

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОСФОТАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД РЕАГЕНТНЫМ МЕТОДОМ

*С. В. Андреюк, Т. И. Акулич, Д. В. Капереико*

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,  
a\_asv75@mail.ru

### **Аннотация**

Очистка сточных вод является важным компонентом в системе защиты окружающей среды от загрязнения. Основной причиной эвтрофикации поверхностных водных объектов на современном этапе является поступление со сточными водами в поверхностные источники водоснабжения значительного количества соединений азота и фосфора. Работа посвящена исследованию технологии очистки городских сточных вод, специально предназначенной для удаления биогенного элемента фосфора. Целью выполненных научных исследований стало установление зависимости эффекта дефосфотации сточных вод от дозы реагента при использовании минеральных реагентов с учетом изменения условий среды. Для оптимизации процесса очистки использованы методы математического моделирования на основе влияющих и определяющих факторов. Проведен анализ публикаций и достижений по теме исследования. Получены графики и уравнения регрессии, которые определяют зависимость остаточной концентрации фосфатов сточных вод от условий дозирования реагента.

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

## INVESTIGATION OF THE PROCESS OF WASTEWATER PHOSPHORUS REMOVAL BY THE REAGENT METHOD

*S. V. Andreyuk, T. I. Akulich, D. V. Kapereiko*

### **Abstract**

Wastewater treatment is an important component in protecting the environment from pollution. The main reason for eutrophication of surface water bodies at the present stage is the intake of a significant amount of nitrogen and phosphorus compounds with wastewater into surface water supply sources. The work is devoted to the study of the technology of urban wastewater treatment, specially designed to remove the biogenic element phosphorus. Methods of mathematical modeling based on influencing and determining factors were used to optimize the cleaning process. The object of the study was the dephosphotation of wastewater by the method of optimal planning of the experiment. The analysis of publications and achievements on the research topic is carried out. Second-order regression equations are obtained, which determine the dependence of the residual concentration of wastewater phosphates on the conditions for dosing the reagent.

**Keywords:** wastewater treatment, dephosphotation, optimal planning, multifactor 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.

Изучение механизмов сложных процессов и свойств многокомпонентных систем, а также их оптимизация в современной математической теории позволяют смоделировать процессы очистки сточных вод на основе влияющих и определяющих факторов. Объектом исследования стала реагентная дефосфатация сточных вод с применением метода оптимального планирования эксперимента [1].

Математические модели, полученные с помощью методов планирования экспериментов, принято называть экспериментально-статистическими [2]. При этом ценность математического описания заключается в том, что оно дает информацию: о закономерностях влияния отдельных факторов на функцию отклика; позволяет количественно определить значение функции отклика при заданных значениях факторов; может служить основой для оптимизации процесса, его имитации [3].

Удаление биогенных элементов – соединений азота и фосфора, приводящих к эвтрофикации водных объектов, является в настоящее время одним из главных направлений в области очистки сточных вод. Удаления азота и фосфора биологическим методом взаимосвязаны. В силу достаточно жестких требований по содержанию фосфора в очищенной воде приоритеты перемещаются в сторону удаления фосфора.

При использовании биологического метода очистки эффективность по снижению концентрации фосфора составляет 78-80 %. При этом процесс биологической очистки считается очень чувствительным и нестабильным. Применение метода химического удаления фосфора позволяет снижать его концентрации на выходе с очистных сооружений на 95% (до 0,5 мг/дм<sup>3</sup>).

В работах [4, 5] рассмотрены вопросы математического моделирования процессов флотационной очистки сточных вод. Даны описания термодинамических и кинетических моделей флотационного процесса. Показано, что использование математических моделей устройств для очистки сточных вод позволяет оптимизировать их технологические и экономические показатели без существенных затрат на проведение дополнительных экспериментальных исследований. Известна разработка программного комплекса, математически описывающего динамику анаэробной очистки сточных вод на примере реакторов традиционного типа и реакторов, в которых осуществляется пространственное разделение стадий кислого и метанового брожения [6], исследован процесс мембранной очистки сточной жидкости [7]. Проведена математическая обработка результатов экспериментальных исследований с помощью интерполяционных полиномов, установлена функциональная зависимость изменения физико-химических показателей процессов мембранной очистки сточных вод.

Сущность метода химического удаления фосфора из сточных вод заключается в добавлении реагентов, образовании и осаждении нерастворенных соединений фосфора и вывода их с осадком. В качестве реагентов могут применяться:

- соединения кальция (оксид кальция  $\text{CaO}$  и гидроксид кальция  $\text{Ca(OH)}_2$ );
- 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).

В работах [8–11] основное внимание обращается на изучение методов дефосфотации сточных вод и эффективность их использования. Каждый из описанных способов по-своему действует на удаление фосфатов из стоков за счет применения особых реагентов и их физических свойств. Известны исследования по математическому моделированию процессов дефосфотации сточных вод методом полного факторного эксперимента [12–14]. В частности, в работе [14] рассматриваются особенности построения математической модели процесса реагентной дефосфотации высококонцентрированных сточных вод свинокомплекса с использованием в качестве реагента сульфата железа. Получено характеристическое уравнение для расчета эффективности удаления соединений фосфора в зависимости от дозы реагента, температуры и Eh. В работе [15] анализируется влияние фосфат-ионов на водоем-охладитель Ростовской АЭС и рассматривается применение узла дефосфотации в схеме реконструированных очистных сооружений зоны «свободного» режима для его снижения с использованием в качестве коагулянта «Аква–Аурат 30». Известна комплексная оценка эффективности удаления соединений фосфора из сточной воды с его накоплением в активном иле с применением инновационного реагентного препарата VTA Biokat P500 [16]. Приведены результаты совместной биологической и физико-химической очистки [17]. В результате моделирования показаны преимущества использования комбинированной химико-биологической дефосфотации сточных вод аэротенках. Актуализируется необходимость совершенствования биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод [18].

С учетом анализа публикаций и достижений в области оптимизации процесса очистки сточных вод от биогенных элементов задачей собственных исследований стало получение экспериментально-статистических уравнений регрессии, отражающих эффективность реагентной очистки.

Целью выполненных научных исследований стало установление зависимости эффекта дефосфотации городских сточных вод от дозы реагента при использовании различных видов реагентов пробным коагулированием с учетом изменения условий среды. Для достижения поставленной цели ставились следующие подлежащие решению задачи исследования: 1) аналитический обзор применения метода реагентного удаления фосфора; 2) изучение кинетики процесса химической дефосфотации сточных вод; 3) подбор оптимальной дозы коагулянта в зависимости от отношения концентрации реагента по металлу к ис-

ходной концентрации фосфора (соотношения Me:P) при различных значениях pH и температуры.

**Материалы и методы.** Исследования химической дефосфотации сточных вод проводились с возможностью практического применения реagenтного метода удаления фосфора на действующих очистных сооружениях канализации г. Бреста [19, 20]. В работе использовались методики определения фосфатов сточных вод, пробного коагулирования по подбору оптимальной дозы реагента, применялись технологические и математические методы исследований с учетом действующих ТНПА.

Пробное коагулирование при обработке сточных вод проводилось 1%-м раствором коагулянта полиоксихлорид алюминия «Аква-Аурат 30» (с массовой долей  $Al_2O_3$  30%) при начальной концентрации фосфатов 10 мг/дм<sup>3</sup>.

Положительную динамику очистки получили также в результате пробного коагулирования реагентом сульфат железа (III)  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$  (доза 1%-го раствора варьировалась от 18 до 63 мг/дм<sup>3</sup>).

С учетом аналитического обзора применения метода reagenтного удаления фосфора и изучения кинетики процесса химической дефосфотации сточных вод оптимальное планирование эксперимента проводилось с использованием полиоксихлорида алюминия.

**Результаты и обсуждение.** В рамках экспериментальных исследований для определения оптимальных значений параметров технологического процесса коагуляции соединений фосфора сточных вод при моделировании процесса очистки рассматривали зависимость остаточной концентрации фосфатов  $C_{ост}$ , мг/дм<sup>3</sup>, от трех факторов (таблица 1): 1)  $\beta$ -фактора, учитывающего превышение фактического количества реагента, требуемого для осаждения 1 моля фосфора, моль/моль, над расчетным стехиометрическим количеством; 2) значения pH среды; 3) температуры среды,  $t$ , °C.

**Таблица 1** – Условия проведения полного факторного эксперимента

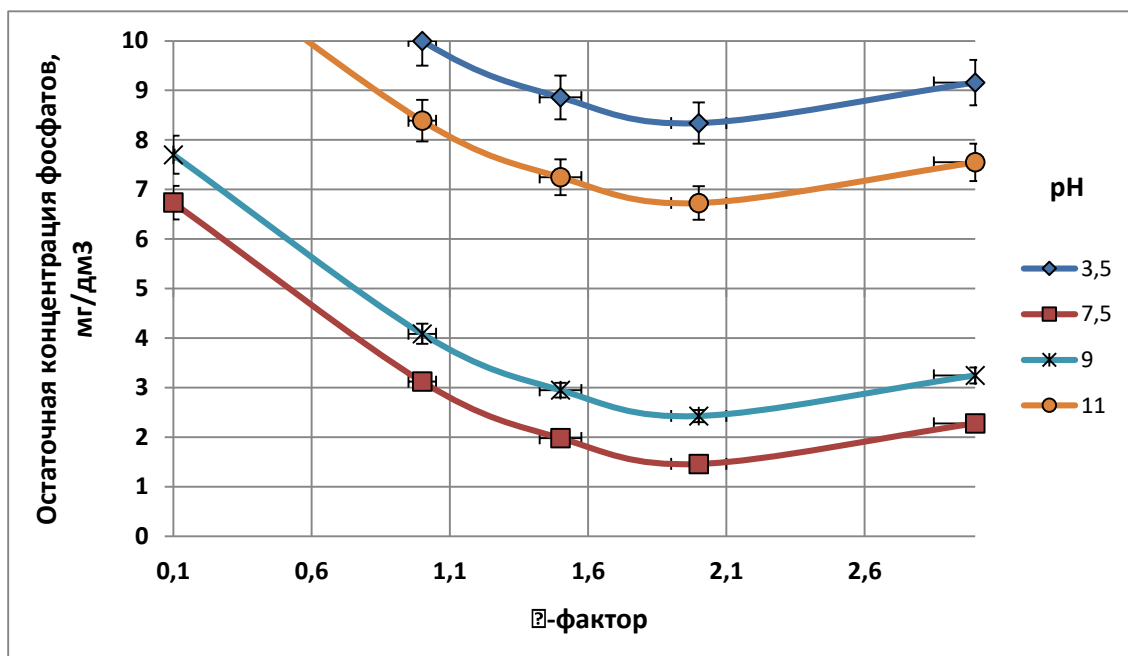
Характеристики плана эксперимента	pH	$\beta$	$t$ , °C
Основной уровень	7,5	1,5	15
Интервал варьирования	1	0,5	5

На первом этапе исследований в качестве имитата загрязненной воды использовали водопроводную воду с добавкой фосфатов в количестве 10 мг/дм<sup>3</sup>. По результатам обработки экспериментальных данных составлено уравнение регрессии  $C_{ост} = f(pH, \beta, t)$  в виде многочлена второй степени от трех переменных

$$C_{ост} = 1,24 \beta^2 - 5,38 \beta + 0,43 (pH)^2 - 6,45(pH) + 0,01 t^2 - 0,19 t + 32,35. \quad (1)$$

Разработанная экспериментально-статистическая модель (1) позволяет представить поверхность отклика на факторной плоскости линиями зависимости остаточной концентрации фосфатов  $C_{ост}$  от  $\beta$ -фактора (отношения концентрации реагента по металлу к исходной концентрации фосфора) и внешних факторов среды.

Анализ уравнения по определению  $C_{ост}$  в зависимости от  $pH$ ,  $\beta$ ,  $t$ , 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: наибольшее влияние на эффект очистки оказывают  $\beta$ -фактор и  $pH$  среды (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Влияние  $\beta$ -фактора на процесс удаления фосфатов при различном параметре  $pH$  и температуре воды  $t=9,5^\circ C$

**Заключение.** 1. Удаление биогенных является актуальной задачей в области охраны водных ресурсов; выполнены аналитические и экспериментальные исследования процесса химической дефосфотации сточных вод с использованием реагентов полиоксихлорида алюминия и сульфата железа. 2. По результатам проведения трехфакторного рототабельного эксперимента с применением коагулянта «Аква-Аурат 30» получено уравнение регрессии второго порядка, которое является экспериментально-статистической моделью процесса реагентной очистки сточных вод от фосфатов; все коэффициенты регрессии уравнения значимы. 3. При начальной концентрации фосфатов  $10 \text{ мг/дм}^3$  установлены оптимальные значения параметров реагентной дефосфотации, при которых достигается наименьшая остаточная концентрация фосфатов в обработанной воде:  $pH=7,5$ ;  $\beta=2,17$ ;  $t=9,5^\circ C$ . 4. Полученная математическая модель процесса реагентной дефосфотации сточных вод позволяет выполнить подбор оптимальной дозы коагулянта в зависимости от отношения концентрации реагента по металлу к исходной концентрации фосфора при различных значениях  $pH$  и температуры обрабатываемой среды.

#### Список цитированных источников

1. Папенко, В. В. Математическая модель многофакторного технологического эксперимента / В. В. Папенко, В. А. Достовалов // Вологодские чтения. – 2005. – № 53. – С. 46–49.

2. Андreyuk, С. В. Реагентная дефосфотация сточных вод с применением метода оптимального планирования эксперимента / С. В. Андreyuk, Т. И. Акулич // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тезисов докладов IV 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, 2021. – С. 6.
3. Андreyuk, С. В. Моделирование процессов подготовки воды для технического и питьевого водоснабжения / С. В. Андreyuk, М. А. Таратенкова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2021. – № 2. – С. 46–57. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-34-2-46-57.
4. Андреев, С. Ю. Моделирование процессов флотационной очистки сточных вод / С. Ю. Андреев, Б. М. Гришин, В. Г. Камбург, Т. В. Алексеева, И.Б. Ширшин // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 2. – С. 91–99.
5. Савдур, С. Н. Системный подход в моделировании технологического процесса очистки нефтесодержащих сточных вод // С. Н. Савдур, С. А. Понкратова // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 7. – С. 218–226.
6. Пономарев, В. Я. Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности / В. Я. Пономарев, М. А. Чижова, Э. Ш. Юнусов, Г. О. Ежкова, О. А. Решетник // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 601–608.
7. Ахмадиев, М. Г. Математическое моделирование процессов мембранной очистки сточных вод / М. Г. Ахмадиев, Ф. Ф. Шакиров, И. Г. Шайхиев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 10. – С. 217–222.
8. Петухова, Е. О. Дефосфотация сточных вод / Е. О. Петухова, О. И. Ручкинова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 2 (26). – С. 123–141.
9. Соколова, Е. В. Дефосфотация сточных вод малых населенных пунктов / Е. В. Соколова, О. А. Глебова // Будущее науки – 2013 : материалы Междунар. молодежной науч. конф. [отв. редактор А. А. Горохов]. – 2013. – С. 344–347.
10. Гадыева, А. А. Оценка возможности применения коагулянта для дефосфотации сточных вод по его токсичности в различных дозировках / А. А. Гадыева, Т. В. Кирилина, А. С. Сироткин, И. Р. Бурнашева // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 16. – С. 9–10.
11. Хасанова, А. А. Аспекты биотрансформации фосфора в микробной дефосфотации сточных вод / А. А. Хасанова, А. Р. Хабибуллина, Т. В. Вдовина, Е. В. Перушкина, А. С. Сироткин // Перспективные направления физико-химической биологии и биотехнологии : сб. тезисов: 33 зимняя Междунар. молодёжная науч. школа. – М., 2021. – С. 177.

12. Зейфман, Е. А. Математическое моделирование процессов дефосфотации сточных вод методом полного факторного эксперимента / Е. А. Зейфман, Е. А. Лебедева, Г. А. Тихановская // Энергетика, экология, экономика средних и малых городов. Проблемы и пути их решения. – 2003. – С. 163–165.
13. Иванова, С. Г. Моделирование процессов, происходящих при реагентной дефосфотации высококонцентрированных сточных вод / С. Г. Иванова // Научная мысль. – 2016. – № 1 (19). – С. 52–55.
14. Фокичева, Е. А. Особенности построения математической модели процесса реагентной дефосфотации высококонцентрированных сточных вод / Е. А. Фокичева // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 113–119.
15. Шеронова, Е. К. Дефосфотация хозяйственно-бытовых сточных вод на ростовской АЭС с помощью «Аква-Аурата 30» / Е. К. Шеронова, О. И. Горская // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4 (9). – С. 19–22.
16. Кобелева, Й. В. Совместная биологическая и физико-химическая очистка сточных вод с применением инновационного дефосфотирующего реагента. Часть 1. Оценка процесса дефосфотации сточных вод / Й. В. Кобелева, А. С. Сироткин, Т. В. Кирилина, Л. М. Сибиева, А. А. Гадыева // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 16. – С. 127–129.
17. Павлинова, И. И. Технологическое моделирование процесса биологического удаления фосфора из сточных вод / И. И. Павлинова, О. А. Платонова // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : сб. науч. трудов Рос. академии архитектуры и строительных наук. – М., 2018. – С. 387–393.
18. Дубовик, О. С. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод / О. С. Дубовик, Р. М. Маркевич // Труды БГТУ. – № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2016. – № 4 (186). – С. 232–238.
19. 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. – Волгоград : ВолгГТУ, 2022.
20. Акулич, Т. И. Эффективность схем биологического удаления фосфора и нитриденитрификации на действующих аэротенках / Т. И. Акулич, С. В. Андреев, А. И. Морозова // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. В. В. Корунчикова, Л. С. Новопольцева; под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар : КубГАУ, 2021. – С. 422–425.