

УДК 0.48+628.16.087+631.171:636.5

## РЕАЛИЗАЦИЯ СЦЕНАРНО-КОГНИТИВНОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОДООЧИСТКИ

**В. Н. ШТЕПА**

*Учреждение образования «Полесский государственный университет», г. Пинск, Республика Беларусь*

**Н. А. ЗАЕЦ**

*Национальный университет пищевых технологий Украины, г. Киев*

**А. Н. ЖЕЛНОВАЧ**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина*

Проведен критический анализ существующих европейских нормативных документов оценки экологической безопасности водных ресурсов в контексте эффективности удаления загрязнителей из водных ресурсов. Обоснована методика сценарно-когнитивного и нейросетевого моделирования процессов комбинированной водоочистки с использованием нечетких когнитивных карт и многослойных перцептронов и формированием энергоэффективных выборок. Такие наборы данных являются базисом для формирования соответствующих интеллектуальных решений. Практически реализовано сценарно-когнитивное (нечеткие когнитивные карты) и нейросетевое (многослойный перцептрон) моделирование процессов водоочистки с использованием прикладного программного продукта FCMapper. Подтверждены технологические и экологические приемлемости использования созданных математических моделей (относительные ошибки): учебная выборка – 2,7%, контрольная выборка – 2,9%, тестовая выборка – 3,05%. Имитационная оценка качества функционирования интеллектуальных моделей, выполненная в среде MatLAB, продемонстрировала, что математическое обеспечение достигает необходимой энергоэффективности и позволяет управлять экологической безопасностью комбинированных систем водоочистки: относительная ошибка реакции системы при выходе на заданное значение – 3,82%. Определено, что дальнейшие исследования целесообразно направить на формирование репрезентативных выборок для формирования интеллектуальных решений описания процессов удаления загрязнителей из стоков, что повысило бы их управляемость и экологическую безопасность.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, водоочистка, энергоэффективность, комбинированные методы водоочистки, система управления.

## IMPLEMENTATION OF SCRIPT-COGNITIVE AND NEURAL NETWORK MODELING OF WATER TREATMENT PROCESSES

**V. N. SHTEPA**

*Educational Institution "Polessky State University", Pinsk, the Republic of Belarus*

**N. A. ZAETS**

*National University of Food Technologies, Kiev, Ukraine*

**A. N. ZHELNOVACH**

*Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine*

*A critical analysis of the existing European regulatory documents for assessing the environmental safety of water resources in the context of the efficiency of removing pollutants from water resources was carried out. The article substantiates the technique of script-cognitive and neural network modeling of combined water treatment processes using fuzzy cognitive maps and multilayer perceptrons and generating energy efficient sample. Such datasets are the basis for the formation of appropriate intelligent solutions. Script-cognitive (fuzzy cognitive maps) and neural network (multilayer perceptron) modeling of water treatment processes using the FCMapper application software are practically implemented. The technological and environmental acceptability of using the created mathematical models (relative errors) has been confirmed: training sample – 2.7%, control sample – 2.9%, test sample – 3.05%. The imitation assessment of the quality of functioning of intelligent models, carried out in the MatLAB environment, has demonstrated that the software achieves the required energy efficiency and enables managing the environmental safety of combined water treatment systems: relative error of the system reaction when reaching the set value – 3.82%. It was determined that further research should be directed to the formation of representative samples for the formation of intelligent solutions for describing the processes of removing pollutants from effluents, which would increase their controllability and environmental safety.*

**Keywords:** environmental safety, water treatment, energy efficiency, combined water treatment methods, control system.

### **Введение**

Ключевыми параметрами качества сточных вод, контролируемых химическим анализом, являются: азот аммонийный, биологическое потребление кислорода (БПК), водородный показатель (рН), взвешенные вещества, железо, нефтепродукты, нитриты, нитраты, химическое потребление кислорода, фосфаты, хлориды, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), сульфаты. Химический анализ других показателей проводится при необходимости с учетом специфики предприятия – как правило, анализы дополняются несколькими показателями.

В Европе для регулировки экологической безопасности водных ресурсов была принята Директива 2000/60/ЕС Европарламента и Совета Европы – Рамочная Директива о воде (Water Frame Directory (WFD)) [1]: методология оценки экологического статуса в рамках 5-классовой системы. Важнейший принцип этой рамочной директивы ЕС – независимо от того, соответствует ли вода в водоеме нормативу или нет, нельзя допускать ухудшения ее качества и повышения объема сбросов загрязнителей в водоем; каждый новый сброс необходимо компенсировать снижением объема существующих.

Подходы к разработке систем разрешений на сбросы в ЕС [2]:

– с учетом характеристик лучшей практически применимой технологии (best available technology (BAT));

– с учетом необходимости обеспечения соответствия нормативам качества окружающей среды (environmental quality standards (EQSs)), что является частью цели по обеспечению качества водоприемника.

Также Европейскими парламентом и Советом (Решение № 2455/2001/ЕС) утвержден перечень «приоритетных» загрязняющих веществ: вещества, представляющие значительную опасность водной среде или опосредованно через водную среду. Отдельные вещества выбраны на основании их персистентности, токсичности и биоаккумуляции – 132 вещества.

Указанная нормативно-правовая база должна поддерживаться при технологической реализации процессов водоочистки даже в условиях действия ЧС [3].

Вместе с тем серьезным недостатком функционирования систем удаления загрязнителей из водных растворов является сложность моделирования протекающих в них процессов в связи с их многофакторностью, нелинейностью и нестационарностью [4].

Решение такой задачи дало бы возможность строить автоматизированные блоки управления сооружениями водоочистки, действующими в настоящее время [5], [6].

Целью исследования является создание и реализация методики моделирования процессов очистки сточных вод с использованием когнитивного и нейросетевого моделирования с целью повышения экологической безопасности и ресурсоэффективности удаления загрязнителей из водных растворов.

### Постановка задач

Для достижения цели сформулированы следующие задачи исследований:

- обоснование методики сценарно-когнитивного и нейросетевого (НС) моделирования процессов водоочистки;
- реализация сценарно-когнитивного и нейросетевого моделирования процессов водоочистки;
- имитационная оценка качества функционирования интеллектуальных моделей комбинированных систем водоочистки (КСВ).

### Обоснование методики сценарно-когнитивного и нейросетевого моделирования процессов в комбинированных системах водоочистки

Для построения динамической модели с целью определения эффективных режимов при различных значениях входных параметров использован программный продукт FCMapper и ранее созданная структура нечеткой когнитивной карты (НКК) технико-экономических параметров водоочистки [7], [8].

Моделирование включает несколько последовательных этапов.

*Этап 1.* Формирование набора значений концептов на основе аналитических исследований.

*Этап 2.* Проведение сценарно-когнитивного моделирования с целью эффективного заполнения всей площади возможных значений – формирования учебного набора экспериментальных данных.

С учетом производственных испытаний и теоретических наработок [1] предлагается использовать критерий оценки энергоэффективности работы оборудования водоочистки, который включает и требования к обеспечению экологической безопасности:

$$EF_Y = \frac{\left[ \left( \frac{L_{\text{вых}} - L_{\text{зад}}}{L_{\text{зад}}} 100 \% \right) + \dots + \left( \frac{LN_{\text{вых}} - LN_{\text{зад}}}{LN_{\text{зад}}} 100 \% \right) \right] \sum_{i=1}^N Q_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad \%/кВт, \quad (1)$$

где  $L_{\text{вых}}$  – фактическое значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки;  $L_{\text{зад}}$  – заданное (нормативное) значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки;  $Q$  – время работы оборудования, ч;  $W$  – электроэнергия, затраченная на водоочистку, кВт · ч;  $N$  – количество параметров оценки качества водоочистки (как правило, соответствуют количеству установок, действующих на воду).

*Этап 3.* Синтез нейронной сети, которая результирует сценарно-когнитивное моделирование процессов в комбинированных системах водоочистки, поскольку данные работы НКК являются эталонными наборами для обучения этой НС.

В FCMapper при сценарном моделировании используется нелинейная функция с насыщением, так называемая логистическая функция или сигмоид (функция S-образного вида) [6]:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}. \quad (2)$$

Причем все значения концептов меняются в условном диапазоне [0, 1]. Для перехода в реальные физические величины после окончания этапа 3 необходимо провести денормирование согласно статистике реального процесса водоочистки и зависимости

$$x_n = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (3)$$

где  $x_i$  – реальное значение элемента;  $x_{\min}$  – элемент, который имеет минимальное значение;  $x_{\max}$  – элемент, который имеет максимальное значение.

Отсюда

$$x_i = x_n (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}. \quad (4)$$

При анализе выходного концепта «Энергоэффективность» следует учесть, что значение, которое необходимо обеспечить, – 0,5.

#### **Реализация сценарно-когнитивного и нейросетевого моделирования процессов в комбинированных системах водоочистки**

Реализация разработанной последовательности сценарно-когнитивного и НС моделирования выполнена на основе результатов экспериментальной информации [2]:

*Этап 1.* Начальные значения концептов выбираются исходя из предыдущих исследований (рис. 1), где  $E1$  – техническое и технологическое оснащение установок водоочистки;  $E2$  – степень использования оборудования;  $E3$  – управление производством;  $X1$  – цены на энергоносители;  $X2$  – расход воды;  $X3$  – pH входной воды;  $X4$  – концентрация взвесей (входная вода);  $X5$  – концентрация нитратов (входная вода);  $X6$  – концентрация фосфатов (входная вода);  $X7$  – БПК<sub>5</sub> входной воды;  $X8$  – СПАВ (входная вода);  $X9$  – концентрация взвесей (входная вода);  $X10$  – температура входной воды;  $X11$  – pH выходной воды;  $X12$  – концентрация взвесей (выходная вода);  $X13$  – концентрация нитратов (выходная вода);  $X14$  – концентрация фосфатов (выходная вода);  $X15$  – БПК<sub>5</sub> выходной воды;  $X16$  – концентрация СПАВ (выходная вода);  $Y1$  – финансовые расходы;  $Y2$  – энергоэффективность [8].

Результаты сценарно-когнитивного моделирования (рис. 2) становятся базисом для построения нейронной сети.

*Этап 2.* Сценарно-когнитивное моделирование включало в себя расчет 22 поведенческих сценариев [8], при этом решалась задача эффективного заполнения всей области значений. Интегральные показатели регистрировались, определения их энергоэффективных режимов не проводилось согласно (1).

SelectScene	3			calculate selected Scenario		Compare Scenarios	
Number of Iterations	20						
Concepts	No Changes (Scene 1)	Scene 2	Scene 3	Results - No Changes (Scene 1)	Results - Scene 2	Results - Scene 3	
E1	1,00	1,00	0,90	0,50	1,00	0,9	
E2	1,00	1,00	0,10	0,5	1	0,1	
E3	1,00	1,00	0,90	0,5	1	0,9	
E4	1,00	1,00	0,10	0,5	1	0,1	
X1	1,00	1,00	0,90	0,5	1	0,9	
X2	1,00	1,00	0,10	0,5	1	0,1	
X3	1,00	1,00	0,90	0,5	1	0,9	
X4	1,00	1,00	0,100000	0,500000	1	0,1	
X5	1,00	1,00	0,90	0,500000	1	0,9	
X6	1,00	1,00	0,10	0,500000	1	0,1	
X7	1,00	1,00	0,90	0,500000	1,000000	0,900000	
X8	1,00	1,00	0,10	0,500000	1,000000	0,100000	
X9	1,00	1,00	0,90	0,500000	1,000000	0,900000	
X10	1,00	1,00	0,10	0,500000	1,000000	0,100000	
X11	1,00	1,00	0,90	0,500000	1,000000	0,900000	
X12	1,00	1,00	0,10	0,500000	1,000000	0,100000	
X13	1,00	1,00	0,90	0,500000	1,000000	0,900000	
X14	1,00	1,00	0,10	0,500000	1,000000	0,100000	
X15	1,00	1,00	0,90	0,500000	1,000000	0,900000	
Y1	1,00	0,10	0,60	0,298178	0,100000	0,600000	
Y2	1,00	0,10	0,60	0,328495	0,100000	0,600000	

Рис. 1. Интерфейсный модуль сценарно-когнитивного моделирования комбинированных систем водоочистки программного продукта FCMapper

у.е.

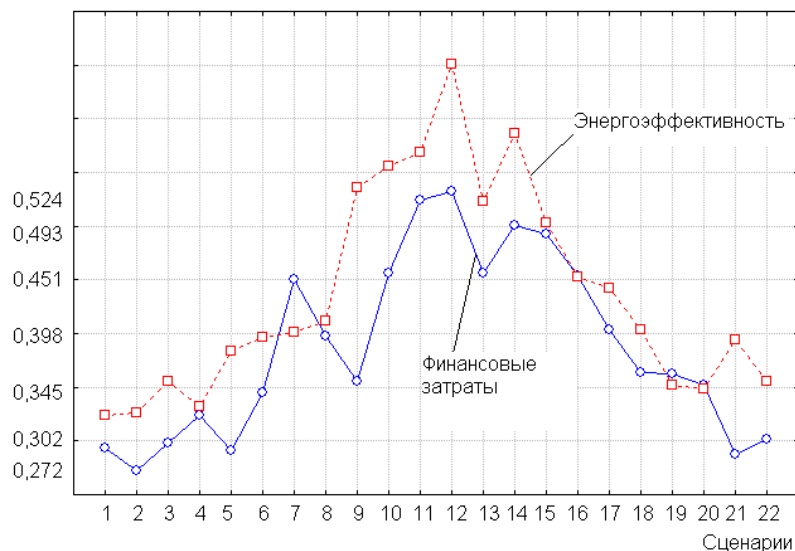


Рис. 2. Результаты сценарно-когнитивного моделирования комбинированных систем водоочистки

Этап 3. На основании созданной учебной выборки режимов комбинированной водоочистки синтезирована НС (рис. 3), при этом добавлен еще один входной параметр – сила тока (исходя из экспериментально-аналитических исследований и работы адекватной НС пункта) [2].

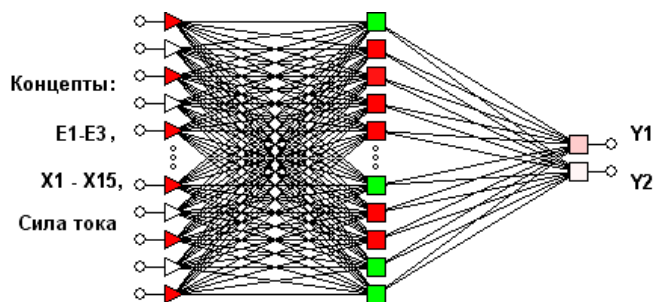


Рис. 3. Архитектура нейросетевой (многослойный перцептрон) оценки сценарно-когнитивного моделирования

Качество функционирования НС технологически и с точки зрения экологической безопасности соответствует требованиям адекватности (относительные ошибки): учебная выборка – 2,7 %, контрольная выборка – 2,9 %, тестовая выборка – 3,05 % (рис. 4 и 5).



Рис. 4. Качество обучения нейросетевой оценки сценарно-когнитивного моделирования

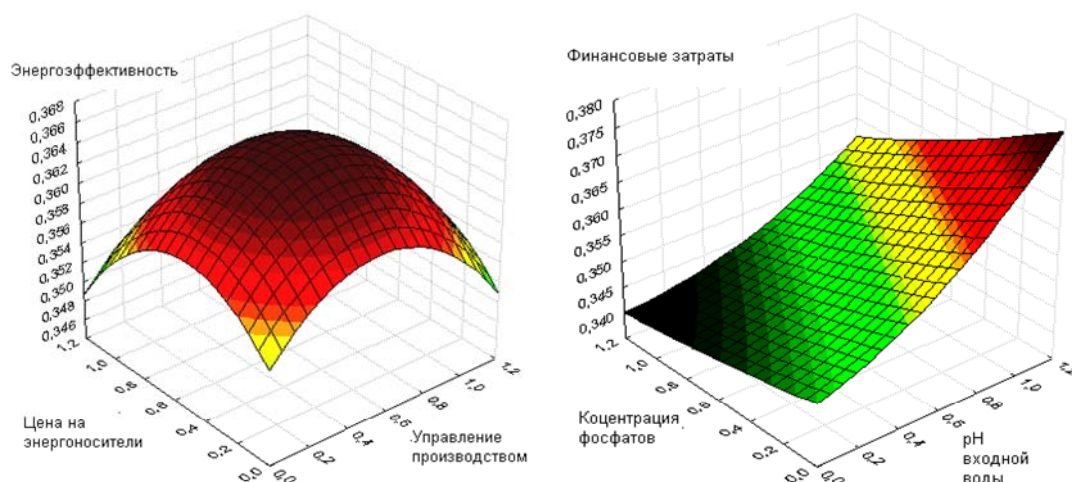


Рис. 5. Зависимости выходных концептов («Энергоэффективность» и «Финансовые затраты») от промежуточных и входных концептов (результаты работы оптимизированной нейросети)

### Имитационное моделирование результатов определения энергоэффективных режимов комбинированных систем водоочистки

Согласно результатам экспериментальных исследований [3]–[5] для проведения имитационного моделирования синтезирована НС, где на входе сила тока, а выходные параметры – технологические показатели процесса водоочистки (рис. 6).

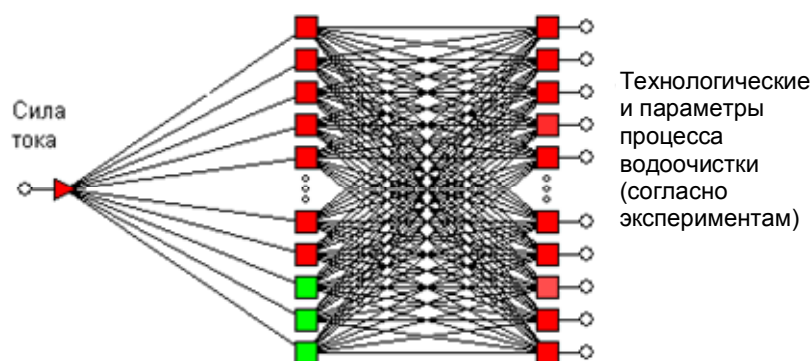


Рис. 6. Архитектура нейросетевой модели процессов водоочистки: учебная выборка – 2,42 %, контрольная выборка – 3,84 %, тестовая выборка – 3,75 %

В пакете прикладного математического программного обеспечения MatLAB Simulink, который содержит блок нейросетевого моделирования, применив созданные программные реализации [3], совершили имитационные исследования функционирования НС энергоэффективного управления КСВ (рис. 7).

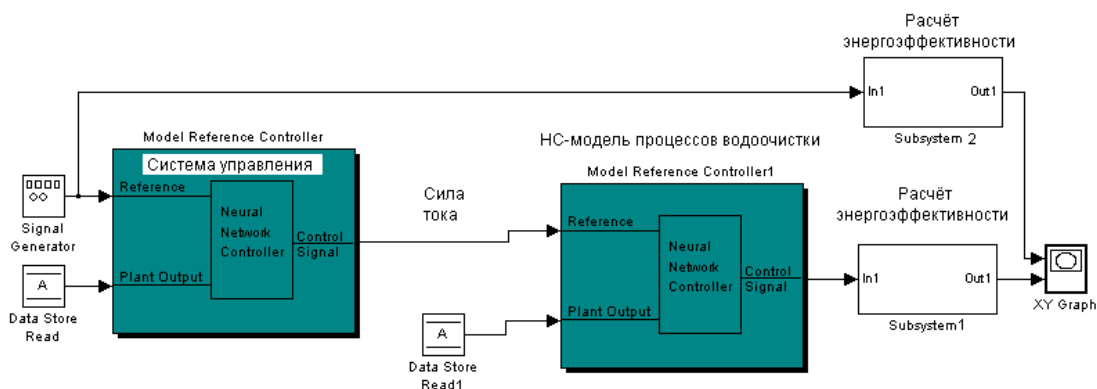


Рис. 7. Структура имитационного моделирования комбинированных систем водоочистки

Подсистемы Subsystems выполняют следующие задачи:

- Subsystems1 – расчет значения коэффициента энергоэффективности после расчета НС-модели процессов водоочистки;
- Subsystems2 – расчет значения заданного значения коэффициента энергоэффективности.

Установлено, что функциональные характеристики синтезированной НС соответствуют технологическим требованиям: относительная ошибка реакции системы при выходе на заданное значение – 3,82 %.

Соответственно, предложенное методическое обеспечение достигает необходимой энергоэффективности, что позволяет управлять экологической безопасностью КСВ.

Такие математические решения также создают объективные экономические предпосылки для реализации замкнутого водоснабжения промышленных предприятий, что обеспечивает реализацию концепции инновационного предпринимательства [10] в контексте повторного использования природных ресурсов.

### **Заключение**

Экологическую безопасность и экономию энергетических ресурсов комбинированных систем водоочистки возможно достичь путем построения систем управления на основе когнитивных и нейросетевых моделей.

Проверка качества функционирования созданных моделей продемонстрировала соответствие полученных математических решений технологическим и экологическим требованиям (относительные ошибки): учебная выборка – 2,7 %, контрольная выборка – 2,9 %, тестовая выборка – 3,05 %.

Имитационная проверка подтвердила, что функциональные характеристики синтезированной энергоэффективной интеллектуальной модели приемлемы: определенная относительная ошибка реакции системы при выходе на заданное значение – 3,82 %.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на формирование репрезентативных выборок для формирования интеллектуальных моделей комбинированных систем водоочистки, что повысило бы их экологическую безопасность.

### **Литература**

1. Штепа, В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2016. – № 5. – С. 479–487.
2. Штепа, В. М. Оцінка енергетичних характеристик процесів очищення стічних вод агропромислових підприємств електротехнічними комплексами / В. М. Штепа // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2014. – Вип. 194. – Частина 3. – С. 259–265.
3. Штепа, В. М. Метод побудови систем енергоефективного управління комбінованою електротехнологічною очисткою стічних вод різногалузевих промислових об'єктів / В. М. Штепа, В. В. Каплун // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки». – 2017. – № 2 (108). – С. 27–37.
4. Штепа, В. М. Розробка методики створення технологічних регламентів комбінованих систем очищення стічних вод промислових об'єктів / В. М. Штепа, Р. Є. Кот // Енергетика і автоматика. – 2017. – № 2 (32). – С. 89–99.
5. Люггер, Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем : пер. с англ. / Дж. Ф. Люггер. – М. : Вильямс, 2005. – 864 с.
6. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1408 с.
7. Штепа, В. Н. Нейросетевой блок поддержки адаптивного управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 4. – С. 37–43.
8. Штепа, В. Н. Оптимизация функционирования нечетких когнитивных карт с использованием нейронных сетей (на примере управления процессами водоочистки) / В. Н. Штепа // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 4 (67). – С. 97–105.



9. Packard, A. Linear, multivariable robust control with a  $\mu$  perspective / A. Packard, J. Doyle, G. Balas // ASME Journal of Dynamic Systems: Measurement and Control, 50th Anniversary Issue. – June 1993. – Vol. 115, No. 2b. – P. 310–319.
10. Вертай, С. П. Механизм формирования инновационного предпринимательства / С. П. Вертай, В. Н. Штепа, Е. И. Сасевич // Экономика и упр. – 2016. – № 4 (48). – С. 10–14.

*Получено 24.07.2020 г.*