

утилизации отходов животноводства: учебн. пос. / О.Д. Сидоренко, Е.В. Черданцев. – Москва: МСХА, 2001. – 74 с.

7. Кривых, Л. И. Утилизация отходов с животноводческих комплексов и ферм: практическое руководство / Л. И. Кривых. – Барнаул: РИО АИПКРС АПК, 2005. – 40 с.

8. Босак, В.Н. Птичий помет. Состав и применение / В.Н. Босак // Наше сельское хозяйство, 2015. – №9. – С. 42.

9. Марченко, В.И. Интенсификация анаэробного сбраживания птичьего помета / В.И. Марченко // Техника в сельском хозяйстве, 2011. – №6. – С.27-29.

10. Марченко, В.И. Биогазовая установка для сбраживания отходов птицеводства / В.И. Марченко, В.И. Гребенник, И.А. Севостьянов // Сельский механизатор, 2015. – №1. – С. 24-25.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.09.2015

УДК 628.16.087+631.171:636.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОДООЧИСТКИ

В. Н. Штепа,

*доцент каф. высшей математики и информационных технологий Полесского гос. университета,
канд. техн. наук, доцент*

В статье проанализированы недостатки существующих систем водоочистки, описаны ключевые загрязнители сточных вод промышленных и коммунальных предприятий, агропромышленного комплекса. Разработаны методика и оборудование экспериментально-аналитических исследований водоочистки с учетом действия возмущающих факторов. Проведены экспериментально-аналитические исследования согласно предложенной методике.

Ключевые слова: экологическая безопасность, очистка сточных вод, нейронная сеть, экспериментальные исследования, ресурсоэффективность

The paper analyzes the shortcomings of the existing water treatment systems; the key pollutants of industrial and wastewater utilities are analyzed; Techniques and equipment of experimental analyzes of water treatment taking into account the action of perturbing factors have been developed; Experimental and analytical studies are carried out according to the proposed method.

Keywords: ecological safety, sewage, treatment neural network, experimental studies, resource efficiency

Введение

Доля агропромышленного комплекса (АПК) в водопотреблении наряду с электроэнергетикой и жилищно-коммунальным сектором – одна из наиболее значимых и составляет около 20-25 % [1]. Основными источниками загрязнения открытых водоемов являются недостаточно очищенные сточные воды промышленных (65 %) и коммунальных предприятий (18-20 %), а также агропромышленный комплекс (16-20 %) [2].

Самые опасные загрязнители – нефтепродукты, соли тяжелых металлов, фенолы и биогенные вещества, последние два характерны для сточных вод агропромышленных предприятий [3].

Мощными водопотребителями в АПК являются свинокомплексы, птицеводческие комплексы, перерабатывающие предприятия – ими сбрасывается около 40-50 % полученной воды, в зависимости от технологии производства и региона.

Во многих случаях сбросы таких предприятий не проходят даже элементарной очистки [4], при том, что большинство из них попадают в водоемы рыбохозяйственного назначения. Именно поэтому проблема разработки эффективных методов и технологий очистки сточных вод агропромышленных объек-

тов является актуальной, что подтверждено в задачах Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 года (п. 3.3 «Природно-ресурсный потенциал»), где указано, что для обеспечения главных направлений природоохранной политики, необходимо повсеместно внедрять прогрессивные энерго- и ресурсосберегающие технологические процессы, обеспечивающие снижение удельного водопотребления и объема отведения сточных вод, переход на мало- и безводные технологии производства.

Сложность создания эффективных систем очистки сточных вод вызвана рядом причин [5], из которых можно выделить следующие:

– многофакторность и нелинейность характеристик параметров, влияющих на процессы изменения свойств водных растворов и разной природой загрязнителей (биологической, химической, физической);

– возможность неконтролируемого изменения качества воды даже в процессе очистки: реагенты и загрязнители при разных условиях могут синтезировать новые соединения, которые более опасны, чем первоначальные загрязнители;

– отсутствие необходимой номенклатуры измерительных приборов, способных работать в режиме

реального времени в агрессивных условиях: в автоматизированных системах управления разработано только до десяти таких информационно-измерительных комплексов, хотя качество воды нормируется по десяткам параметров;

– работы систем водоочистки в режиме постреакции: технологические режимы водообработки изменяются только после получения информации с существующих датчиков о качестве воды, что с учетом высокой инерционности промышленных установок, может привести к катастрофическим последствиям – не происходит превентивное противодействие возможным нештатным ситуациям (залповым выбросам, чрезвычайным ситуациям и т. д.).

Поэтому разработка методики экспериментально-аналитических исследований комбинированных систем водоочистки, а не только соединения разных способов воздействия на водные растворы в один технологический комплекс может обеспечить надлежащую функциональную эффективность, является актуальной научно-технической задачей.

Основная часть

На начальном этапе необходимо было определить наиболее распространенные отклонения от нормативов, чтобы выбрать эффективные методы изменения свойств водных растворов. В зависимости от концентрации, производственные сточные воды могут быть высококонцентрированными и слабоконцентрированными, а по значению показателя pH – малоагрессивными (в том числе слабокислые и слабощелочные) и высокоагрессивными (сильнокислые и сильнощелочные).

Главные загрязнители сточных вод, согласно природе происхождения, подразделяются на химические (кислоты, оксиды, щелочи, гидрооксиды, соли, нефтепродукты, тяжелые металлы, фенолы, пестициды, нитраты и фосфаты); биологические (вирусы, бактерии, микробы, лигнины, грибки); физические (радиоактивные элементы, взвешенные элементы, тепло- и органо-лептика, глина) [6].

Сточные воды, исходя из объектов-загрязнителей, делятся на 3 группы [6]:

1. Хозяйственно-бытовые (органические составляющие – около 60 %; минеральные вещества – около 40 %). Их особенность заключается в высоком содержании азотсодержащих соединений и фосфатов, значительной степени фекального загрязнения.

2. Промышленные сточные воды: органические и неорганические элементы. Особенность сточных вод заключается в высокой концентрации, в зависимости от профиля предприятия, взвешенных частиц, возбудителей заболеваний, тяжелых металлов, нефтепродуктов, органических красителей, фенолов, поверхностно-активных веществ, сульфатов, хлоридов и тяжелых металлов.

3. Поверхностные сточные воды (дождевые и талые), формирующиеся из атмосферных осадков, проникающих в почву и стекающих в водоемы посред-

ством ливневой канализации с территории промышленных предприятий и населенных пунктов.

В результате обобщения исследований [1-4], в качестве типовых загрязнителей сточных вод, относительно которых проводились эксперименты, были выбраны:

- нитраты (NO_3^-);
- фосфаты (ортофосфаты PO_4^{3-} и полифосфаты);
- pH;
- биологическая потребность кислорода (БПК);
- концентрация взвешенных элементов;
- поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Для удаления этих элементов выбирались известные методы водоочистки [6], с одним ограничением – без использования реагентов (рис. 1).

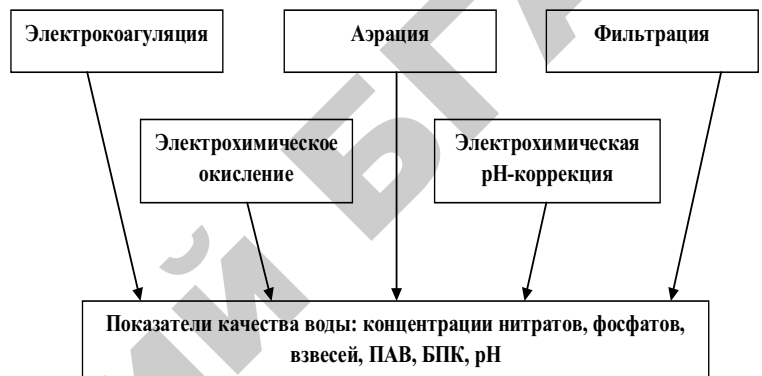


Рисунок 1. Выбранные безреагентные методы регулирования показателей воды

На основании предварительных экспериментов [1] разработан и апробирован комплекс экспериментальных исследований (КЭИ) качества и энергоэффективности удаления загрязнителей [7] (рис. 2).

Функциональные задачи блоков КЭИ (табл. 1):

Таблица 1. Параметры КЭИ качества и энергоэффективности водоочистки

Параметр	Значение
Общий объем, л	240
Напряжение на выходе блока питания, В	42
Высота, м	2,8
Площадь, м ²	10
Энергопотребление, кВт·час	0,5 – 4

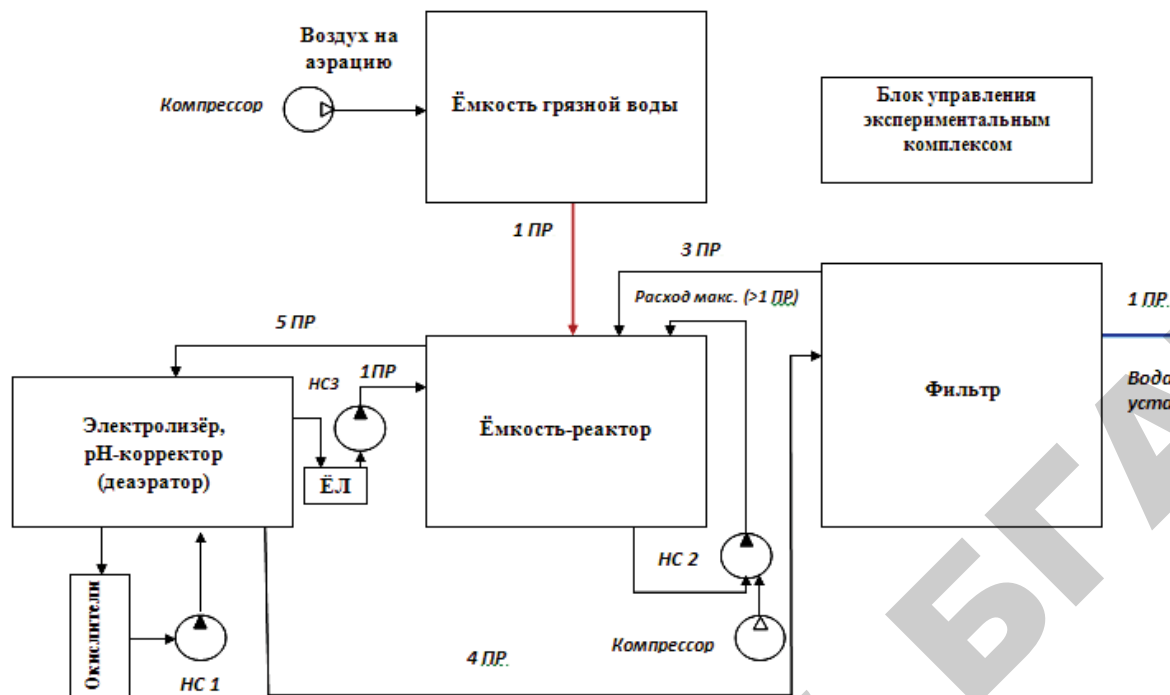
– емкость грязной воды: усреднение, аэрация и удаление пены ПАВ;

– электролизер и pH-корректор: электрохимическое выделение коагулянтов из стружки Ст.3, коррекция pH, аэрация и деаэрация водных растворов;

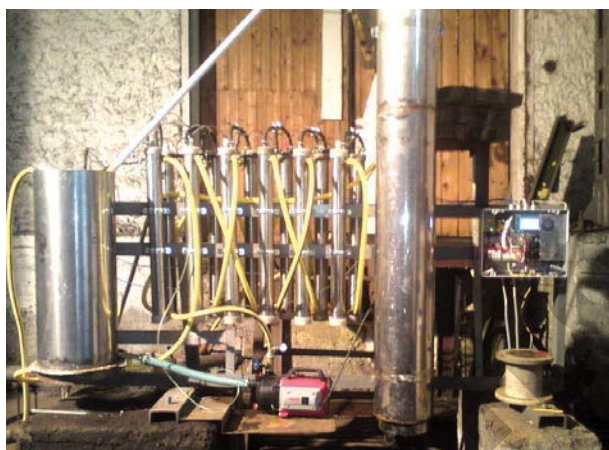
– окислители: электрохимическое выделение атомарного кислорода и окисление водного раствора, стабилизация pH;

– емкость реактор: завершение нейтрализации и коагуляции;

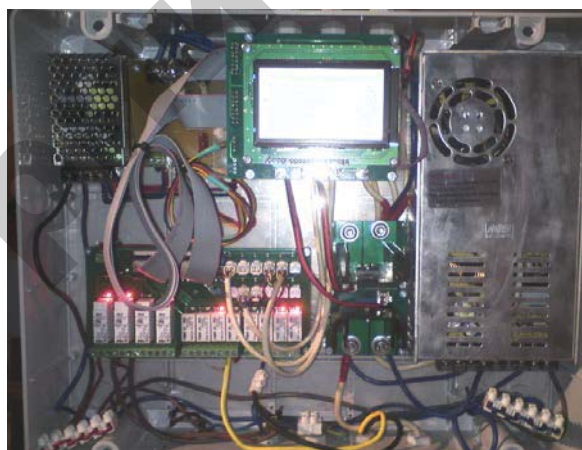
– пенополистирольный фильтр: фильтрация и сорбция загрязнителей;



А)



Б)



В)

Рисунок 2. Комплекс экспериментальных исследований качества и энергоэффективности водоочистки:
А – структурная схема (ПР – плановый расход, НС – насос, ЕЛ – емкость луг); Б – внешний вид комплекса;
В – внешний вид блока управления

– блок управления на основе микроконтроллера ATmega: поддержание заданных режимов работы оборудования.

Измерения значений показателей качества воды выполнялись при помощи методик и технических средств:

- концентрации фосфатов и нитратов, согласно методике Лурье;
- БПК – измерительной системой AL 606;
- концентрации взвесей – нефелометром ФЭК 60;
- pH – pH-метр-иономер И-500;
- ПАВ – согласно ПНД Ф 14.1:2.15.15-95.

Задача экспериментальных исследований заключалась в получении данных относительно эффекта и

энергозатрат водоочистки при варьировании значений загрязнителей и режимов работы оборудования не только в типовых диапазонах, но и в случае кратных превышений количества загрязнителей. Такие результаты дадут возможность создать систему управления, способную работать в условиях залповых сбросов загрязнителей и нештатных ситуаций.

Управляющим воздействием на значения загрязнителей будет общая сила тока на электролизере (pH-корректоре) и окислителях (рис. 3). Остальные элементы (насосы) будут работать в установленном стационарном режиме компрессора на максимально возможной продуктивности (интенсификация реакций,



Рисунок 3. Схема проведения экспериментальных исследований

согласно паспортным характеристикам насосов – потребление воздуха до 8 % номинального расхода).

Концентрация нитратов и фосфатов обеспечивалась стехиометрическим разбавлением микроэлементов, рН корректировался с помощью луга (NaOH) и кислоты (CH₃COOH), показатели взвесей обеспечивались добавлением глины, ПАВ регулировался добавлением моющих средств (после предварительной оценки их концентраций в водных растворах), БПК устанавливался добавлением (NH₂)₂CO. Общие показатели модельной воды измерялись после кондиционирования в одной емкости. За базовый водный раствор бралась вода питьевого качества согласно ГОСТ 2874-82.

Диапазоны, в которых изменяются загрязнители, выбирались с учетом необходимости исследования нестандартных ситуаций (табл. 2) – исследовались превышения предельно-допустимых концентраций (ПДК) в разы.

Таблица 2. Диапазоны изменения значений параметров экспериментов

Показателей	Диапазоны
Концентрация нитратов, мг/л	10 – 300
Концентрация фосфатов, мг/л	0,1 – 3
Концентрация ПАВ, мг/л	0,3 – 3
БПК, мг/л	1 – 7
рН	5,5 – 9,5
Концентрация взвесей, мг/л	10 – 2000
Объемный расход (плановый расход) на выходе КЭИ, м ³ /сутки	0,5 – 3

Значения параметров выбирались случайно с целью максимального заполнения диапазонов проблемной области (табл. 2). После получения данных водоочистки рассчитывались общие затраты электроэнергии, расход воздуха. За нормативные требования, к которым необходимо привести качество воды, брались параметры сбросов в рыбохозяйственные водоемы [7].

С учетом производственных испытаний и теоретических наработок [1] предлагается универсальный критерий оценки энергоэффективности (ЕЕ) работы электротехнологического оборудования водоподготовки, который включает и требования к обеспечению экологической безопасности:

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

где $L_{\text{вых}}$ – фактическое значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки;
 $L_{\text{зад}}$ – заданное (нормативное) значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки;
 t – время работы оборудования, ч;
 W – электроэнергия, затраченная на водоочистку, кВт·час;

N – количество параметров оценки качества водоочистки (как правило, соответствует количеству установок, действующих на воду).

После выполнения экспериментальных исследований и расчета энергоэффективности начинается этап аналитического исследования (рис. 4).

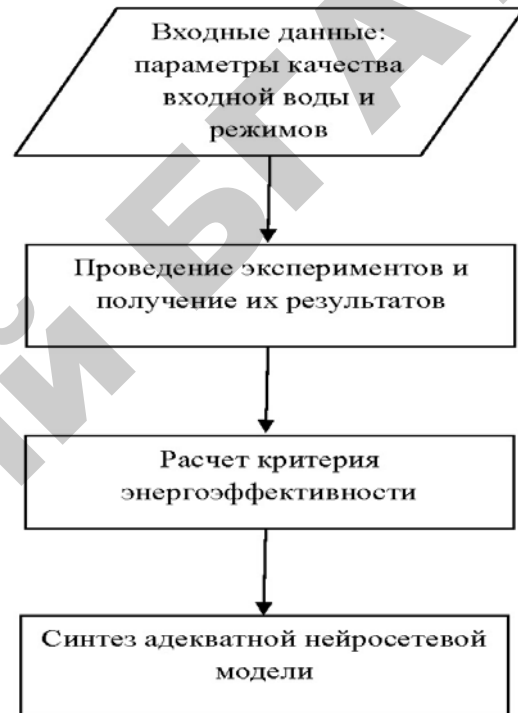
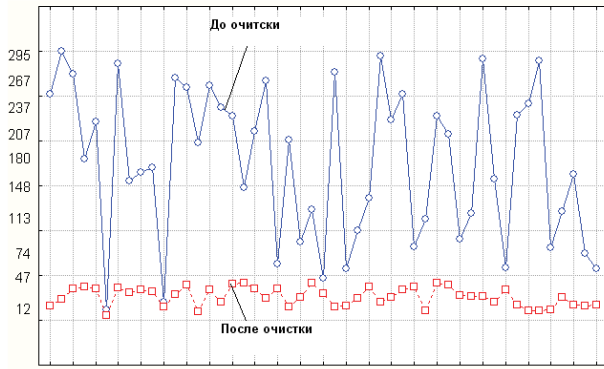


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма проведения экспериментально-аналитических исследований комбинированных систем водоочистки

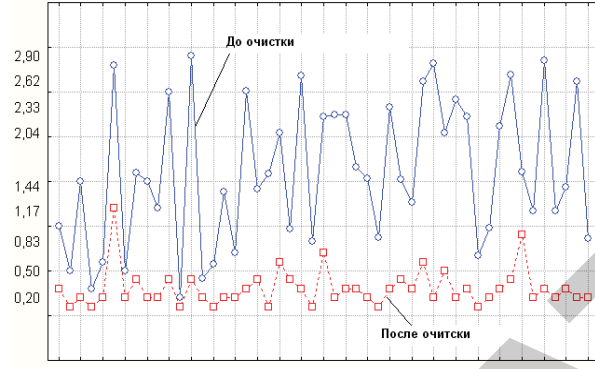
Результаты исследований подтвердили и количественно продемонстрировали сложность взаимосвязей между параметрами и режимами очистки воды в комбинированных системах (рис. 5), что обосновывает использование для аналитических исследований системы искусственного интеллекта на основе нейронных сетей. Необходимость создания для дальнейших исследований адекватных математических моделей выражается и в сложности проведения экспериментов: подготовка и проведение одного эксперимента занимала более 12 часов. Весь блок из 49 экспериментов занял около 2 месяцев.

Оценка расчетных значений критерия энергоэффективности (1) подтверждает нелинейность процессов в комбинированных установках (рис. 6).

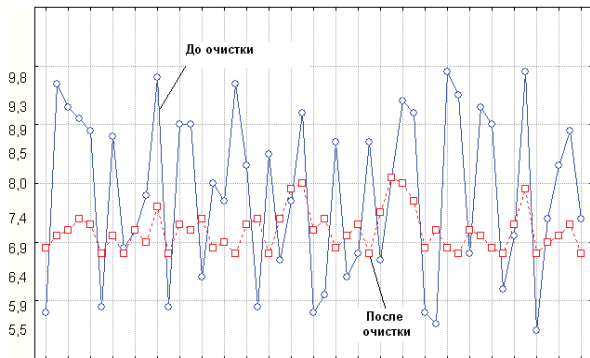
Концентрация нитратов, мг/л



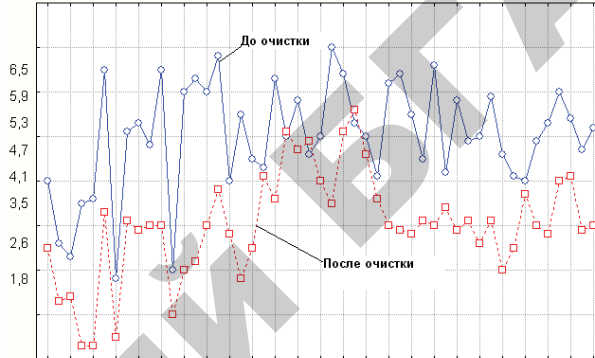
Концентрация фосфатов, мг/л



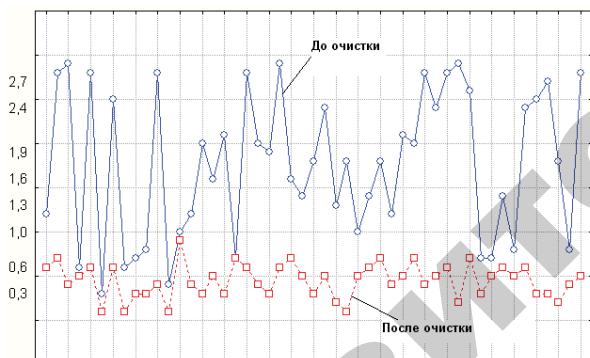
pH



БПК, мг/л



ПАВ, мг/л



Концентрация взвесей, мг/л

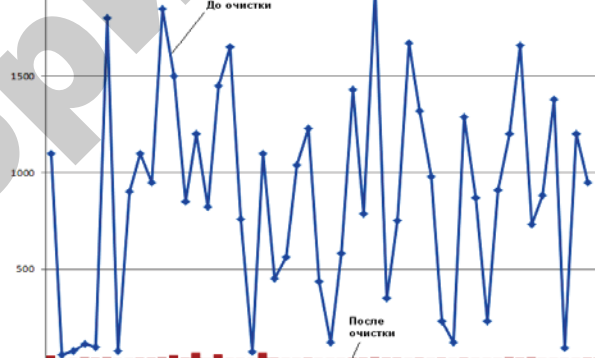


Рисунок 5. Результаты экспериментальных исследований с использованием КЭИ качества и энергоэффективности водоочистки

Для синтеза и исследования нейронной сети (НС) типа многослойный перцептрон, который продемонстрировал эффективность работы в условиях размытости и неполноты входной информации [4, 6], использован программный пакет Statistica Neural Networks (критерий – минимизация среднеквадратической ошибки НС). В контексте нашей задачи его преимущество над аналогичными разработками заключается в реализации функционального блока оптимизации архитектуры нейромоделей, который использует линейные подходы и метод

имитации "отжига" на основе распределения вероятностей Гиббса [7]:

$$P(x^* \rightarrow x_{i+1} | x_i) = \begin{cases} 1, & F(x^*) - F(x_i) < 0 \\ \exp\left(-\frac{F(x^*) - F(x_i)}{Q_i}\right), & F(x^*) - F(x_i) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $F(x)$ – функция активации НС,
 $Q_i > 0$ – элементы произвольно ниспадающей к нулю последовательности.

Отсутствие переобучения НС в результате ите-

рационального обучения, согласно алгоритму обратного распространения ошибки, проверялось делением данных на учебные, контрольные и проверочные.

Адекватность синтезированного многослойного персептрона (рис. 7), где в качестве входных выбраны параметры качества воды до и после очистки, технологические показатели; выход – энергоэффективность, подтверждена приемлемостью среднеквадратической ошибки (рис. 8).



Рисунок 6. Критерий энергоэффективности комбинированных систем водоочистки

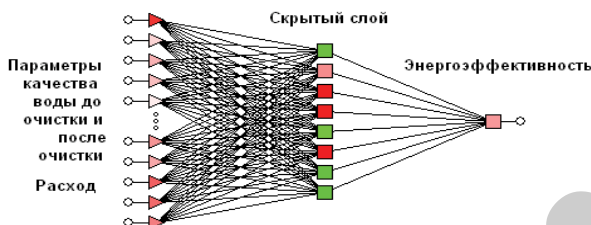


Рисунок 7. Архитектура многослойного персептрона оценки энергоэффективности водоочистки в комбинированных установках водоочистки

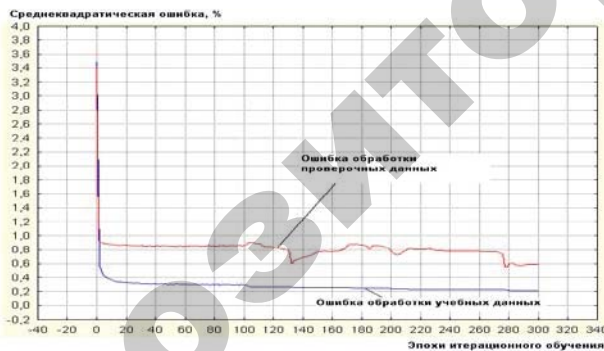


Рисунок 8. Качество синтеза многослойного персептрона

Полученные результаты создания соответствующей НС (учебная ошибка – 0,2%; проверочная ошибка – 0,6%) подтверждают и возможность использования такой математической модели для дальнейших исследований режимов работы комбинированных систем водоочистки.

Выводы

С учетом многофакторности и многостадийности процессов в комбинированных системах очистки

сточных вод предприятий АПК экспериментальные исследования необходимо проводить только комплексно, без разрыва предполагаемых технологических процессов изменения свойств водных растворов.

Разработанный и апробированный комплекс экспериментальных исследований качества и энергоэффективности очистки рекомендуется использовать для синтеза аналитических моделей таких процессов в виде нейронных сетей.

Дальнейшие исследования созданной адекватной математической модели (многослойный персептрон) лучше всего проводить в контексте разработки методики синтеза энергоэффективных систем управления комбинированными установками водоочистки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донченко, М.И. Очистка растворов от дисперсных примесей методом электрокоагуляции. / М.И. Донченко, О.Г. Срибная, Ф.И. Гончаров, В.Н. Штепа // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2009. – № 22. – С. 57-65.
2. Штепа, В.Н. Концепция построения интеллектуальных систем управления биотехническими объектами с учетом влияния природных факторов / В.Н. Штепа // Труды 9-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». – М.: ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства», 2014. – Ч.5. – С.14 – 19.
3. S.Shvorov, V.Reshetyuk, I.Bolbot, V. Shtepa, D. Chirchenko Theoretical issues construction and operation of agricultural mission robotic system // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture (Agricultural and Forest Engineering). – Warszawa: Warsaw Univ. Life Sci, 2012. – № 60. – P. 97 – 103.
4. 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. – К.: НУБіПУ, 2014. – Вип. 194. – Ч. 3. – С. 259 – 265.
5. A. Dudnik, V. Lysenko, V. Reshetyuk, V. Shtepa Greenhouse environmental control system with neural network predictions of external disturbances // Contemporary aspects of production engineering. – Warszawa: Warsaw Univ. Life Sci. – 2013. – P. 40 – 52.
6. V Lysenko Intelligent effective management system of biotechnical objects based on natural disturbances prediction / V. Lysenko, B. Golovinskiy, V. Reshetyuk, V. Shtepa, V. Shcherbatyuk // International Scientific Electronic Journal “Earth Bioresources and Life Quality”. ISSN 2221-1713. <http://gcheraejournal.nubip.edu.ua/index.php/ebql/issue/view/5>
7. Lakhmi C. Jain; N.M. Martin Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications. — CRC Press, CRC Press LLC, 1998.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.06.2015