

УДК 621.311.001

ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ pH

В. Н. Штепа¹, В. А. Кудинов², О. Н. Прокопеня³, Э. Н. Муслимов⁴

¹ Д. т. н., доцент, проректор по научной работе УО «Полесский государственный университет», Пинск, Беларусь, e-mail: tppoless@gmail.com

² Д. п. н., профессор, профессор кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем Курского государственного университета, Курск, Российская Федерация, e-mail: kudinovva@yandex.ru

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru

⁴ Инженер-консультант по разработке экспертных систем, Пинск, Беларусь, e-mail: muslimoven@mail.ru

Реферат

Мониторинг, проведенный с использованием компьютерно-интегрированной системы сбора информации на действующих очистных сооружениях, позволил сформировать базу данных о показателях качества сточных вод (pH, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность, температура). В результате статистической обработки результатов установлено наличие попарных взаимосвязей средней тесноты между указанными показателями качества, что позволило сделать вывод о предполагаемой эффективности предиктивного управления процессом очистки на основе прогнозируемых значений pH. Разработана система нейросетевого прогнозирования pH, которая после обучения с использованием полученной базы данных продемонстрировала высокую достоверность результатов прогноза и может быть рекомендована к применению. Приведена возможная структура системы предиктивного управления процессом очистки сточных вод для практической реализации.

Ключевые слова: сточные воды, прогнозирование pH, корреляционный анализ, нейронные сети, очистные сооружения.

PREDICTIVE CONTROL OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT BASED ON NEURAL NETWORK FORECASTING pH

V. N. Shtepa, V. A. Kudinov, O.N. Prokopenya, E. N. Muslimov

Abstract

Monitoring, carried out using a computer-integrated information gathering system at existing wastewater treatment plants, made it possible to create a database on wastewater quality indicators (pH, redox potential, electrical conductivity, temperature). As a result of statistical processing of the results, the presence of pairwise relationships of medium closeness between the indicated quality indicators was set, which made it possible to form a conclusion about the expected effectiveness of predictive control of the purification process based on predicted pH values. A neural network pH forecasting system has been developed, which, after training using the obtained database, demonstrated high reliability of the forecast results and can be recommended for use. A possible structure of a predictive control system for the wastewater treatment process for practical implementation is presented.

Keywords: wastewater, pH prediction, correlation analysis, neural networks, wastewater treatment plants.

Введение

Согласно ЭкоНИП 17.06.06-005-2022 устанавливаются требования по обеспечению экологической безопасности при эксплуатации очистных сооружений (ОС) механической, биологической и физико-химической очистки сточных вод (СВ), в том числе по эффективности удаления загрязняющих веществ, а также сооружений обработки осадков сточных вод. Одновременно, в соответствии с пунктом 7 статьи 47 Водного кодекса Республики Беларусь, сброс всех видов СВ с использованием рельефа местности (оврагов, карьеров, балок и иных подобных выемок в грунте), а также на избыточно увлажненные территории (болота) не допускается. Сброс сточных вод в окружающую среду должен осуществляться исключительно в установленные приемники сточных вод через систему канализации с предварительной качественной обработкой. Нормативные требования обеспечения экологической безопасности геозкосистем сформулированы и в постановлении Совета Министров Республики Беларусь 04.09.2019 № 594 «Правила технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов».

Существующие очистные сооружения в городах и районных центрах страны построены преимущественно в 70-е годы прошлого века (всего функционирует 1470 коммунальных очистных сооружений, установленной производительностью 3,45 млн куб. метров в сутки), имеют большой физический износ и не могут обеспечить выполнение современных требований к качеству очистки сточных вод, в

первую очередь, по удалению биогенных элементов – азота и фосфора. Последнее просто не предусматривалось использовавшимися на момент их сооружения технологиями [1]. В настоящее время необходимо проведение их комплексной реконструкции и модернизации. Учитывая масштабность задачи, которая должна решаться в ограниченные сроки при ограниченных финансовых ресурсах, возникает потребность в экономичных методах управления процессом очистки, предполагающих широкое применение математических моделей при снижении доли технических средств. Построение таких моделей требует продолжительного во времени качественного мониторинга систем водоотведения [2, 3].

На основе данных Европейского агентства по окружающей среде до 2010 года только 38 % рек были отнесены к классам «хорошего» или «высокого» экологического статуса. Современными мониторинговыми исследованиями установлено, что 56 % рек и 44 % озер в Европейском Союзе (ЕС) в наши дни имеют «менее чем хороший» экологический статус. Таким образом, при весьма значительных финансовых вложениях фиксируется не достаточно сильный экологический прогресс. Это указывает на необходимость поиска новых подходов к решению проблемы [4, 5].

Учитывая высокую неравномерность поступления стоков и загрязнителей, можно ожидать, что эффективным будет предиктивное управление процессом очистки на основе распределенных средств. При этом для прогнозирования показателей качества поступающих

на очистку сточных вод можно применить нейросетевые технологии. Это позволит заранее оценивать возможность пиковых поступлений загрязнителей и с упреждением реагировать на ситуацию на начальных стадиях очистки [6, 7].

Постановка задачи

Требуется разработать систему сбора информации о качестве сточных вод в системе водоотведения и прогнозирования значений активной реакции водных растворов, поступающих на очистку, на основе использования математического аппарата нейронных сетей, сформировать базу значений показателей качества сточных вод путем мониторинга процесса на значительном временном интервале, осуществить обучение нейронной сети и оценку точности прогнозирования.

Обоснование выбора технологического объекта, материалы и методика исследований

Сложилась сложная ситуация с коммунальными очистными сооружениями г. Барановичи, которая вызвана тем, что в городскую канализацию отводится большое количество неочищенных производственных сточных вод с ряда промышленных предприятий города. Крайне негативное воздействие на активный ил оказывают значения показателя «рН» на входе ОС, они систематически превышают допустимые величины – есть периоды протяжённостью около 2 часов, когда рН выше значения 8,5 в пиках достигая 10 и более. Превышения, как правило, относятся к определённым часам суток и дням недели. Фиксируемая продолжительная во времени щелочная активная реакция водного раствора, поступающего на обработку активным илом, однозначно провоцирует гибель микробной популяции последнего и блокирует нормальную очистку. При этом происходит синтез серосодержащих токсикантов в сети канализации до поступления СВ на обработку.

Попытки реанимирования ОС загрузкой активного ила с других очистных сооружений либо внесением биостимулирующих агентов, без систематизации и анализа параметров водоотведения, оказались неэффективными (либо ограничено эффективными). Экспертная оценка свидетельствует, что необходимы исследования, направленные на повышение экологической безопасности водоотведения г. Барановичи путем внедрения оперативного контроля показателей качества СВ еще на этапах их транспортировки к ОС, что может быть реализовано разработкой и внедрением модулей, осуществляющих оперативное прогнозирование показателей качества водных растворов.

Среди основных причин, которые не позволяют наладить эффективное управление сетью водоотведения в целом, включая коммунальные очистные сооружения – незначительное количество измерительных средств, способных функционировать в сегментах сети водоотведения (колодцы, коллекторы, насосные станции, напорный и безнапорный трубопроводы). Это требует формирования распределённой структуры измерительной системы, систематизации и обработки результатов мониторинга в условиях неполноты получаемой информации.

При оценке взаимосвязей между показателями качества сточных вод используется коэффициент корреляции Пирсона, который вычисляется по формуле [8]

$$r_{xy} = \frac{\sum (d_x \cdot d_y)}{\sqrt{(\sum d_x^2 \cdot \sum d_y^2)}}. \quad (1)$$

Возможные значения коэффициента корреляции варьируются от 0 до ± 1 : чем больше абсолютное значение r_{xy} , тем выше теснота связи между двумя величинами. $r_{xy} = 0$ говорит о полном отсутствии связи; $r_{xy} = 1$ свидетельствует о наличии абсолютной (функциональной) связи.

Для оценки тесноты (силы) корреляционной связи обычно используют общепринятые критерии (например, критерий Чеддока), согласно которым абсолютные значения $r_{xy} > 0,3$ свидетельствуют о слабой связи, значения $r_{xy} 0,3 - 0,7$ – о средней связи, значения $r_{xy} > 0,7$ – о сильной связи.

Оценка статистической значимости коэффициента корреляции r_{xy} осуществляется при помощи t-критерия [8]:

$$t_r = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}. \quad (2)$$

Полученное значение t_r сравнивается с критическим значением при определенном уровне значимости и числе степеней свободы $n-2$. Если t_r превышает $t_{крит}$, то делается вывод о статистической значимости выявленной корреляционной связи.

При обучении нейронной сети использовался классический алгоритм обратного распространения ошибки [9]:

Шаг 1. Весам сети присваиваются небольшие начальные значения.

Шаг 2. Выбирается очередная обучающая пара (X, Y); вектор X подается на вход сети.

Шаг 3. Вычисляется выход сети.

Шаг 4. Вычисляется разница между выходом сети, требуемым (целевым Y) и реальным (вычисленным).

Шаг 5. Вес сети корректируется так, чтобы минимизировать ошибку.

Шаг 6. Шаги со 2-го по 5-й повторяются для каждой пары обучающего множества до тех пор, пока ошибка на всем множестве не достигнет приемлемой величины.

Шаги 2 и 3 подобны тем, которые выполняются в уже обученной сети. Вычисления в сети выполняются послойно. На шаге 3 каждый из выходов сети вычитается из соответствующей компоненты целевого вектора с целью получения ошибки. Она используется на шаге 5 для коррекции весов сети. Шаги 2 и 3 можно рассматривать как «проход вперед», поскольку сигнал распространяется сетью от входа к выходу. Шаги 4 и 5 составляют «обратный проход», поскольку здесь исчисляемый сигнал ошибки распространяется назад сетью и используется для подстройки весов.

Статистический анализ был выполнен на аналитической платформе Deductor, которая является основой для создания прикладных решений. Реализованные в ней технологии позволяют на базе единой архитектуры пройти этапы построения аналитической системы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов. Deductor предоставляет инструментальные средства, необходимые для решения аналитических задач: отчетность, прогнозирование, сегментация, поиск закономерностей. Также Deductor является хорошей платформой для создания систем поддержки принятия решений.

В рамках работы под «предиктивным управлением» понимается процесс очистки, при котором обработка сточных вод начинается до их непосредственного поступления на очистные сооружения на основе математического оперативного прогнозирования показателей качества.

Компьютерно-интегрированная система сбора информации о качестве сточных вод г. Барановичи

Для работы компьютерно-интегрированной системы сбора информации о качестве сточных вод (КИС СИКСВ) используется интерпретатор Python версии 3.8, модули numpy, pandas, requests, xlrd, XlsxWriter, PyQt5, pyqtgraph. Программное обеспечение (ПО) функционирует в рамках базы данных SQLite3. Интерфейс реализован с применением кроссплатформенного фреймворка Qt (рисунок 1).



Рисунок 1 – Интерфейс компьютерно-интегрированной системы сбора информации о качестве сточных вод

В основном окне программы отображаются суточные графики дискретностью 15 минут для таких параметров, как pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), электропроводность и температура, а также кнопки выбора разделов:

- измерение pH (автоматическая запись в базу данных (БД) каждые 5 минут);
- измерение ОВП (автоматическая запись в БД каждые 5 минут);
- измерения электропроводности (автоматическая запись в БД каждые 5 минут);
- измерения температуры (автоматическая запись в БД каждые 5 минут);

- измерения расхода сточных вод (ручная запись в БД);
- результаты лабораторного анализа качества воды (ручная запись параметров в БД);
- архивные данные (все результаты автоматической записи в БД);
- аналитический модуль оценки водоотведения КУПП «Водоканал» г. Барановичи.

Разделы программы «Измерение pH», «Измерение ОВП», «Измерения электропроводности», «Измерения температуры» имеют одинаковую структуру, представленную на рисунке 2.

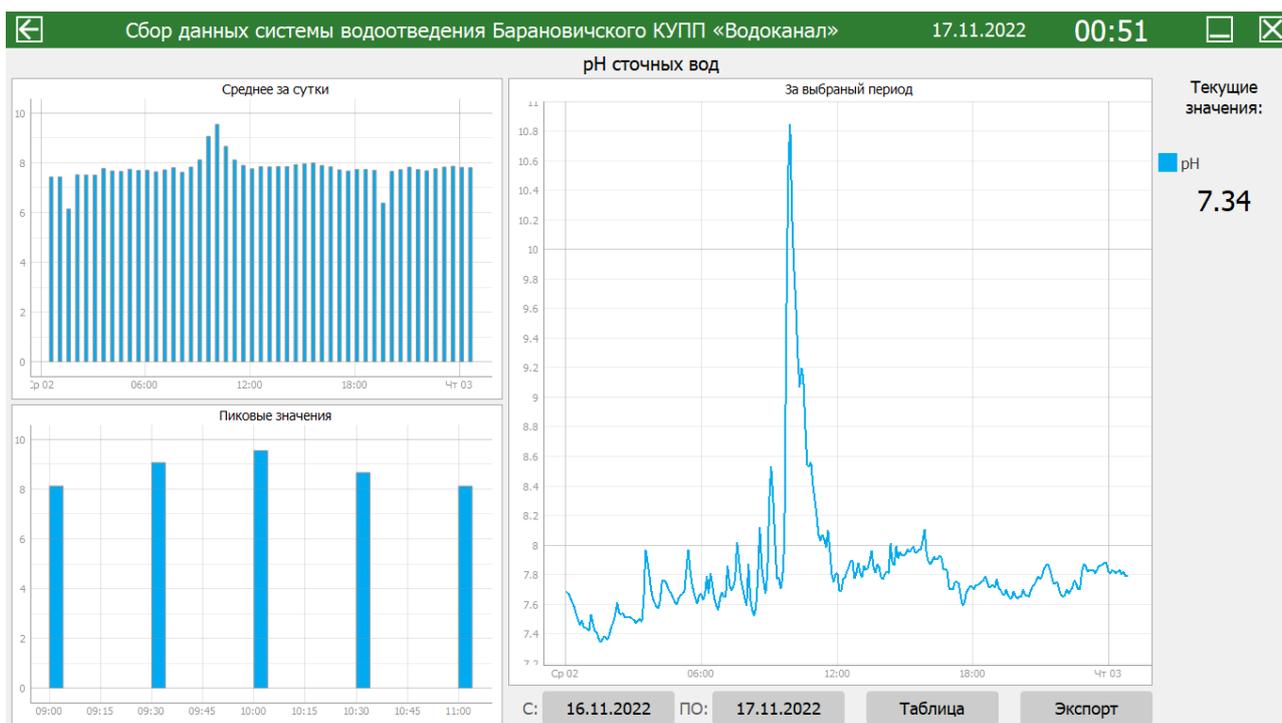


Рисунок 2 – Интерфейс компьютерно-интегрированной системы сбора информации о значениях pH сточных вод

Сбор данных проводился КИС СИКСВ на протяжении 8 месяцев. С помощью КИС СИКСВ сформирован набор данных глубиной 69000 точек для дальнейшего анализа и прогнозирования pH СВ.

Анализ значений показателей качества сточных вод и их статистическая обработка

Сначала рассмотрено изменение pH сточных вод в течение дня, оценены и структурированы данные этого показателя в течение всех

дней недели (по среднеарифметическим значениям) за весь период анализа (рисунок 3).

Несмотря на сглаживание усреднённых значений pH за счёт больших массивов информации, можно сделать вывод о том, что самые щелочные водные растворы поступают в «голову» биологических очистных сооружений во временном промежутке 7–11 часов (см. рисунок 3). Таким же способом выполнена систематизация данных по дням недели (рисунок 4).

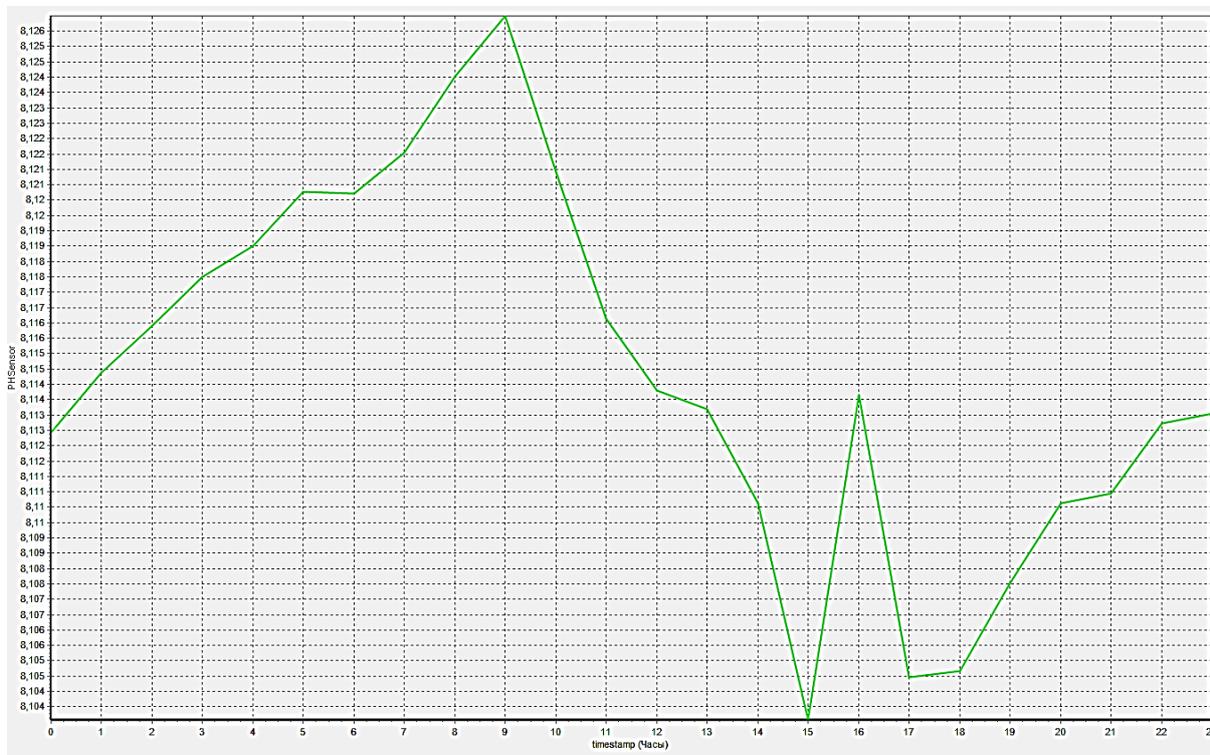


Рисунок 3 – Изменение pH в течение суток на входе в коммунальные очистные сооружения

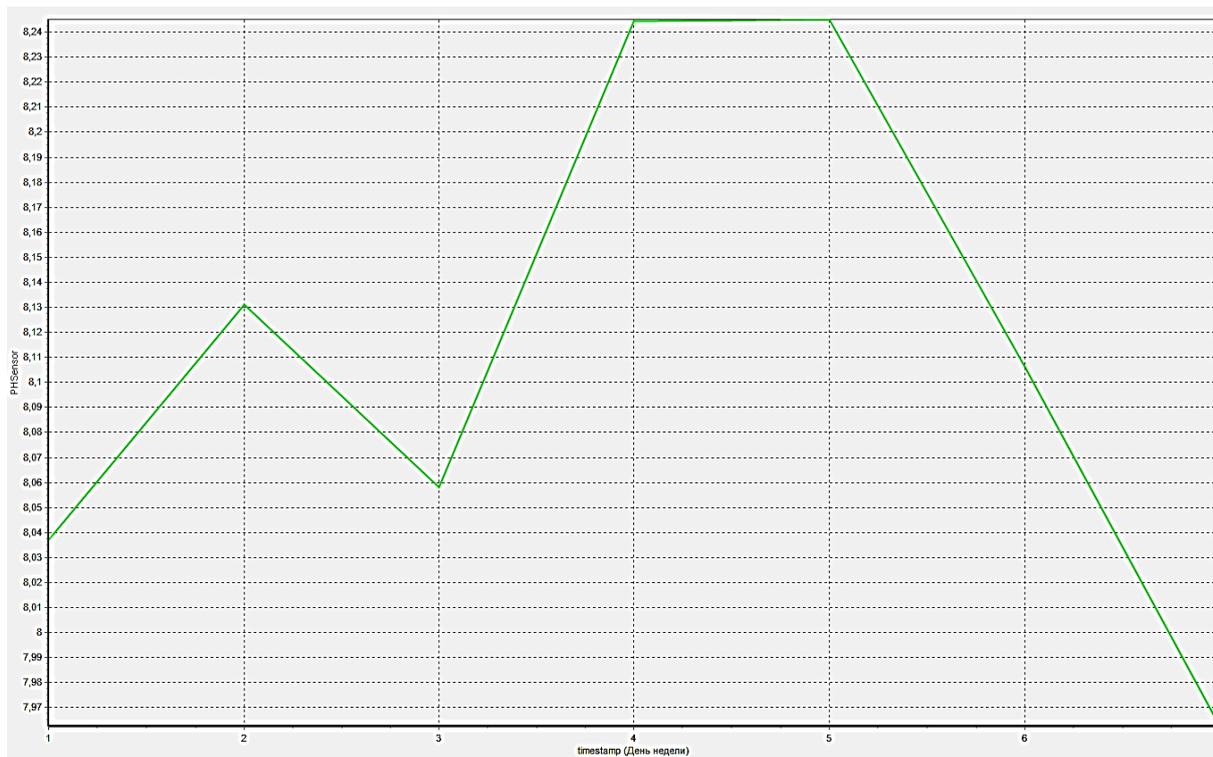


Рисунок 4 – Изменение pH по дням недели: 1 – понедельник, 2 – вторник, 3 – среда, 4 – четверг, 5 – пятница, 6 – суббота, 7 – воскресенье

Значения pH, соответствующие максимально щелочной среде, зафиксированы в четверг и пятницу, минимально щелочной – с субботы по понедельник (см. рисунок 4).

На показатель pH влияют помимо временного фактора и другие величины, которые фиксируются КИС СИКСВ: ОВП (RedoxSensor), электропроводимость (ECSensor) и температура воды (TPHSensor и TECSensor – измерители установлены, соответственно, в pH-метре и ОВП-метре).

Для установления взаимосвязей провели анализ, где для вычисления коэффициента корреляции использовался максимум взаимокорреляционной функции: устанавливался попарный максимум из коэффициентов корреляции двух процессов, рассчитанных при возможных временных сдвигах (рисунки 5–7).

Сильные взаимосвязи выявлены между pH, ОВП и температурой (см. рисунок 5), влияние электропроводности характеризуется как средней тесноты (коэффициент – 0,502).

На ОВП ключевое влияние оказывает температура (см. рисунок 6) – степень взаимосвязей средняя (значение коэффициента выше 0,6).

Наибольшее влияние на электропроводность оказывает pH (см. рисунок 7), остальные величины приближаются к слабой силе связей.

Таким образом, можно сделать вывод о наличии корреляционных взаимосвязей между параметрами СВ, при этом они во многом характеризуются средними значениями коэффициента попарной корреляции. При этом влияние pH наиболее существенно. Полученные зависимости можно использовать при построении систем управления очистными сооружениями.

Полученные результаты относятся к СВ, уже поступившим на ОС. Воздействие на СВ на основе данных результатов будет запоздалым в силу инерционности биохимических процессов удаления загрязнителей и не будет обеспечивать поддержание pH на заданном уровне, что может вызвать гибель активного ила. Для устранения данного недостатка путем организации предиктивного управления процессом требуется устройство по прогнозированию pH.

Нейросетевое прогнозирование значений pH сточных вод и предиктивное управление процессом очистки

Для прогнозирования значений активной реакции водных растворов, поступающих на очистку биологическими очистными сооружениями, применили многослойный персептрон [9, 10] (рисунок 8). Глубина прогнозирования (проекция) – 5 часов.

Входные поля			Корреляция с выходными полями	
№	Поле		PHSensor	
1	RedoxSensor			-0,925
2	ECSensor			0,502
3	TPHSensor			0,797
4	TECSensor			0,802

Рисунок 5 – Определение корреляционного влияния ОВП, электропроводности, температуры на pH сточных вод

Входные поля			Корреляция с выходными полями	
№	Поле		RedoxSensor	
1	PHSensor			0,265
2	ECSensor			0,301
3	TPHSensor			0,636
4	TECSensor			0,638

Рисунок 6 – Определение корреляционного влияния pH, электропроводности, температуры на ОВП сточных вод

Входные поля			Корреляция с выходными полями	
№	Поле		ECSensor	
1	PHSensor			0,502
2	RedoxSensor			-0,430
3	TPHSensor			0,412
4	TECSensor			0,406

Рисунок 7 – Определение корреляционного влияния pH, ОВП и температуры на электропроводность сточных вод

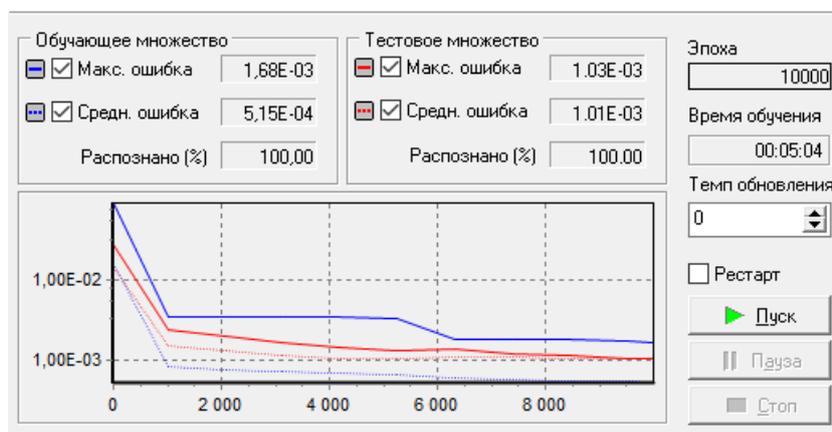


Рисунок 8 – Результаты обучения нейросети (многослойный персептрон) прогнозирования pH сточных вод

При использовании 10000 итерационных эпох (см. рисунок 8) был достигнут высокий результат по точности прогнозирования (рисунок 9) – для обучающей и тестовой выборки относительная среднеквадратическая ошибка ниже 0,01 %.

Высокая достоверность нейросетевого прогнозирования pH позволяет рекомендовать полученную нейронную сеть для использования в системах предиктивного управления процессами очистки сточных вод. Это позволило предложить возможную структуру такой системы (рисунок 10).

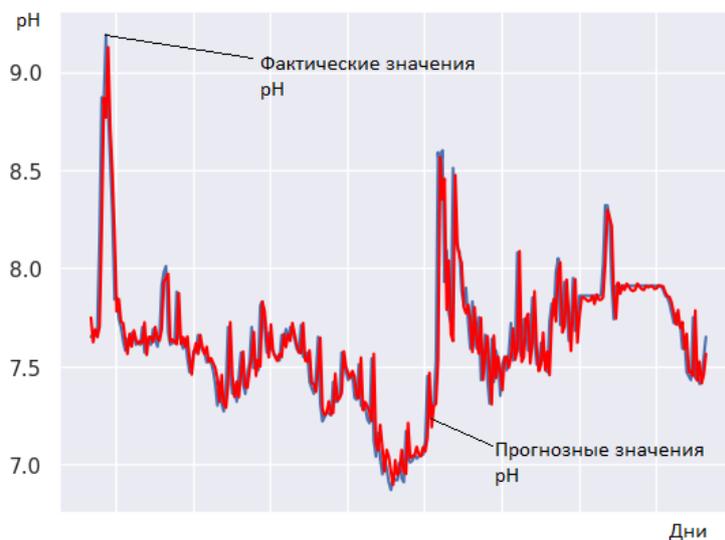


Рисунок 9 – Оценка достоверности прогнозирования значений pH сточных вод с использованием нейросети



Рисунок 10 – Возможная структура системы предиктивного управления процессом очистки сточных вод с использованием нейросетевого прогнозирования значений показателей качества

Двухстороннее взаимодействие между «Модулем систематизации данных о показателях качества сточных вод» и «Автоматизированной системой управления технологическими процессами очистными сооружениями» (см. рисунок 10) вызвано необходимостью корректировки настроек первого. Также имеется возможность оперативной передачи информации от автоматических пробоотборников на «Модуль систематизации данных о показателях качества сточных вод» по ряду параметров водных растворов, например температуре и pH. При программно-аппаратном агрегировании данных от различных источников обосновано применить распределённые Web-SCADA решения. В то же время использование результатов дискретных измерений аккредитованной лабораторией определения состава СВ (автоматические пробоотборники и профильный персонал предприятий водопроводно-канализационных хозяйств) вызвано крайней большой неполнотой

информации о процессах водоотведения, соответственно, даже периодически получаемые данные имеют значительную ценность при управлении ОС. Таким образом, автоматизированная система управления процессом очистки, основываясь на результатах прогнозирования показателей качества, имеет возможность воздействовать на процесс с упреждением, исключая возможность выхода показателей за допустимые границы при пиковых выбросах загрязнителей. В обычных системах это гарантировать сложно, учитывая значительную инерционность рассматриваемых процессов.

Заключение

Мониторинг, проведенный с использованием компьютерно-интегрированной системы сбора информации на действующих очистных сооружениях, позволил сформировать базу данных о пока-

зателея качества сточных вод (рН, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность, температура). В результате статистической обработки результатов установлено наличие попарных взаимосвязей средней тесноты между указанными показателями качества, что позволило сделать вывод о предполагаемой эффективности предиктивного управления процессом очистки на основе прогнозируемых значений рН. Разработана система нейросетевого прогнозирования рН, которая после обучения с использованием полученной базы данных (69000 наборов) продемонстрировала высокую достоверность результатов прогноза (относительная средне-квадратическая ошибка для учебной и тестовой выборки менее 0,01 % при 10000 итерационных эпохах корректировки параметров нейросети) и может быть рекомендована к применению. Приведена возможная структура системы предиктивного управления процессом очистки сточных вод для практической реализации.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на практическую реализацию системы очистки сточных вод с предиктивным управлением на основе нейронной сети по показателю рН и дальнейшее расширение ее функциональных возможностей с организацией управления по другим показателям качества сточных вод.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (договор № Ф23У-012 от 02.05.2023 года).

Список цитированных источников

- Мазоренко, Д. І. Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва / Д. І. Мазоренко, В. Г. Цапко, Ф. І. Гончаров. – К. : Знання, 2006. – 376 с.
- Штепа, В. Н. Применение автоматизированных электролизных процессов в системах очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий / В. Н. Штепа, В. И. Дунай, О. Н. Прокопеня // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (131). – С. 127–131.
- Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 3744.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal. L 327. – 2000. – 73 p.
- Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / Eugenio Molina-Navarro [et al.] // Limnologica. – 2020. – Vol. 80. – 125742.
- Вероятностные нейронные сети в задачах управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (110) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 88–90.
- Штепа, В. Н. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения / В. Н. Штепа, Н. Ю. Золотых, С. Ю. Киреев // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2023. – № 1 : Строительство. Прикладные науки. – С. 94–103.
- Рязанский, В. П. Модифицированный критерий Пирсона в экономических исследованиях / В. П. Рязанский // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9–2. – С. 419–423
- Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
- Головко, В. А. Нейроинтеллект: теория и применение: в 2 кн. / В. А. Головко. – Брест : БПИ, 1999. – Кн.1. Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями. – 260 с.

References

- Mazorenko, D. I. Inzhenerna ekologiya sil'skogospodars'kogo virobnic'tva / D. I. Mazorenko, V. G. Capko, F. I. Goncharov. – K. : Znannya, 2006. – 376 s.
- SHtepa, V. N. Primenenie avtomatizirovannykh elektroliznykh processov v sistemah oчитki stochnykh vod rybopererabatyvayushchih predpriyatij / V. N. SHtepa, V. I. Dunaj, O. N. Prokopenya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2 (131). – S. 127–131.
- Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Issue 21. – P. 3744.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal L 327. – 2000. – 73 p.
- Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / Eugenio Molina-Navarro [et al.] // Limnologica. – 2020. – Vol. 80. – 125742.
- Veroyatnostnye nejronnye seti v zadachah upravleniya kombinirovannymi sistemami vodooчитki / V. N. SHtepa [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 2 (110) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoeekologiya. – S. 88–90.
- SHtepa, V. N. Obosnovanie i skhemy ispol'zovaniya ranzhiruyushchih izmeritel'nykh sistem ekologicheskogo monitoringa i intellektual'nogo analiza rezhimov vodootvedeniya / V. N. SHtepa, N. YU. Zolotykh, S. YU. Kireev // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. – 2023. – № 1 : Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – S. 94–103.
- Ryazanskij, V. P. Modificirovannyj kriterij Pirsona v ekonomicheskikh issledovaniyah / V. P. Ryazanskij // Fundamental'nye issledovaniya. – 2016. – № 9–2. – S. 419–423
- Kruglov, V. V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika / V. V. Kruglov, V. V. Borisov. – M. : Goryachaya liniya-Telekom, 2002. – 382 s.
- Golovko, V. A. Nejrointellekt: teoriya i primeneniye: v 2 kn. / V. A. Golovko. – Brest : BPI, 1999. – Kn.1. Organizaciya i obuchenie nejronnykh setej s pryamymi i obratnymi svyazyami. – 260 s.

Материал поступил 26.02.2024, одобрен 14.03.2024, принят к публикации 18.03.2024