

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОДОПОДГОТОВКИ И ВОДООЧИСТКИ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

*С. В. Андреюк<sup>1</sup>, Б. Н. Житенев<sup>2</sup>, Т. И. Акулич<sup>3</sup>, Д. В. Каперейко<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, БрГТУ, Брест, Беларусь, svandreyuk@g.bstu.by

<sup>2</sup>Профессор, БрГТУ, Брест, Беларусь, vvit@bstu.by

<sup>3</sup>Старший преподаватель, БрГТУ, Брест, Беларусь, tigol1976@mail.ru

<sup>4</sup>Студент, БрГТУ, Брест, Беларусь, darkapereyko@mail.ru

### Аннотация

Изучение механизмов сложных процессов и свойств многокомпонентных систем, а также их оптимизация в современной математической теории позволяют смоделировать процессы водоподготовки и водоочистки на основе влияющих и определяющих факторов. Планированием многофакторного эксперимента осуществляется выбор числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Проведен анализ публикаций и достижений по теме исследования. В статье содержатся условия выбора методики планирования многофакторного эксперимента на примере обесцвечивания поверхностных вод коагулированием с предварительным озонированием и дефосфотации сточных вод реагентным методом. По результатам трехфакторного рототабельного эксперимента получены уравнения регрессии второго порядка, которые являются экспериментально-статистическими моделями процессов водоподготовки и водоочистки в системах водоснабжения и водоотведения.

**Ключевые слова:** водоподготовка, водоочистка, моделирование, многофакторный эксперимент, коагулирование, дефосфотация.

## MODELING OF WATER PREPARATION AND WATER PURIFICATION PROCESSES IN WATER SUPPLY AND SANITATION SYSTEMS

*S. V. Andreyuk<sup>1</sup>, B. N. Zhitenev<sup>2</sup>, T. I. Akulich<sup>3</sup>, D. V. Kapereiko<sup>4</sup>*

### Abstract

The study of the mechanisms of complex processes and the properties of multi-component systems, as well as their optimization in modern mathematical theory, makes it possible to model the processes of water treatment and purification based on influencing and determining factors. The planning of a multifactorial experiment selects the number of experiments and the conditions for their implementation, neces-

sary to solve the problem with the required accuracy. The analysis of publications and achievements on the research topic was carried out. The article contains the conditions for choosing a methodology for planning a multifactorial experiment on the example of decolorization of surface waters by coagulation with preliminary ozonation and wastewater dephosphotation by the reagent method. Based on the results of a three-factor experiment, second-order regression equations were obtained, which are experimental-statistical models of water treatment and water purification processes in water supply and sanitation systems.

**Keywords:** water treatment, wastewater treatment, modeling, multifactorial experiment, coagulation, dephosphotation.

**Введение.** Решение большинства задач в химии и химической технологии подготовки воды природных источников связано с проведением сложных и дорогостоящих экспериментов. Отсюда понятно значение методов оптимального планирования эксперимента, позволяющих использовать математический аппарат не только на стадии обработки результатов измерений, но также и при подготовке и проведении опытов. Изучение механизмов сложных процессов и свойств многокомпонентных систем, а также их оптимизация в современной математической теории позволяют смоделировать процессы водоподготовки на основе влияющих и определяющих факторов.

Многофакторный эксперимент широко используется в современной научной деятельности и является эффективным средством обработки и планирования экспериментальных исследований. Планированием многофакторного эксперимента называется процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Независимые, переменные величины, влияющие на процесс, принято называть факторами. Так в процессах очистки воды факторами могут быть: доза коагулянта, продолжительность процесса, скорость фильтрации, температура и т.п. Основное требование к факторам – управляемость. Под управляемостью понимается установление нужного значения фактора (уровня) и поддержание его в течение всего опыта. Кроме требования к управляемости выбранных факторов, есть еще несколько требований: для любой пары факторов должно выполняться условие совместимости; факторы должны быть независимыми, быть однозначными, непосредственно воздействовать на параметр оптимизации.

Протекание процесса количественно характеризуется одной или несколькими величинами, например, эффект очистки воды, остаточное содержание примеси (например, нитратов, органических соединений, обуславливающих цветность и окисляемость воды) и т.п. Такие величины называют функциями отклика. Математические методы оптимального планирования экспериментов позволяют получить математическую модель процесса даже при отсутствии данных о его механизме. Математические модели, полученные с помощью методов планирования экспериментов, принято называть экспериментально-статистическими. При использовании статистических методов планирования

эксперимента математическое описание представляется в виде полинома:  $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ , где  $Y$  – функция отклика (величина, качественно характеризующая протекание процесса), а  $X_1, X_2, X_3$  – влияющие факторы (аргументы) исследуемого процесса. 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.

В работах [1-5] приведены исследования по технологическому моделированию процессов водоподготовки в системах водоснабжения: представлен опыт оптимизации действующих сооружений на установке технологического моделирования процессов фильтрации; технологическое моделирование с целью очистки воды от соединений железа; математическое моделирование электро-мембранных процессов переработки природных вод; планирование многофакторного эксперимента на примере ионообменной очистки воды. Задача математического моделирования процессов очистки сточных вод рассматривается в работах [6-7].

На кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов БрГТУ целью выполненных экспериментальных исследований стало изучение влияющих факторов и условий моделирования процессов водоподготовки и водоочистки с получением экспериментально-статистических моделей для прогнозирования эффективности удаления загрязняющих примесей:

- при обесцвечивании поверхностных вод коагулированием;
- при ионообменной очистке подземных вод от нитратов;
- при реагентной дефосфотации сточных вод.

Процесс нахождения математической модели включал в себя: планирование эксперимента, проведение эксперимента на объекте исследований; проверка воспроизводимости эксперимента; получение математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии; проверка адекватности математического описания. Для нахождения области оптимума был произведен экспериментальный поиск и затем в оптимальной области осуществлен ротатабельный план второго порядка, при котором факторы варьировались на пяти уровнях. Проверка воспроизводимости опытов осуществлялась с помощью критерия Кохрена. Значимость коэффициентов регрессии определялась с учетом значения критерия Стьюдента. Адекватность зависимостей подтверждена по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости.

### **Обесцвечивание поверхностных вод для технического водоснабжения.**

Поверхностные воды являются более мягкими и слабоминерализованными по сравнению с подземными. Это выгодно отличает их при употреблении для технических целей, в которых накладываются ограничения на жесткость и солесодержание. Большое значение при получении обессоленной и умягченной воды имеет выбор предварительной очистки от органических примесей. Для этого,

как правило, используются реагентные методы. Одновременно эффективность коагулирования высокоцветных вод повышается с предварительной их обработкой окислителями.

В этой связи представляло интерес исследовать поверхностную воду р. Мухавец, которая является типичным представителем водотоков Юго-Западного региона Беларуси с целью изучения влияния дозы озона, коагулянта и флокулянта на эффективность удаления органических соединений, обуславливающих цветность и окисляемость воды. Был использован метод ротатбельного центрального композиционного планирования, основные характеристики плана которого приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Основные характеристики плана эксперимента по изучению удаления органических соединений, обуславливающих цветность и окисляемость воды

Факторы	Доза коагулянта $x_1$ , мг/дм <sup>3</sup>	Доза флокулянта, $x_2$ , , мг/дм <sup>3</sup>	Доза озона, $x_3$ , мг/дм <sup>3</sup>
Основной уровень	20	1	10
Интервал варьирования	10	0,5	5
Верхний уровень	30	1,5	15
Нижний уровень	20	0,5	5

В качестве коагулянта использовался  $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$  химически чистый. По результатам спектрофотометрических исследований оценивался эффект снижения цветности воды. После реализации полного факторного эксперимента, опытов в звездных точках и центре плана была получена экспериментально – статистическая модель процесса в виде уравнения регрессии второго порядка (в кодированных переменных), описывающего совместное влияние массовой концентрации озона, коагулянта и флокулянта на эффект обесцвечивания:

$$Y = 97,33 + 2,94 X_1 + 0,90 X_2 + 3,37 X_3 + 1,25 X_1 X_2 + 1,44 X_1 X_3 - 6,43 X_1^2 - 3,17 X_2^2 - 5,42 X_3^2 \quad (1)$$

где  $Y$  – эффект обесцвечивания (снижения цветности воды), %;

$X_1$  – массовая концентрация коагулянта, мг/дм<sup>3</sup>;

$X_2$  – массовая концентрация флокулянта, мг/дм<sup>3</sup>;

$X_3$  – массовая концентрация озона, мг/дм<sup>3</sup>.

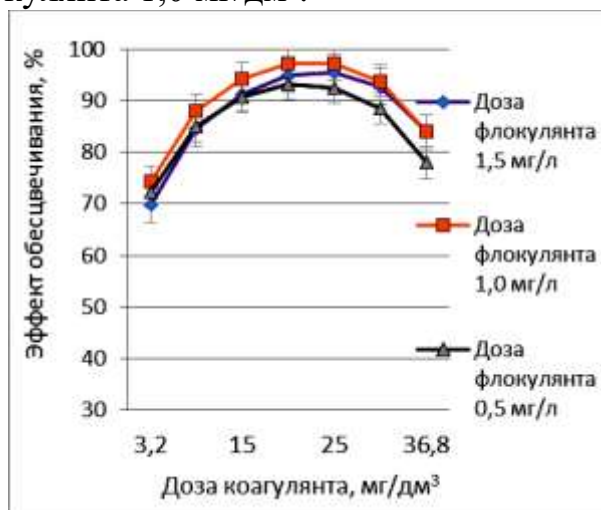
Установлено, что все указанные факторы оказывают определенное влияние на процесс обесцвечивания воды:

1) значительное влияние на процесс обесцвечивания воды р. Мухавец озонированием оказывает доза коагулянта; наибольший эффект, около 98 %, наблюдался при дозе коагулянта 20 мг/дм<sup>3</sup>, дозе флокулянта 1,0 мг/л и массовой концентрации озона 10 мг/дм<sup>3</sup> (рисунок 1);

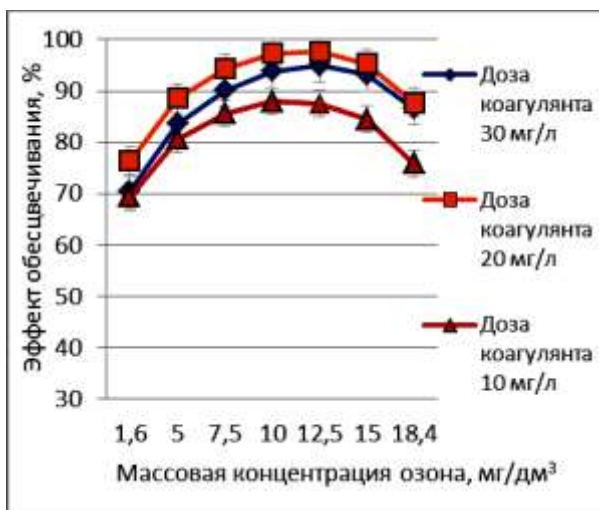
2) меньшее влияние оказывает доза флокулянта; увеличение дозы флокулянта с 0,16 до 1 мг/дм<sup>3</sup> повышало эффект обесцвечивания лишь на 10% при массовой концентрации озона 10 мг/дм<sup>3</sup> и значении дозы коагулянта 20 мг/дм<sup>3</sup>;

при этом сила влияния дозы флокулянта снижалась при более высоких значениях дозы коагулянта;

3) массовая концентрация озона оказывает наиболее сильное влияние на обесцвечивание воды р. Мухавец озонированием (рисунок 2); так, увеличение её с 1,6 до 12,5 мг/дм<sup>3</sup> сопровождалось повышением эффекта обесцвечивания с 70 до 98 % при дозе коагулянта соответственно от 10 до 30 мг/дм<sup>3</sup> и дозе флокулянта 1,0 мг/дм<sup>3</sup>.



**Рисунок 1** – Влияние дозы коагулянта на эффект обесцвечивания при массовой концентрации озона 10 мг/дм<sup>3</sup>



**Рисунок 2** – Влияние массовой концентрации озона на эффект обесцвечивания при дозе флокулянта 1,0 мг/дм<sup>3</sup>

При помощи экспериментально-статистической модели процесса были получены оптимальные значения параметров, при которых достигался наибольший эффект обесцвечивания: доза коагулянта – 22,72 мг/дм<sup>3</sup>, доза флокулянта – 1,03 мг/дм<sup>3</sup>, массовая концентрация озона – 11,66 мг/дм<sup>3</sup>.

**Реагентная дефосфотация сточных вод.** В настоящее время одним из важнейших направлений в области очистки сточных вод является удаление биогенных элементов (соединений азота и фосфора), наличие которых в воде приводит к эвтрофикации водных объектов. Так как требования к содержанию фосфора в очищенной воде значительно ужесточились, приоритет сместился в сторону снижения концентраций фосфорсодержащих загрязняющих веществ. Эффективность снижения концентрации фосфора биологическим методом очистки сточных вод составляет 78-80 процентов. Одновременно процессы биологической очистки считаются высокочувствительными и нестабильными. На выходе из очистных сооружений можно снизить концентрацию фосфора с помощью химических методов удаления на 95 процентов (до 0,5 мг/дм<sup>3</sup>).

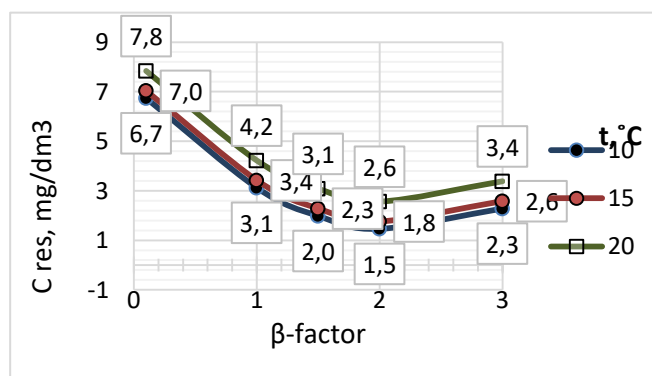
С использованием 1%-го раствора коагулянта полиоксихлорида алюминия «Аква-Аурат 30» (массовая доля Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30%) проведено исследование коагуляции при очистке сточных вод с исходной концентрацией фосфатов 10 мг/дм<sup>3</sup>. Положительная динамика очистки получена и в результате пробной коагуляции сульфатом железа(III) Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·7H<sub>2</sub>O (дозировка 1% раствора варьировалась от 18 до 63 мг/дм<sup>3</sup>).

При моделировании процесса очистки от соединений фосфора с целью определения оптимальных значений технологических параметров стадии коагуляции учитывалась зависимость остаточной концентрации фосфатов в сточных водах,  $C_{res}$ , мг/дм<sup>3</sup>, от трех факторов: 1)  $\beta$ -фактора (принимая во внимание избыток реагента, необходимого для осаждения 1 моля фосфора, моль/моль, сверх расчетного стехиометрического количества); 2) значения водородного показателя среды pH; 3) температуры обрабатываемой воды,  $t$ , °C.

Уравнение регрессии по результатам обработки экспериментальных данных  $C_{res} = f(pH, \beta, t)$  было составлено в виде квадратичного полинома от трех переменных. Экспериментальную воспроизводимость проверяли с помощью теста Кохрена ( $G_{расч} = 0,298$ ;  $G_{табл} = 0,616$ ). Значимость коэффициентов регрессии определяли для 5 степеней свободы при доверительной вероятности  $P = 0,95$  с учетом критерия Стьюдента ( $t = 2,57$ ). Достоверность зависимостей при 5% уровне значимости подтверждена с помощью критерия Фишера ( $F_{расч} = 3,54$ ,  $F_{табл} = 5,05$ ).

Полученное экспериментально-статистическое уравнение (2) в физических переменных позволяет отразить поверхность отклика на факторной плоскости линиями зависимости остаточной концентрации фосфатов  $C_{res}$  от  $\beta$ -фактора (отношения концентрации реагента по металлу к начальной концентрации фосфора) и факторов внешней среды (рисунок 3):

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



**Рисунок 3** – Влияние  $\beta$ -фактора на процесс дефосфотации при различных значениях температуры  $t$ , °C, и водородном показателе pH = 6,5

Установлено, что все указанные факторы оказывают определенное влияние на процесс дефосфотации:

1) все коэффициенты регрессии уравнения являются значимыми;

2) полученная математическая модель процесса реагентной обработки сточных вод позволяет подобрать оптимальную дозу коагулянта в зависимости от отношения концентрации реагента по металлу к исходной концентрации фосфора при различных значениях pH и температуре обрабатываемой воды;

3) установлены оптимальные значения параметров дефосфотации (для исходной концентрации фосфатов 10 мг/дм<sup>3</sup>), при которых достигается наименьшая остаточная концентрация фосфатов в очищенной воде: pH=7,5;  $\beta=2,17$ ;  $t=9,5^\circ\text{C}$ .

**Заключение.** Для оптимизации процессов водоподготовки и водоочистки в системах водоснабжения и водоотведения были использованы методы математического моделирования на основе влияющих и определяющих факторов. На основе выполненных экспериментальных исследований были получены экспериментально-статистические модели для прогнозирования эффективности удаления из воды загрязняющих примесей в любом заданном режиме ведения процесса. Разработаны экспериментально-статистические модели:

– процесса обесцвечивания воды коагулированием с предварительным озонированием в виде уравнения регрессии, описывающего совместное влияние массовой концентрации озона, доз коагулянта и флокулянта на эффект снижения цветности воды; получены оптимальные значения параметров, при которых достигается наибольший эффект обесцвечивания;

– процесса дефосфотации сточных вод в виде уравнения регрессии, которое определяет зависимость остаточной концентрации фосфатов сточных вод от условий дозирования реагента.

### Список цитированных источников

1. Ланге, Л.Р. Технологическое моделирование процесса водоподготовки // Труды II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; под общей редакцией А.Ю. Столбоушкина, Е.А. Алешиной, О.В. Матехиной, Е.А. Благиных. – Новокузнецк : Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 312–314.
2. Барская И.В., Лукашевич О.Д. Технологическое моделирование процесса очистки воды от соединений железа // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008.–№ 3 (20). – С. 175–180.
3. Житенев Б.Н., Андреюк С.В. Экспериментальные исследования удаления органических примесей природных вод коагулированием и каталитическим окислением в целях технического водоснабжения // Вестник БрГТУ. – 2012. – № 2 : Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 32–36.
4. Житенев, Б.Н. Планирование многофакторного эксперимента на примере ионообменной очистки воды от нитратов / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Вестник Брест.гос. техн. ун-та. – 2019. – № 2 : Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 38–43. // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. Л.С. Новопольцева; под ред. И.С. Белюченко. – Краснодар : КубГАУ, 2020. – С. 321–323.
5. Андреюк, С. В. Моделирование процессов подготовки воды для технического и питьевого водоснабжения / С. В. Андреюк, М. А. Таратенкова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2021. – № 2 (34). – С. 46–57. – DOI: 10.21869/2311-1518-2021-34-2-46-57.
6. Петухова, Е.О. Дефосфотация сточных вод / Е.О. Петухова, О.И. Ручкина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 2 (26). – С. 123–141.
7. 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.