

Заключение. Для эффективной очистки воды на станциях водоподготовки проводят исследования по регулированию оптимальных условий коагулирования примесей поверхностных вод, что является важной задачей для подготовки воды, используемой для питьевых целей (выбор коагулянтов и флокулянтов, определение их доз, порядок и место ввода в обрабатываемую воду и др.).

Список цитированных источников

1. Гигиенический норматив «Показатели безопасности питьевой воды», утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2021 г., № 37.
2. СН 4.01.01-2019 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения», Минск, 2020 г., 68 с.
3. Драгинский, В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных вод / Науч. изд. – М., 2005 г., 576 с.

УДК 628.161.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РЕАГЕНТНОГО УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Слинка Е. А.¹, Каперейко Д. В.²

Научные руководители: Акулич Т. И.³, Андreyuk С. В.⁴

¹Студент факультета инженерных систем и экологии (далее ФИСЭ), БрГТУ, Брест, Беларусь, v0011222@g.bstu.by

²Студент ФИСЭ, БрГТУ, Брест, Беларусь, darkapereyko@mail.ru

³Старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, Брест, Беларусь, tigol1976@mail.ru

⁴Заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, Брест, Беларусь, svandreuyuk@g.bstu.by

Аннотация

Данное исследование посвящено изучению технологий очистки городских сточных вод, специально разработанных для удаления биогенного элемента фосфора. Для оптимизации процесса очистки использовались методы математического моделирования на основе влияющих и определяющих факторов. Объектом исследования стала реагентная обработка сточных вод с применением метода планирования эксперимента. Проанализированы публикации и результаты по теме исследования. Получены квадратичные уравнения регрессии для определения зависимости остаточной концентрации фосфатов в сточных водах от условий дозирования реагентов.

Ключевые слова: очистка сточных вод, дефосфотация, оптимальное планирование, многофакторный эксперимент.

THE USE OF THE REAGENT PHOSPHORUS REMOVAL METHOD IN WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGY

Slinka E. A.¹, Kapereyko D. V.²

Abstract

This study is devoted to the study of urban wastewater treatment technologies specifically designed to remove the biogenic element phosphorus. Mathematical modeling methods based on influencing and determining factors were used to optimize the cleaning process. The object of the study was the reagent treatment of wastewater using the experimental planning method. The publications and results on the research topic are analyzed. Quadratic regression equations have been obtained to determine the dependence of the residual phosphate concentration in wastewater on the dosing conditions of reagents.

Keywords: wastewater treatment, dephosphotation, optimal planning, multifactorial experiment.

Введение. В настоящее время одной из актуальных задач при очистке сточных вод является удаление биогенных элементов. Повышенное содержание азота и фосфора в воде водных объектов приводит к их эвтрофикации. При этом фосфор оказывает преобладающее воздействие на цветение водных объектов.

В результате очистки сточных вод биологическим методом эффективность по фосфору составляет 78-80% [1]. При этом процесс биологической очистки очень чувствительный и нестабильный, его сложно организовать при совмещении с процессами нитрификации и денитрификации. Применение химического удаления фосфора позволяет снижать его содержание на 95% (до 0,5 мг/дм³).

Целью выполненных научных исследований стало установление зависимости эффекта дефосфотации сточных вод от дозы реагента при использовании минеральных реагентов с учетом изменения условий среды. Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи исследования:

- 1) изучить теоретические основы реагентного удаления фосфора;
- 2) изучить кинетику процесса химической дефосфотации сточных вод путем проведения исследований по подбору оптимальной дозы реагентов в зависимости от отношения концентрации реагента по металлу к исходной концентрации фосфора (соотношения Me:P);
- 3) провести исследование процесса дефосфотации при различных значениях pH и температуры.

Исследование процесса реагентного удаления фосфора сточных вод проводилось на кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет» и были выполнены с учетом опыта эксплуатации действующих очистных сооружений канализации г. Бреста [2, 3].

При проведении исследований использовалась методики определения фосфатов, температуры и рН сточных вод, технологические и математические методы с учетом действующих ТНПА.

Сущность реагентного метода дефосфотации. Применяемые реагенты, их дозы. Сущность метода *химического удаления фосфора* из сточных вод, использованного в исследованиях, заключается в добавлении реагентов, образовании и осаждении нерастворенных соединений фосфора и вывода их с осадком.

Проведенный аналитический обзор показал, что в качестве реагентов могут применяться:

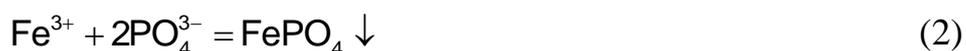
- соединения кальция (оксид кальция CaO и гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$);
- соединения алюминия (сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, оксихлорид алюминия $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$ и др.);
- соединения железа (хлорид железа (III) $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, сульфат железа (II) $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и др.);
- природные материалы (глины, известняк, цеолит, доломит и др.);
- отходы производства (доменный шлак, осадок водопроводных очистных сооружений).

Применение **солей алюминия** в качестве реагентов для химического удаления фосфора описывается следующей реакцией:



Требуемое количество алюминия на грамм фосфора может также быть получено из молярного отношения $\text{Al}:\text{P}$ следующим образом: молярное соотношение Al к P - 1:1, весовое отношение $\text{Al}:\text{P} = 27:31 = 0,87:1$.

Применение **солей железа** в качестве реагентов для химического удаления фосфора описывается следующей реакцией:



Молярное соотношение $\text{Fe}:\text{P}=1:1$, весовое отношение $\text{Fe}:\text{P} = 56:31 = 1,8:1$.

Однако на практике для достижения более высокого эффекта дефосфотации приходится использовать большую дозу реагента, чем полученную по стехиометрическим соотношениям. При расчете это отображается коэффициентом β -фактор, входящем в формулу дозы реагента.

Доза реагента (по металлу) X_{Me} , мг/дм³, рассчитывается из выражения:

$$X_{\text{Me}} = \beta \cdot \frac{X_{\text{P, Prec}} \cdot \text{AM}_{\text{Me}}}{\text{AM}_{\text{P}}}, \text{ мг / дм}^3, \quad (3)$$

где $X_{\text{P, Prec}}$ – количество фосфора, которое необходимо удалить за счет химического осаждения, мг/дм³;

AM_{Me} – атомная масса металла, входящего в состав реагента, мг/моль, для Al – 27 мг/моль, для Fe – 56 мг/моль;

AM_{P} – атомная масса фосфора, мг/моль, принимается 31 мг/моль.

β -фактор – коэффициент, учитывающего превышение фактического количества реагента, требуемого для осаждения 1 моля фосфора, моль/моль, над расчетным стехиометрическим количеством.

Доза реагента (по чистому реагенту) $D_{\text{реаг}}$, мг/дм³, рассчитывается:

$$D_{\text{реаг}} = \frac{X_{\text{Me}} \cdot MM_{\text{реаг}}}{MM_{\text{Me}}}, \text{ мг / дм}^3 \quad (4)$$

где $MM_{\text{реаг}}$ – молекулярная масса реагента, мг/моль, для сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ – 666 мг/моль, для хлорида железа (III) $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ – 270,5 мг/моль, для сульфата железа (III) $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ – 562 мг/моль, для оксихлорида алюминия $Al_2(OH)_5Cl$ – 174,5 мг/моль; ; для полиоксихлорида алюминия (реагента «Аква аурат 30») – 109,37 мг/моль.

MM_{Me} – молекулярная масса металла, входящего в состав реагента, мг/моль.

На процесс химического удаления фосфора влияет ряд факторов, определяющими являются стехиометрическая доза реагента; β -фактор; значение рН среды; температура среды; метод осаждения; реализация процессов разделения фосфорного осадка и водной среды.

Исследование эффективности применения минеральных реагентов для дефосфотации воды при различных условиях протекания процесса. В рамках экспериментальных исследований процесса дефосфотации сточных вод осуществлялся подбор оптимальной дозы реагента с учетом значения рН и температуры обрабатываемой воды, а также β -фактора, учитывающего превышение фактического количества реагента, требуемого для осаждения 1 моля фосфора над расчетным стехиометрическим количеством [4,5].

При проведении исследований в качестве имитата загрязненной воды использовали водопроводную воду с добавкой фосфатов в количестве 10 мг/дм³. Обработка воды осуществлялась реагентом Аква Аурат 30 (Al_2O_3 30%) в виде 1%-го раствора.

В таблице 1 представлены результаты влияния дозы вводимого реагента на остаточную концентрацию фосфатов при разных значениях рН при температуре сточной воды 10⁰С.

Таблица 1 – Влияние рН и дозы вводимого реагента эффект удаления фосфатов при температуре 10⁰С

Водородный показатель рН	Остаточная концентрация фосфатов (C_p) и эффект удаления (\mathcal{E}_p) при β -факторе					
	1		1,5		2,0	
	C_p , мг/дм ³	\mathcal{E}_p , %	C_p , мг/дм ³	\mathcal{E}_p , %	C_p , мг/дм ³	\mathcal{E}_p , %
6,5	3,20	68	2,11	78,9	1,22	87,8
7,5	3,12	68,8	1,98	80,2	1,46	85,4
8,5	3,00	70	2,00	80	1,55	84,5

Также опытным путем устанавливалось влияние дозы вводимого реагента на остаточную концентрацию фосфатов при разных значениях температуры при рН сточной воды 6,5. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние температуры и дозы вводимого реагента эффект удаления фосфатов при рН 6,5

Температура, °С	Остаточная концентрация фосфатов (C_p) и эффект удаления (\mathcal{E}_p) при β -факторе					
	1		1,5		2,0	
	C_p , мг/дм ³	\mathcal{E}_p , %	C_p , мг/дм ³	\mathcal{E}_p , %	C_p , мг/дм ³	\mathcal{E}_p , %
10	3,20	68	2,11	78,9	1,22	87,8
15	2,94	70,6	1,85	81,5	0,98	90,2
20	2,46	75,4	1,74	82,6	0,85	91,5

Для установления оптимальных значений параметров реагентной дефосфатации была разработана математическая модель данного процесса, которая позволяет подобрать оптимальную дозу коагулянта в зависимости от отношения концентрации реагента по металлу к исходной концентрации фосфора (β -фактор) при различных значениях водородного показателя рН и температуры обрабатываемой среды [6].

Анализ уравнения по определению $C_{ост}$ в зависимости от рН, β , t , выполненный с использованием свойства функции, имеющей экстремум, позволил установить, что минимальная остаточная концентрация фосфатов в процессе реагентной очистки сточных вод достигается при определенных значениях исследованных факторов, при этом наибольшее влияние на эффект очистки оказывают β -фактор и рН среды (рисунки 1,2).

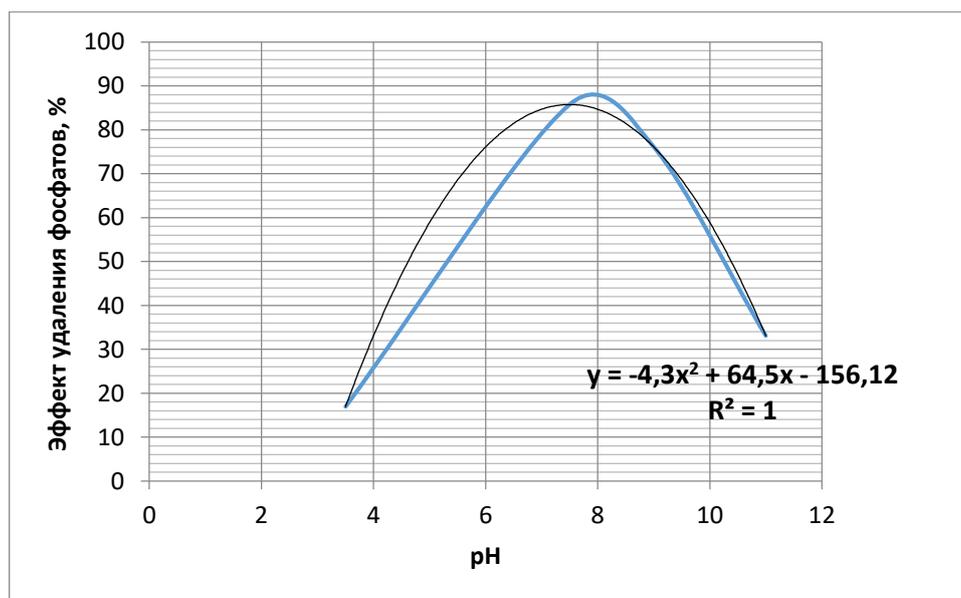


Рисунок 1 – Влияние параметра рН на эффективность удаления фосфатов при температуре воды $t=9,5$, °С, и β -факторе=2,17

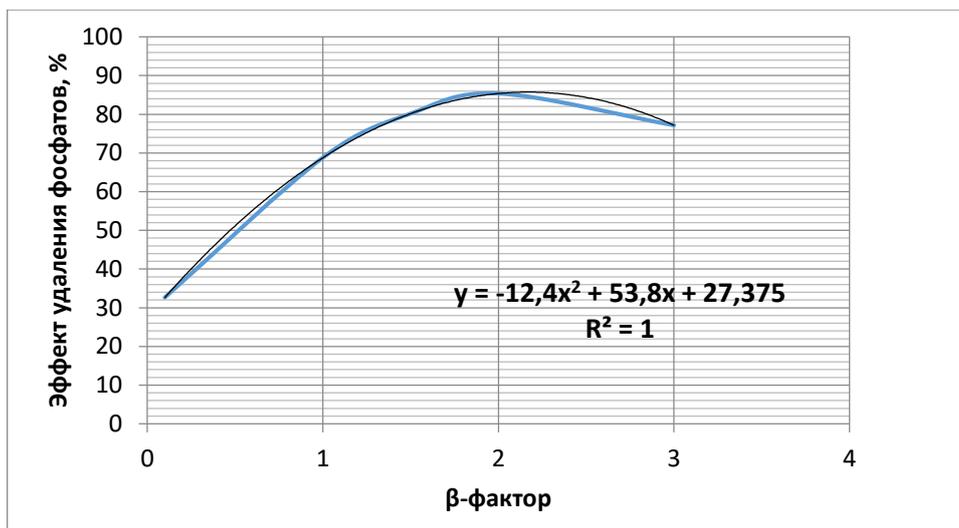


Рисунок 2 – Влияние β -фактора на эффективность удаления фосфатов при параметре $pH=7,5$ и температуре воды $t=9,5^{\circ}C$

Оптимальная доза реагента «Аква Аурат 30» (по металлу) X_{Me} , мг/дм³, рассчитанная из выражения (3), составила:

$$X_{Me} = 2,17 \cdot \frac{10 \cdot 27}{31} = 18,9 \approx 19 \text{ мг / дм}^3.$$

Оптимальная доза реагента «Аква Аурат 30» (по чистому реагенту) $D_{реар.}$, мг/дм³, рассчитанная из выражения (4), составила:

$$D_{реар.} = \frac{18,9 \cdot 109,37}{27} = 76,6 \text{ мг / дм}^3.$$

Заключение. По результатам экспериментальных и расчетных данных установлены зависимости остаточной концентрации фосфатов от дозы алюминийсодержащего реагента при различных параметрах среды.

При проведении исследований по обработке модельного раствора с концентрацией фосфатов 10 мг/дм³ реагентом Аква Аурат 30 установлено:

- с увеличением дозы коагулянта (увеличение значения β -фактора) достигается эффект очистки от 68 до 91,5%;
- максимальный эффект удаления фосфатов находится при pH в пределах 6,5-7,5;
- эффективность дефосфатации с ростом температуры увеличивается, максимальный эффект имеет место при температуре 20⁰C.

Разработана математическая модель данного процесса, которая позволяет установить оптимальные значения параметров реагентной дефосфатации. Установлена оптимальная доза коагулянта в зависимости от отношения концентрации реагента по металлу к исходной концентрации фосфора (β -фактор) при различных значениях водородного показателя pH и температуры обрабатываемой среды, которая составляет $X_{Me}=19$ мг/дм³.

Список цитированных источников

1. Мешенгиссер, Ю. М. Ретехнологизация сооружений очистки сточных вод / Ю. М. Мешенгиссер. – М.: ООО «Издательский дом «Вокруг цвета», 2012. – 211 с.
2. Яловая, Н.П. Анализ и прогноз расходов и нагрузок сточных вод, поступающих на очистные сооружения канализации города Бреста / Н.П. Яловая, В.А. Бурко, // Перспективные методы очистки природных и сточных вод : сборник статей рег. научно-технической конференции, Брест, 26 сент. 2019 г. / редкол.: С.Г. Белов [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 74–76.
3. Каперейко, Д. В. Анализ эффективности работы городских канализационных очистных сооружений / Д. В. Каперейко, А. А. Хведченя, Я. В. Полещук // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : сб. науч. тр. по материалам IX Всероссийской (с междунар. участием) науч. техн. конф. / сост. В.В. Корунчикова, Л.С. Новопольцева; под ред. И.С. Белюченко. – Краснодар : КубГАУ, 2022.
4. Андреюк, С. В. Технологическое моделирование процесса реагентного удаления фосфора из сточных вод / С. В. Андреюк, Т. И. Акулич, Е. С. Гогина, Д. В. Каперейко // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2022. – № 3 (129). – С. 2–4. – DOI: 10.36773/1818-1112-2022-129-3-2-4.
5. Каперейко, Д. В. Исследование процесса дефосфотации сточных вод реагентным методом / Д.В. Каперейко, А.И. Морозова // Сборник статей лауреатов и авторов научных работ, получивших первую категорию по итогам XXIX Республиканского конкурса научных работ студентов – Минск: БГУиИР, 2023 – С.78.
6. Андреюк, С. В. Моделирование процессов водоподготовки и водоочистки в системах водоснабжения и водоотведения / С.В. Андреюк, Б. Н. Житенев, Т. И. Акулич, Д.В. Каперейко // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 4-10.

УДК 628.35

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД. МЕТОД МЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ

Шпигун А. В.¹, Антонюк Е. К.²

¹Студент факультета инженерных систем и экологии, БрГТУ, Брест, Беларусь, shpiguнаlesya@mail.ru

²Старший преподаватель кафедры инженерной экологии и химии, БрГТУ, Брест, Беларусь, elantik@yandex.ru