескольких десятилетий. Наличие анаэробной зоны в очистных сооружениях позволяет удалить из сточных вод до 97 % фосфатов. Enhanced Biological Phosphorous Removal (EBPR) – усовершенствованный процесс биологического удаления фосфора, признается в настоящее время наиболее эффективным и экономически оправданным способом очистки сточных вод от фосфатов и предупреждения эвтрофикации [8].

Процесс удаления фосфора из сточных вод путем биологической очистки протекает в 2 ступени. Первая ступень происходит в анаэробных условиях, где концентрация фосфатов в сточной воде увеличивается, а органические вещества (ЛЖК) поглощаются клетками микроорганизмов – фосфотация. Затем в аэробных условиях происходит снижение концентрации фосфатов в сточной воде – дефосфотация, в результате поглощения их микробными клетками (рис. 1) [9]. Для проведения биологической очистки сточных вод от соединений фосфора в очистных сооружениях требуется организация анаэробных (с помощью механического перемешивания) и аэробных зон (с помощью пневматической аэрации) [10].

На анаэробной стадии ни кислород, ни NO_2/NO_3 не доступны для ФАО как акцептор электронов, которые снимаются с органичных субстратов. При этом органические субстраты потребляются из сточных вод, а фосфаты освобождаются в раствор. В таких условиях ФАО накапливают как резерв углерода полигидроксисутират и ряд других полигидроксиаканоатов. На анаэробной стадии происходит гидролиз внутриклеточных полифосфатов, а ФАО, используя энергию этих соединений, поглощают органические субстраты и синтезируют полигидроксиаканоаты. При следующей аэробной стадии полигидроксиаканоаты гидролизуются, синтезируется АТФ, и ил (а именно ФАО) поглощает больше фосфора, чем было освобождено на предыдущей анаэробной стадии. Фосфор, изъятый из сточных вод, накапливается в клетках ФАО в виде полифосфатов. Некоторое количество фосфатов удерживается также и внеклеточными полимерами. Обогащенный фосфором избыточный ил выводится из системы [11].

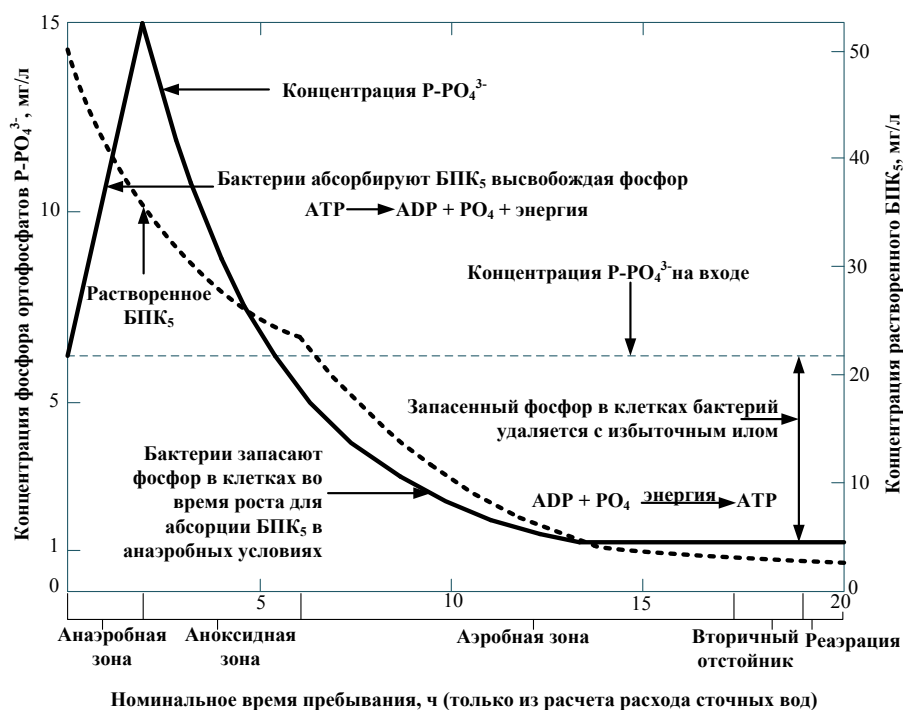


Рис. 1. Профиль изменения концентрации фосфатов при биологической очистке городских сточных вод от фосфора

К настоящему времени процесс биологического удаления фосфора, его биологические механизмы и управляющие воздействия остаются мало изученными, что создает ряд проблем для его стабильного и эффективного применения на практике [12].

Поэтому, хотя на сегодняшний момент и разработаны инженерные основы такой очистки сточных вод, но интенсивное изучение биохимических, молекулярно-биологических и микробиологических аспектов этого процесса продолжается в связи с его большой практической и экологической значимостью [13].

Среди факторов среды (параметров обработки сточных вод), которые по данным ряда исследований оказывают большое влияние на эффективность биологической очистки сточных вод от фосфатов, выделяют [14]:

- температуру иловой смеси;
- pH среды;
- концентрации в сточных водах летучих жирных кислот (ЛЖК), БПК, калия, кальция и магния, азота, фосфора и соотношение их концентраций с концентрациями органических загрязнений;
- концентрацию растворенного кислорода, нитратов;
- нагрузку на ил (гидравлическую и удельную);
- возраст ила и продолжительность обработки.

Как отмечалось выше, фосфор в городских сточных водах представлен, главным образом, ортофосфатами, при диссоциации которых в воде преобладают ионы H_2PO_4^- [15, 16]. Поскольку удаление фосфора ортофосфатов при биологической очистке сточных вод обусловлено миграцией их ионов в клетку и из клетки, на кинетику процесса могут оказывать влияние известные факторы пассивного переноса веществ через клеточную мембрану. К ним относятся химический потенциал, а на заряженные частицы (ионы), кроме того, влияют электрические потенциалы (например, мембранный потенциал) [17]. Диффузия ионов идет по направлению электрохимического потенциала. В связи с этим представляет научный и практический интерес влияние на процессы фосфатации и дефосфатации водных сред в системах с активным илом такого параметра обработки как редокс- или окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) водной среды, который характеризует способность воды обмениваться электронами с активным илом. Влияние ОВП на кинетику процессов биологической очистки сточных вод от соединений фосфора малоизученно [18].

3. Цель и задачи исследований

Целью проведенных исследований является установление количественных характеристик влияния ОВП водной среды на миграции фосфатов в системе активный ил–сточная вода и эффективность очистки сточных вод от соединений этого элемента на городских очистных сооружениях.

Задачи исследований:

- выявить в лабораторных условиях при моделировании процессов, происходящих в анаэробных и аэробных условиях биологических очистных сооружений (система отстойник – аэротенк – отстойник), показатели влияния ОВП на мобилизацию и иммобилизацию фосфатов в иловой жидкости;
- выявить в производственных условиях городских очистных сооружений показатели влияния ОВП иловой жидкости на динамику содержания фосфатов в водной фазе и эффективность очистки сточных вод от этих соединений.

4. Материалы и методы исследований

4.1. Объект экспериментальных исследований

Лабораторные исследования и исследования на действующих очистных сооружениях проводили с городских сточными водами, отбираемыми на различных этапах их обработки на биологических очистных сооружениях. Для моделирования в лабораторных условиях

процессов, происходящих в биологических очистных сооружениях, в качестве водной среды использовали поступающую на сооружения городскую сточную воду после механической очистки (табл. 1) и очищенную сточную воду после вторичных отстойников. Для различных вариантов опыта ОВП сточных вод перед постановкой эксперимента либо повышали (с помощью аэрации или добавления перекиси водорода $\leq 0,25$ мг/дм³), либо снижали (с помощью введения следовых количеств сульфида натрия ≤ 10 мг/дм³). По 1 дм³ сточной воды для каждого варианта опыта помещали в культиваторы, а затем вводили сгущенный активный ил (отобраный из илового канала на очистных сооружениях) для создания концентрации ~ 2 г/дм³. Культивирование проводили при температуре 22 °С при периодическом (каждые 2–3 ч за исключением ночного периода) механическом перемешивании. Контроль концентрации фосфатов, щелочности, жесткости, ОВП и pH в обработанной сточной воде выполнили через 2, 4, 24 ч культивирования.

Таблица 1

Состав сточных вод

Показатели	Сточная вода после I отстойника	Сточная вода после II отстойника
ХПК, мг/дм ³	238	77–88
Ортофосфаты, мг/дм ³	4,4–11,0	0–3,7
pH	7,06–7,55	7,31–7,60
Нитраты, мг/дм ³	0–0,6	15,7–25,8
Нитриты, мг/дм ³	0,13–0,26	0,07–0,42
ОВП, мВ	–303–(+60)	170–190

Обследование действующих очистных сооружений канализации (производительностью не меньше 50 тыс. м³/сут.) выполняли в различных городах Украины и Российской Федерации. Очистные сооружения были представлены классическим комплектом узлов очистки сточных вод в составе первичных и вторичных отстойников, аэротенков.

Аэротенки обследованных очистных сооружений работали как по традиционной схеме без выделения анаэробных и аэробных зон, так и при зонировании (рис. 2, а, б).

Подача сточных вод в аэротенки осуществлялась сосредоточенно и частично рассредоточено в первый коридор, подача активного ила – сосредоточенно в первый коридор.

4.2. Методики определения качества сточных вод

Гидрохимический анализ сточных вод выполняли по методикам, рекомендуемой нормативными документами Украины: определение концентрации фосфора ортофосфатов колориметрически с молибдатом аммония, нитратов колориметрически с салицилатом натрия, нитритов – колориметрически с α -нафтиламином, ХПК – бихроматным методом, pH – электрометрически. Определение концентрации общего фосфора в сточных водах выполняли после мокрой минерализации в виде ортофосфатов по методике, рекомендуемой [19]. Измерения ОВП сточных вод и иловой смеси проводили электрометрически используя платиновый электрод или с помощью портативного прибора NachHq30d с датчиком RedOx.

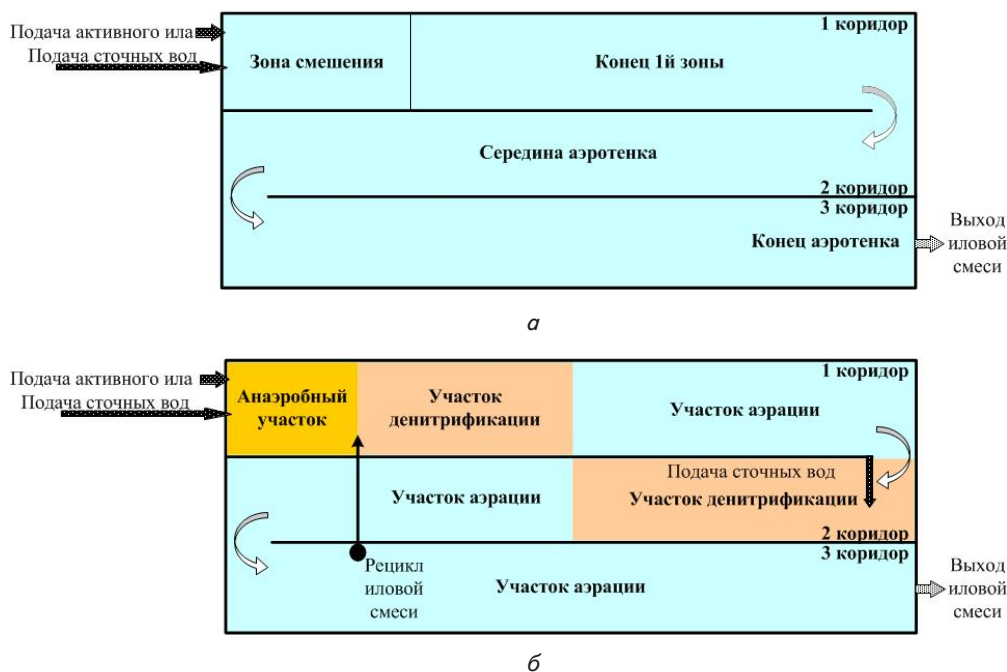


Рис. 2. Схема работы аэротенков: а – аэротенк без зонирования № 1; б – аэротенк с зонированием № 2

5. Результаты лабораторных и натурных исследований влияния редокс-потенциала на направленность и активность миграции фосфатов в системе активный ил-сточная вода

Результаты экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, представлены на рис. 3, 4. Прирост концентрации ортофосфатов определяли через 1 сут. культивирования. На диаграмме представлены исходные значения ОВП иловых жидкостей.

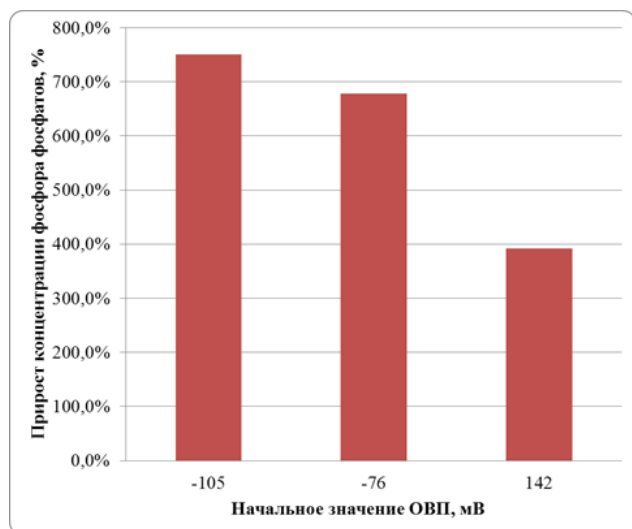


Рис. 3. Повышение концентрации фосфора фосфатов в неочищенной сточной воде в зависимости от начального уровня ОВП

По результатам проведенных лабораторных экспериментов были построены зависимости удельного повышения концентрации фосфатов (на 1 г сухого вещества активного ила) в сточной воде от:

- разности ОВП, создаваемых в сточной воде в различных вариантах опытов (рис. 5);
- исходного значения ОВП сточной воды (после первичных отстойников) (рис. 6).

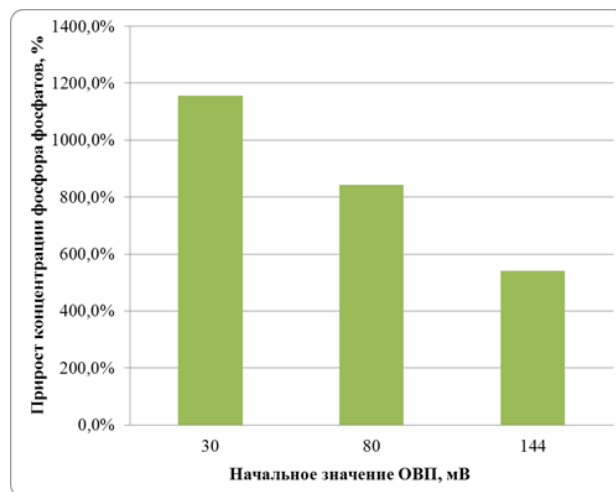


Рис. 4. Повышение концентрации фосфора фосфатов в очищенной сточной воде в зависимости от начального уровня ОВП

Для подтверждения зависимостей, полученных в ходе лабораторных измерений, провели параллельные измерения ОВП и концентрации фосфатов в динамике обработки сточных вод на действующих очистных сооружениях.

В аэротенках ОВП и концентрацию фосфора фосфатов в сточных водах определяли в верхнем канале аэротенка (сточная вода), после смешения возвратного ила и сточной воды (иловая смесь) в начале аэротенка, а также по ходу движения иловой смеси к концу аэротенка. Аэротенк 1 представлял собой

реактор–вытеснитель без выделения специальных анаэробных или аноксидных зон, а в аэротенке 2 была выделена зона перемешивания для денитрификации (аноксидная зона) между точками «Конец 1з» и «Сер.» (рис. 2). Результаты измерений представлены на рис. 7, а, б.

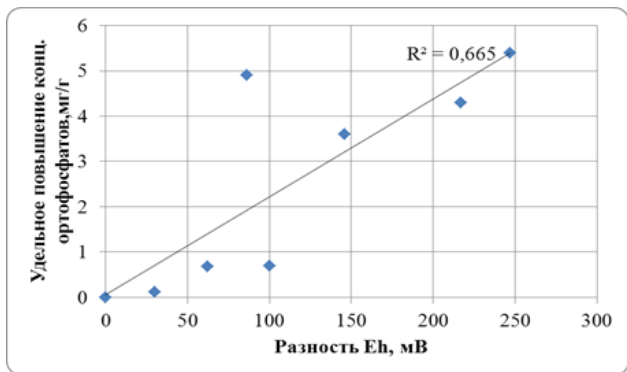


Рис. 5. Зависимость повышения концентрации фосфора фосфатов в неочищенной сточной воде от разности ОВП иловых жидкостей

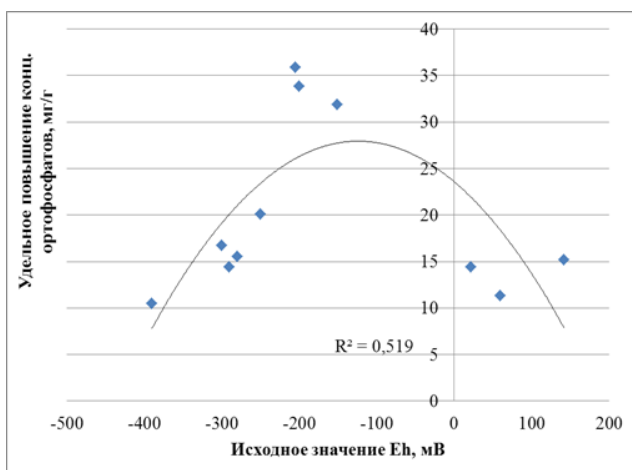
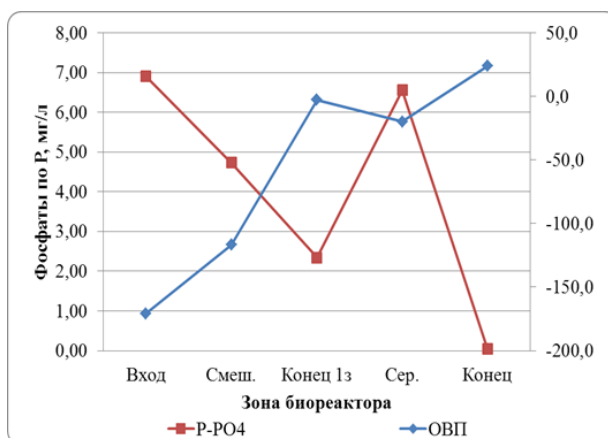
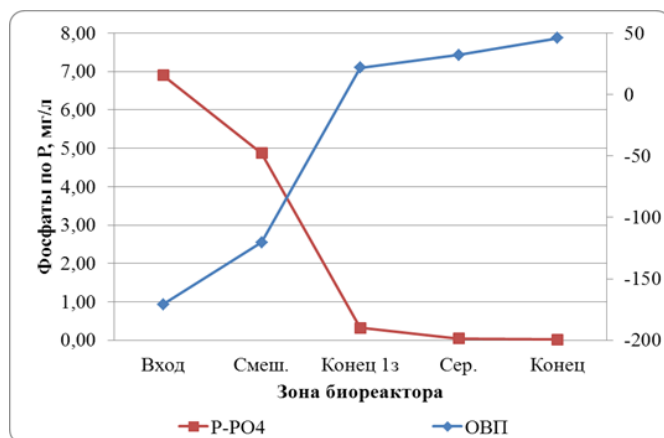


Рис. 6. Зависимость выхода фосфатов в водную среду от ОВП неочищенной сточной воды



а

б

Рис. 7. Динамика концентрации фосфора фосфатов и ОВП в процессе обработки сточных вод: а – в аэротенке № 1; б – в аэротенке № 2

Как видно из данных рис. 7, при повышении ОВП иловой жидкости концентрация фосфора фосфатов в динамике обработки сточных вод в аэротенках снижается, а при снижении ОВП концентрация фосфора фосфатов повышается, что подтверждает характер взаимосвязи этих показателей, установленный в лабораторных экспериментах.

Влияние ОВП на эффективность удаления фосфора при биологической очистке установили также при исследовании влияния преаэрации, используемой на ряде сооружений для повышения эффективности удаления органических загрязнений и оптимизации седиментационных свойств активного ила. Традиционно в схеме обработки сточных вод преаэраторы устраивают перед первичными отстойниками или конструктивно совмещают с ними. Продолжительность преаэрации 10–20 мин. при подаче воздуха в количестве 0,5 м³/м³ сточной жидкости [16, 17].

Преаэрацию на очистных сооружениях г. Чернигова (аэротенки с рассредоточенной подачей сточных вод без выделения анаэробной и аэробной зон) начали проводить с целью снижения концентрации в сточных водах сероводорода и подавления «вспухания» активного ила. Преаэратор располагался по традиционной схеме – перед первичными отстойниками, барботирование выполняли без подачи активного ила. Данные контроля состава сточных вод свидетельствуют о возрастании эффективности нитрификации: концентрация нитратов в очищенной воде устойчиво увеличивалась (рис. 8). А остаточная концентрация фосфатов в сточной воде, несмотря на повышение концентрации нитратов стабильно возрастала.

Аналогичное явление наблюдали на очистных сооружениях г. Харькова (табл. 2), где преаэрацию также применили для удаления сероводорода из поступающих сточных вод. Как свидетельствуют приведенные данные, после начала преаэрирования постепенно возросла концентрация нитратов в обработанной воде, которая на момент введения преаэрации не превышала 5 мг/дм³. Однако остаточная концентрация фосфора в сточных водах с введением преаэрации стала постепенно возрастать.

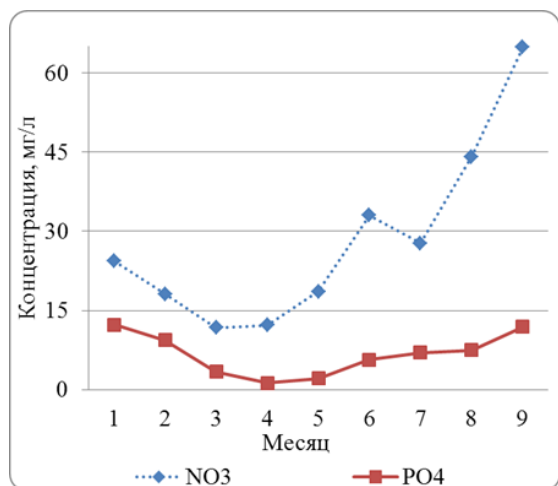


Рис. 8. Влияние преаэрации на остаточные концентрации соединений биогенных элементов

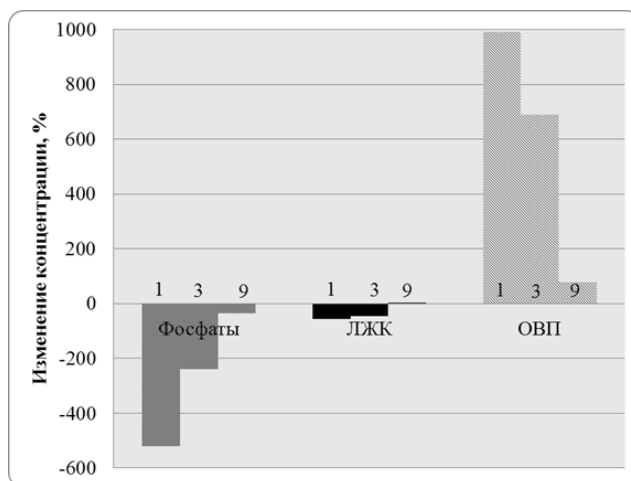


Рис. 9. Изменение (%) показателей состава поступающих (ЛЖК, ОВП) и очищенных сточных вод (фосфаты) при проведении преаэрации по сравнению с периодом без преаэрации в динамике работы преаэратора (1-е, 3-и, 9-е сут.)

Таблица 2

Влияние преаэрации на эффект очистки сточных вод от фосфатов

Схема обработки	Продолжительность работы преаэратора, сут.	Показатели	Этапы обработки сточных вод	
			После I отстояника	После аэротенка
Без преаэрации	-	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0	3,2
		PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	16,3	1,8
		ОВП, мВ	-70	+235
		ЛЖК, мг-экв/ дм ³	2,7	0,7
С преаэрацией	1	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0	13,4
		PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	13,6	5,3
		ОВП, мВ	0	+324
		ЛЖК, мг-экв/ дм ³	1,1	0,3
	3	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0	15,7
		PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	21,3	12,9
		ОВП, мВ	+55	+310
		ЛЖК, мг-экв/ дм ³	1,5	0,6
	9	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0	25,7
		PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	10,3	11,6
		ОВП, мВ	+144	+303
		ЛЖК, мг-экв/ дм ³	1,6	0,6

Сравнение динамики удаления фосфатов и динамики показателя состава сточных вод (ЛЖК), от которого, как свидетельствуют данные научно-технической литературы [18, 19] зависит этот процесс, а также динамики ОВП в течение 3 дней контроля, представлено на рис. 9.

Как видно, очень высокое снижение эффекта очистки от фосфатов происходит при относительно небольшом (на порядок меньше) снижении концентрации ЛЖК и очень большом (аналогичного порядка) повышении ОВП.

6. Обсуждение результатов лабораторных и натуральных исследований влияния редокс-потенциала сточных вод на удаление фосфатов биологическими методами

Как видно из данных рис. 3, 4, на активность биологической мобилизации фосфора из активного ила в сточную воду влияет уровень ОВП в этих средах: чем ниже ОВП водной среды, тем больше фосфатов мобилизуется из ила в водную среду. На активность мобилизации фосфатов действует не только абсолютное значение ОВП сточной воды, но и разность между ОВП сточной воды в различных вариантах опытов.

Эти выводы подтверждает зависимость, представленная на рис. 5. Как видно, между разностью ОВП водной среды в различных вариантах опытов и повышением концентрации фосфатов в воде в этих вариантах опытов отмечается линейная зависимость. Из данных рис. 6 видно, что снижение ОВП сточной воды от +100 до -300 мВ способствовало увеличению выхода фосфатов из активного ила в водную среду. Дальнейшее снижение ОВП на мобилизацию фосфатов из активного ила в водную среду не повышало.

Обратно пропорциональную зависимость между динамикой ОВП и концентрацией фосфатов в городских сточных водах, установленную в лабораторных экспериментах, подтвердили данные исследований, проведенные на действующих очистных сооружениях (рис. 6, 7).

Применение преаэрации сточных вод существенно понижает эффект их биологической очистки от фосфатов. Возможно, что это обусловлено отдувкой ЛЖК и снижением ХПК сточных вод, что приводит к уменьшению прироста активного ила и сопряженной с приростом биомассы ассимиляции фосфатов по соотношению БПК:P=100:1. Однако БПК_п городских сточных вод составляет ~ 0,67ХПК, поэтому максимальное снижение ХПК сточных вод после преаэрации (≤50 мг/дм³) приводило к снижению их БПК_п ~ на 34 мг/дм³, а, следовательно, уменьшению ассимиляции фосфора только на 0,34 мг/дм³ или на 1 мг/дм³ орто-

фосфатов. А по данным анализа сточных вод, снижение удаления фосфатов при использовании преаэрации составило 3,0–9,2 мг/дм³.

Согласно современным представлениям об основах биологического удаления фосфора из сточных вод [5], ЛЖК являются одним из обязательных субстратов в процессах, сопровождающихся и выбросом ортофосфатов клетками ФАО в анаэробной зоне. А такая зона (хотя и весьма небольшая) с отрицательными значениями ОВП формируется в первых коридорах обычных аэротенков без зонирования (рис. 7, а). Однако, по полученным данным, намного значимей, чем снижение концентрации ЛЖК в сточных водах после преаэрации, со снижением эффекта очистки от фосфатов коррелирует повышение ОВП сточной жидкости. Полученные количественные характеристики позволяют сформировать новый инструмент управления и интенсификации глубокого

удаления соединений фосфора при биологического очистке сточных вод.

7. Выводы

Проведенные экспериментальные исследования, как в лабораторных условиях, так и на действующих очистных сооружениях показали, что:

1. На миграцию фосфатов в системе активный ил – сточная вода (в конечном итоге эффективность очистки сточных вод от фосфатов) существенное влияние оказывает электрохимический потенциал – ОВП иловой жидкости – параметр обработки, поддающийся регулированию.

2. Максимальная активность мобилизации фосфатов из ила в сточную воду в анаэробных условиях происходит при ОВП – 150–300 мВ.

Литература

1. Chemical-physical methods for the removal of phosphorus from wastewater [Text]. – Standart ATV-DVWK-A 202E, 2004. – 25 p.
2. Залётова, Н. А. Особенности химического удаления фосфора при биологической очистки сточных вод [Текст] / Н. А. Залётова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 11. – С. 40–46.
3. Henze, M. Wastewater treatment – biological and chemical processes [Text] / M. Henze, P. Harremoës, P. M. J. Janssen, E. Arvin. – Springer Verlag, 1995.
4. Ruston, G. Engineering considerations for phosphorus removal [Text] / G. Ruston, C. Fort // IWEA O&M: seminar. – 2012. – P. 14.
5. Barnard, J. L. Biological nutrient removal: where we have been, where we are going? [Text] / J. L. Barnard // Proceedings of the Water Environment Federation (WEFTEC). – 2006. – Issue 13. – P. 1–25. doi: 10.2175/193864706783710578
6. Imhoff, K. R. Surface water quality objectives and standards in relation to improvement projects [Text] / K. R. Imhoff // Metropolitan Areas and Rivers: general reports. – 1996. – Vol. 1. – P. 33–57.
7. Randall, C. W. Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. Water quality management library [Text] / C. W. Randall, J. L. Barnard, H. D. Stensel // Lancaster: TECHNOMIC Publication. – 1992. – Vol. 5. – P. 420.
8. Keller, J. Nutrient removal from industrial wastewater using single tank sequencing batch reactors [Text] / J. Keller, K. Subramaniam, J. Gosswein, P. F. Greenfield // Water Science and Technology. – 1997. – Vol. 35, Issue 6. – P. 137–144. doi: 10.1016/s0273-1223(97)00104-2
9. Mahdy, A. M. Drinkig water treatment residuals as an amendment to alkaline soils: Effects on the growth of corn and phosphorus extractability [Text] / A. M. Mahdy, E. A. Elkhatib, N. O. Fathi // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 4, Issue 4. – P. 489–496. doi: 10.1007/bf03325985
10. Griffiths, P. C. Enviromental factors contributing to the “G bacteria” population in full-scale EBPR plants [Text] / P. C. Griffiths, H. M. Stratton, R. J. Seviour // Water Science and Technology. – 2002. - Vol. 46, Issue 4-5. - P. 185–192.
11. Bashan, L. E. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003) [Text] / L. E. de-Bashan, Y. Bashan // Water Research. – 2004. – Vol. 38, Issue 19. - P. 4222–4246. doi: 10.1016/j.watres.2004.07.014
12. Banu, R. J. Phosphorus removal in low alkalinity secondary effluent using alum [Text] / R. J. Banu, K. U. Do, I. T. Yeom // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2008. – Vol. 5, Issue 1. – P. 93–98. doi: 10.1007/bf03326001
13. Chemical-Physical Methods for the Removal of Phosphorus from Wastewater [Text]. – Standard ATV-DVWK-A 202E, 2004. – 25 p.
14. Christensson, M. Enhanced biological phosphorous removal [Text] / M. Christensson. – Lund, Sweden, 1997. – 79 p.
15. Janssen, P. M. J. Biological phosphorus removal: manual for design and operation [Text] / P. M. J. Janssen, K. Meinema, H. F. van der Roest. – London: IWA Publishing, 2002. – 26 p.
16. Deinema, M. H. Some physiological characteristics of Acinetobacter spp. accumulating large amounts of phosphate [Text] / M. H. Deinema, M. V. Loosdrecht, A. Scholten // Water Science and Technology. – 1985. – Vol. 17. – P. 119–125.
17. He, S. Fine-scale differences between Accumulibacter-like bacteria in enhanced biological phosphorous removal activated sludge [Text] / S. He, A. Z. Gu, K. D. McMahon // Water Science and Technology. – 2006. – Vol. 54, Issue 1. – P. 111–117. doi: 10.2166/wst.2006.378
18. Blackall, L. L. A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorous removal in wastewater treatment plants [Text] / L. L. Blackall, G. R. Crocetti, A. M. Saunders, P. L. Bond // Antonie Van Leeuwenhoek. – 2002. – Vol. 81. – P. 681–691.
19. Cloete, T. E. The role of extracellular exopolymers in the removal of phosphorous from activated sludge [Text] / T. E. Cloete, D. J. Oosthuizen // Water Resources. – 2001. – Vol. 35, Issue 15. – P. 3595–3598. doi: 10.1016/s0043-1354(01)00093-8
20. Лурье, Ю. Ю. Химический анализ производственных сточных вод [Текст] / Ю. Ю. Лурье, А. И. Рыбникова. – 4-е изд., перераб. – М.: Химия, 1974. – 336 с.