

## 4 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 628.16:519.876.5:004.89

### МНОГОФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е. С. ВЕЛЮГО

Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой,  
г. Новополоцк, Республика Беларусь

**Введение.** Повышение эффективности и снижение энергоёмкости процессов водоподготовки является актуальной задачей, особенно для малых систем [1–4]. Присутствие в воде соединений железа и аммонийного азота требует применения комбинированных технологических схем, управление которыми затрудняется наличием сложных, нередко нелинейных взаимосвязей между технологическими параметрами. Классические методы расчёта не всегда позволяют адекватно прогнозировать поведение системы при колебаниях состава исходной воды. В связи с этим применение методов математического моделирования, в частности машинного обучения, открывает новые возможности для построения адаптивных систем управления.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на действующей станции обезжелезивания в Витебской области. Первая ступень включала два напорных производственных фильтра диаметром 0,5 м с загрузкой из сорбента АС (высота слоя – 1,0 м, скорость фильтрации – 6,25 м/ч). Вторая ступень представляла собой пилотный фильтр диаметром 0,25 м, загруженный цеолитом «Цеол» (объём – 25 л, скорость фильтрации – 10 м/ч). Перед каждой ступенью вода насыщалась кислородом в аэрационной колонне.

Многофакторный эксперимент проводился с варьированием ключевых технологических параметров: исходных концентраций загрязнителей (общее железо –  $X_1$ , аммонийный азот –  $X_2$ ) и интенсивности аэрации на I ( $X_7$ ) и II ( $X_8$ ) ступенях. Целевыми откликами служили остаточные концентрации после второй ступени ( $Y_{11}$  – железо,  $Y_{12}$  – аммонийный азот). Для комплексного анализа дополнительно контролировались 16 выходных параметров, отражающих физико-химическое состояние воды после каждой ступени: содержание основных загрязнителей (Fe,  $\text{NH}_4^+$ ), окислительно-восстановительный потенциал ( $Eh$ ), кислотность (pH), концентрация растворённого кислорода, перманганатная окисляемость, а также кинетические характеристики процессов.

Отбор проб выполнялся после выхода системы на стационарный режим; все измерения проводились в трёхкратной повторности. Общий объём собранного датасета составил 29 экспериментов.

Для построения моделей использовались методы полиномиальной регрессии второго порядка, регуляризованные алгоритмы (*ElasticNet*, *Lasso*) и современные методы машинного обучения (*CatBoost*, *XGBoost*, *Gaussian Process Regression – GPR*, *Support Vector Regression – SVR*). Точность оценивалась по коэффициенту детерминации ( $R^2$ ). Обработка данных и моделирование выполнялись в среде Python с использованием библиотек *scikit-learn*, *CatBoost* и *GPu*.

#### Результаты и их обсуждение.

Основной задачей моделирования было выявление зависимости остаточных концентраций общего железа ( $Y_{11}$ ) и аммонийного азота ( $Y_{12}$ ) на выходе из установки от исходных показателей воды ( $X_1$ ,  $X_2$ ) и параметров аэрации на ступенях I ( $V_1$ ) и II ( $V_2$ ). Сравнительный анализ точности апробированных моделей позволил сделать следующие выводы.

Наивысшую прогностическую точность ( $R^2 \approx 1,000$ ) продемонстрировали алгоритмы машинного обучения, такие как *CatBoost* и регрессия гауссовских процессов (*GPR*). Это свидетельствует об их исключительной способности улавливать сложные нелинейные взаимосвязи в данных, что делает их предпочтительными для прогнозирования в условиях резких колебаний состава исходной воды.

Наиболее сбалансированным соотношением прогностической способности и интерпретируемости обладали модели полиномиальной регрессии второго порядка и *ElasticNet* с полиномиальными признаками (*ElasticNet-poly*). Несмотря на несколько меньшую точность ( $R^2 = 0,758...0,967$ ) по сравнению с алгоритмами машинного обучения, их ключевое преимущество заключается в возможности содержательной интерпретации коэффициентов, что критически важно для анализа механизмов процесса и принятия оперативных технологических решений.

Были получены итоговые уравнения регрессии, связывающие остаточные концентрации загрязнителей с исходными параметрами и режимными факторами.

Для железа общего  $Y_{11}$  ( $R^2 = 0,9407$ ):

$$\begin{aligned} Fe_2 = & 0,2859 - 0,0639 \cdot Fe_0 - 0,0416 \cdot (NH_4^+)_0 - 0,0325 \cdot V1 + 0,0207 \cdot V2 + 0,0067 \times \\ & \times Fe_0^2 + 0,0104 Fe_0 \cdot (NH_4^+)_0 - 0,0007 Fe_0 \cdot V1 + 0,0013 Fe_0 \cdot V2 + 0,0012 \cdot (NH_4^+)_0^2 + \\ & + 0,0044 \cdot (NH_4^+)_0 \cdot V1 - 0,0126 \cdot (NH_4^+)_0 \cdot V2 + 0,0025 \cdot V1^2 + 0,0040 \cdot V1 \cdot V2 - 0,0028 \cdot V2^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Для азота аммонийного общего  $Y_{12}$  ( $R^2 = 0,9258$ ):

$$\begin{aligned} (NH_4^+)_2 = & 1,9488 + 0,0071 \cdot Fe_0 + 0,1762 \cdot (NH_4^+)_0 - 0,4579 \cdot V1 - 1,8941 \cdot V2 - 0,0154 \times \\ & \times Fe_0^2 + 0,0153 \cdot Fe_0 \cdot (NH_4^+)_0 + 0,0177 \cdot Fe_0 \cdot V1 + 0,0146 \cdot Fe_0 \cdot V2 + 0,0029 \cdot (NH_4^+)_0^2 - \\ & - 0,0074 \cdot (NH_4^+)_0 \cdot V1 + 0,0042 \cdot (NH_4^+)_0 \cdot V2 + 0,0591 \cdot V1^2 + 0,0020 \cdot V1 \cdot V2 + 0,6982 \cdot V2^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Критическая важность учета нелинейности была подтверждена низкой эффективностью простых линейных моделей. *ElasticNet* (без полиномиальных признаков) и *eLasso* показали неудовлетворительные результаты для моделирования железа ( $R^2 = 0,432$  и  $0,417$  соответственно), что однозначно указывает на невозможность адекватного описания сложных окислительно-сорбционных процессов линейными зависимостями. Таким образом, для решения различных практических задач целесообразно применение разных моделей: для задач оперативного управления, где важна интерпретируемость – полиномиальных уравнений и *ElasticNet-poly*; а для прогнозирования в условиях нестабильного состава воды и разработки стратегий оптимизации – алгоритмов *CatBoost* и *GPR*.

Апробация методики на действующем объекте в течение трех лет подтвердила ее эффективность: снижение концентрации остаточного железа на 35–45 % по сравнению с одноступенчатой схемой; сокращение энергозатрат на 15–20 % за счет оптимизированного дозирования аэрации; обеспечение стабильного качества очищенной воды при колебаниях состава исходной воды. Разработанный программный оптимизатор позволяет оперативно рассчитывать рациональные режимы аэрации по текущим показателям качества исходной воды, обеспечивая остаточные концентрации в пределах ПДК ( $Fe \leq 0,3$  мг/л,  $N-NH_4 \leq 1,5$  мг/л). Полученные модели могут быть интегрированы в систему онлайн-мониторинга и автоматизированного управления (*SCADA*) станции.

**Заключение.** Проведенное исследование доказало высокую эффективность применения методов машинного обучения (*CatBoost*, *GPR*) для прогнозирования работы двухступенчатой схемы очистки воды. Сравнительный анализ показал, что для задач оперативного технологического управления, требующих интерпретации, рекомендованы полиномиальные модели и *ElasticNet-poly*, в то время как для прогнозирования в условиях резких колебаний нагрузки целесообразно применение алгоритмов *CatBoost* и *GPR*. Разработанная на основе верифицированных моделей методика адаптивного управления позволяет существенно повысить эффективность и ресурсосбережение процесса, что является основой для создания автоматизированных систем управления водоочистными сооружениями малой и средней производительности. Апробация подтвердила возможность снижения концентрации остаточного железа на 35–45 % и сокращение энергозатрат на 15–20 %.

#### Список литературы

- 1 **Propolski, D.** Resent advances in underground water deironing and demanganization: Comprehensive review / D. Propolski, V. Romanovski // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Vol. 70. – P. 107089.
- 2 **Клебеко, П. А.** Обезжелезивание подземных вод модифицированным огнеупорным шамотом / П. А. Клебеко, В. И. Романовский // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – №. 4. – С. 135–146.
- 3 **Propolski, D.** Iron and Manganese Removal from Groundwater: Comprehensive Review of Filter Media Performance and Pathways to Polyfunctional Applications / D. Propolski, V. Romanovski // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2025. – Iss. 11 – P. 2499 – 2515.
- 4 **Propolski, D. E.** Multifunctional Modified carbon for purification of groundwater / D. E. Propolski, V. I. Romanovski // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – № 4. – С. 103–111.