

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ ВОДООЧИСТКИ С УЧЕТОМ ДОМИНИРУЮЩЕГО ЗАГРЯЗНИТЕЛЯ

В.Н. Штепа,

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

А.П. Левчук,

науч. сотр. НИЛ «Экоинженерия»
Национального университета биоресурсов и природопользования Украины

В статье проанализированы предпосылки создания адаптивных систем автоматизации оборудования очистки промышленных сточных вод, оценены недостатки существующих технологических решений. Разработана концепция динамического доминирующего загрязнителя. Проведено имитационное моделирование с использованием нейронных сетей, которое теоретически подтвердило эффективность концепции. На технологическом оборудовании подтверждена перспективность дальнейших исследований в области автоматизации водоочистки с первичным устранением доминирующего загрязнителя.

Ключевые слова: водоочистка, экология, электротехнологии, управление, сточные воды.

The article analyzes the conditions of the creation adaptive automation systems for industrial wastewater treatment equipment; shortcomings of existing technology solutions evaluated. The concept of the dynamic of the dominant pollutant; using neural networks conducted simulation, which theoretically confirmed the effectiveness of the concept. In the process equipment is confirmed by the fact that further research in the field of the automation water treatment with the primary removal of the dominant pollutant.

Key words: water purification, ecology, electrotechnology, management, wastewater.

Введение

Одним из основных источников загрязнения водных объектов являются производства, сбрасывающие после технологических процессов различные загрязнители [1]. Используемые системы очистки обладают высокими технико-экономическими показателями и способны справиться с разноплановыми задачами [2-4], однако они не обеспечивают адаптивную оптимизацию функционирования оборудования в условиях действия нештатных ситуаций без изменения их структуры или перенастройки параметров работы. Необходимый эффект очистки возможен только после их остановки и дополнительных проектно-монтажных работ, что недопустимо на действующих предприятиях [5].

Для решения такой проблемы технологическая оптимизация структуры системы очистки должна базироваться на необходимости эффективного воздействия на многокомпонентные водные растворы с целью изъятия избыточных концентраций неорганических и обеззараживания опасных органических агентов, что вытекает из разнообразия возможных источников водозабора и вероятных комбинаций загрязнения.

Однако при очистке стоков реальных предприятий возникает ситуация, когда для удаления одних загрязнителей необходимо изначально устранить другие загрязнители [6, 8]. Например, стоки мясопе-

рерабатывающих комбинатов включают как органические (жиры) так и неорганические (фосфор, хлориды) отходы. Как показывает практика [2, 5, 8], в первую очередь необходимо очистить от органических составляющих, а лишь потом устранять неорганические. В противном случае органика будет уменьшать или вообще останавливать процессы очистки от фосфора и хлоридов [3, 8], пассивируя электродную систему (электрохимические методы водоочистки), блокируя коагуляцию (химические методы), забивая мембраны (физические методы). Отсюда возникает необходимость создания алгоритма очистки многокомпонентных сточных вод, причем индивидуально для каждого отдельного предприятия. Состав стоков зависит от качества входной воды, конкретной технологической схемы и других объектно-ориентированных показателей. Ситуация усложняется тем, что состав стоков на производстве может непредвиденно и нестационарно во времени изменяться (залповые сбросы, нештатные ситуации) [3, 5]. Соответственно, возможно изменение приоритета по очередности удаления загрязнителей.

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что для теоретического обоснования построения эффективного оборудования, рационально предложить использование понятия «динамический доминирующий загрязнитель» (ДДЗ) – загрязнитель многокомпонентных сточных вод, который в

данный момент времени при фактическом составе стоков необходимо первоочередно удалить.

Тогда правила и эффективные условия работы систем очистки с учетом понятия доминирующий загрязнитель будут следующие:

- максимальное уменьшение условий создания, проявления, распространения и влияния главного опасного загрязнителя согласно предварительным исследованиям технологии объекта и качества воды;

- поэтапное рециркуляционное устранение ДДЗ воды с учетом предельно-допустимых концентраций (ПДК);

- переход к изъятию второго по важности загрязнителя, если он в комплексе с первым доминирующим не был удален или нейтрализован.

Для разных производств в качестве ДДЗ будут выступать и разные загрязнители:

- производство одежды – красители;
- гальванопроизводства – тяжелые металлы;
- мясокомбинаты – жиры и фосфор и тд.

При этом необходимо учитывать, что в процессе работы системы водоочистки происходят кардинальные изменения состава рабочего водного раствора (например, в гальваническом цехе в первую половину дня осуществлялось цинкование, во вторую – хромирование, как результат – необходимы разные режимные параметры оборудования).

Целью исследований является создание и апробация концепции автоматизации технологического комплекса водоочистки (с учетом ДДЗ), который может встраиваться в линию очистки конкретного предприятия и с учетом его особенностей обеспечивать эффективное извлечение из сточных вод загрязнителей и их соединений, так, чтобы остаточный уровень концентрации последних гарантированно находился в пределах установленных норм.

Основная часть

Базовое технологическое оборудование, на котором будет апробироваться концепция автоматизации с учетом ДДЗ, основано на проточной переработке рабочей среды в жидкой и газообразной фазе в замкнутом байпасном рециркуляционном контуре [2, 3, 5]. Оборудование представляет собой «открытую» систему с возможностью интегрировать другие обоснованные для конкретных объектов методы водоочистки.

Сточные воды производственных объектов (рис. 1) подаются в приемную емкость для усреднения и стабилизации гидродинамических характеристик (на рис. 1 емкость не указана), откуда поступают в электролитическую ванну (диафрагменный вариант исполнения), в анодную и катодную зоны, где происходят анодное выделение реагента и рН-коррекция (последнее, при технологической необходимости). Насос замкнутого байпасного контура обеспечивает подачу водного раствора на батарею электрогидроциклонов, где, согласно значениям гидравлической крупности, происходит разделение потоков на саморегенерирующийся фильтр и обратно на электролитическую ванну. Особенностью электрогидроциклонов является

то, что они имеют электродную систему. Саморегенерирующийся с плавающей засыпкой фильтр задерживает загрязнители, водный раствор заданного качества подается на анаэробный блок. Периодически или в зависимости от накопления загрязнителей фильтр промывается в автоматическом режиме, полученный фильтрат подается на пресс-фильтр (на рис. 1 не указан). Функциональные задачи эжектора и блока интенсификации, который включает ультразвуковой и электромагнитный излучатели, – ускорить кинетику электрохимических реакций.

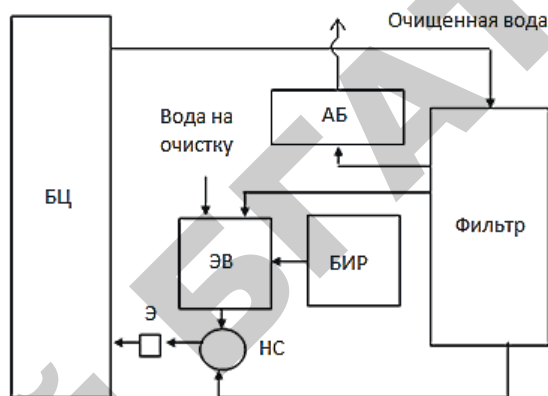


Рис. 1. Структурная схема системы безопасного водопользования (СБВ): БЦ – блок электрогидроциклонов; Э – эжектор; ЭВ – электролитическая ванна; НС – насос; БИР – блок интенсификации реакций; АБ – анаэробный блок

В базовом исполнении в электролитическую ванну загружается металлическая стружка, обеспечивая электролизное выделение реагента. Ключевыми достоинствами электрокоагуляции являются компактность установки, отсутствие реагентного хозяйства, высокий бактерицидный эффект и относительная простота автоматизации. За счет последнего, в результате адаптивного управления источником питания (форма, частота, период сигнала) и насосами, значительно (до 30 %) уменьшается энергозатратность [5].

Исходя из анализа нормативно-правовых требований, опыта промышленного использования СБВ [3,4] и создания автоматизированных систем управления технологическими процессами [3], для синтеза соответствующего интеллектуального блока увязки разных методов водоочистки на базе СБВ согласно ДДЗ, использовались нейронные сети (НС), которые характеризуются эффективной работой в условиях размытости входной информации, нелинейности изменения значений параметров, многофакторности [2, 7], что характерно для процессов водоочистки [8].

На начальном этапе синтеза системы управления, с учетом эксплуатации СБВ на производственных объектах и анализа типовых загрязнителей [2], было систематизировано, что стоки, исходя из сбросов объектов, делятся [2]:

1) на хозяйственно-бытовые (высокое содержание азотсодержащих соединений и фосфатов, значительная степень фекального загрязнения);

2) промышленные сточные воды (высокая концентрация, 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 воды, формирующиеся из атмосферных осадков, проникающих в почву и стекающих в водоемы посредством ливневой канализации с территории промышленных предприятий и населенных пунктов).

Отсюда в качестве типовых ДДЗ сточных вод, относительно которых будут проводиться эксперименты и дальнейший синтез системы управления, выбираются:

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

На основании проведенных экспериментов [1, 3] и полученных выборок синтезирована соответствующая нейросетевая система управления. В качестве математического базиса использовались многослойные персептроны, поскольку алгоритмы их эффективного обучения достаточно исследованы [5], применялся алгоритм обратного распространения ошибки [6, 7]:

Шаг 1. Проинициализировать элементы весовой матрицы (небольшими случайными значениями).

Шаг 2. Подать на входы один из входных векторов, которые сеть должна научиться различать, и вычислить ее выход.

Шаг 3. Если выход правильный, перейти к шагу 4.

Иначе – вычислить разницу между идеальным d и полученным Y значениями выхода (в нашей задаче значение d представляет показатели качества сточной воды после очистки, а Y – нормативные требования к таким показателям):

$$\delta = d - Y. \quad (1)$$

Модифицировать вес в соответствии с формулой:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \delta x_i, \quad (2)$$

где t и $(t+1)$ – номера соответственно текущей и следующей итераций;

η – коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$;

i – номер входа; j – номер нейрона в слое.

Очевидно, что если $d > Y$, то весовые коэффициенты будут увеличены, тем самым, уменьшат ошибку. Иначе они будут уменьшены, Y тоже уменьшится, приближаясь к d .

Шаг 4. Цикл с шага 2, пока сеть не перестанет ошибаться.

На втором шаге, на разных итерациях, поочередно в случайном порядке предъявляются все возможные входные векторы, полученные экспериментальным путем [7].

При проведении экспериментальных исследований и дальнейшем синтезе нейронной сети выходами информационно-измерительного комплекса (ИИК) на НС были данные, согласно перечню контролируемых показателей качества сточных вод перед сбросом в природные водоемы (ТКП 17.06-08-2012).

В результате исследований подтвердилась адекватность синтезированной НС согласно представленному алгоритму (рис. 2) [5].

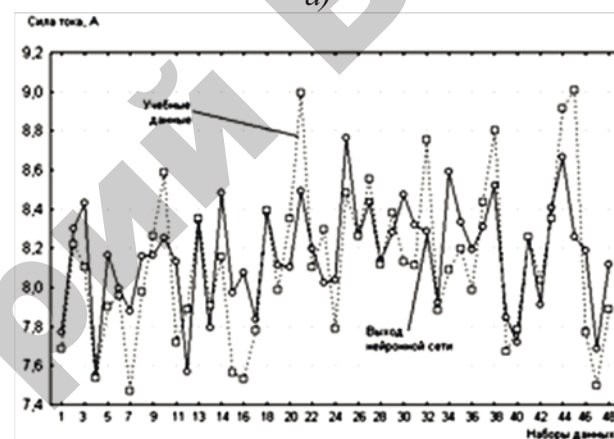
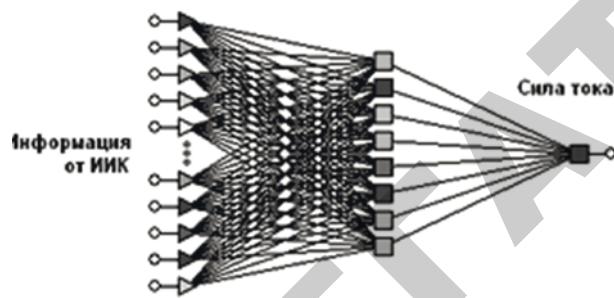


Рис. 2. Оптимальная энергоэффективная НС (типа многослойный персептрон) управления СБВ (результаты обучения НС: учебная выборка – 1,23 %; контрольная выборка – 1,4 %; тестовая выборка – 1,34 %); а) архитектура НС; б) графическое представление обучения НС

Перед аппаратно-программной реализацией системы управления, в пакете прикладного математического программного обеспечения «MatLAB Simulink», который содержит блок нейросетевого моделирования, совершили имитационные исследования функционирования НС управления СБВ с учетом ДДЗ (рис. 3).

В процессе функционирования блок «Signal Generator» (рис. 3) генерировал из возможного диапазона значений показателей качества воды, поступающей на очистку [3,8], входные данные для нейросетевой системы управления (блок «Neural Network Controller» – «Система управления»). Таким образом, имитировалась работа датчиков ИИК в режиме реального времени.

Подсистемы (рис. 3) Subsystems выполняют следующие задачи:

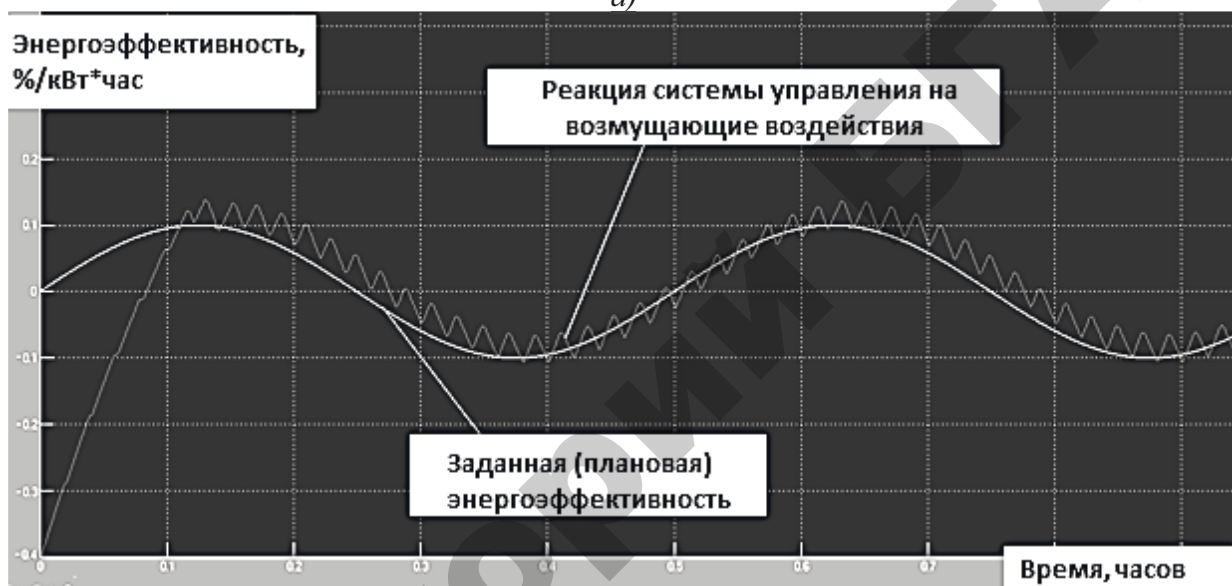
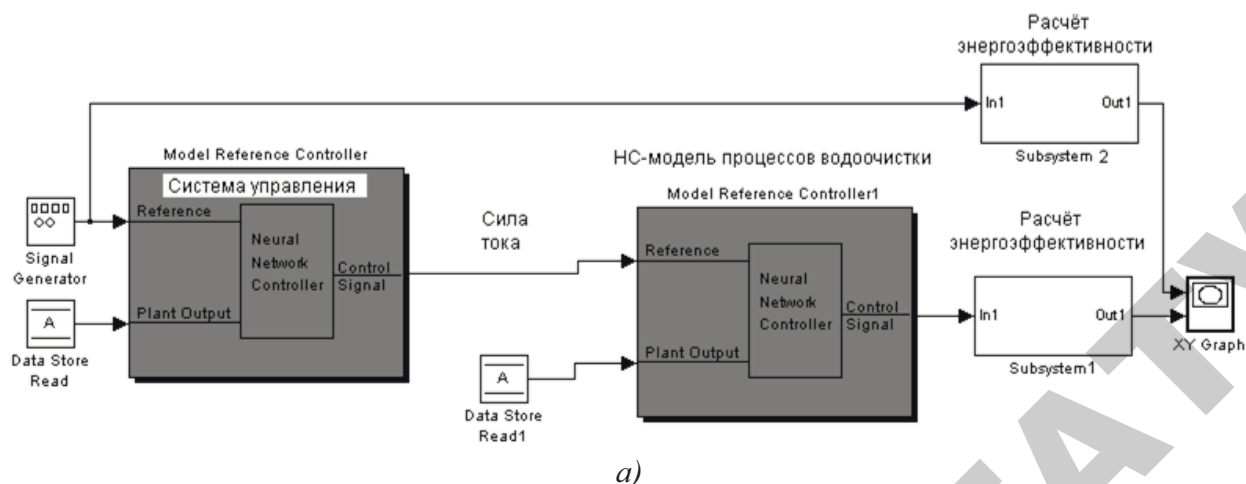


Рис. 3. Имитационное моделирование функционирования системы управления СБВ: а) структура имитационной модели; б) демонстрация качества функционирования нейросетевой системы управления СБВ

– Subsystems 1 – расчет значения коэффициента энергоэффективности после расчета НС-модели процессов водоочистки;

– Subsystems 2 – расчет значения заданного значения коэффициента энергоэффективности.

С учетом производственных испытаний и теоретических наработок [1, 4], для оценки качества функционирования оборудования использовался соответствующий критерий энергоэффективности работы электротехнологического оборудования водоподготовки (задача обеспечить его значение максимально близким нулю):

$$EF_y = \frac{\left[\left(\frac{L1_{вых} - L1_{зад}}{L1_{зад}} \cdot 100\% \right) + \dots + \left(\frac{LN_{вых} - LN_{зад}}{LN_{зад}} \cdot 100\% \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^N \varrho_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \% / кВт, \quad (3)$$

где $L_{вых}$ – фактическое значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки (единицы измерения соответствуют выбранным параметрам качества воды);

$L_{зад}$ – заданное (нормативное) значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки (единицы измерения соответствуют выбранным параметрам качества воды);

Q – время работы оборудования, час;

W – электроэнергия, затраченная на водоочистку, кВт·час;

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

Функциональные характеристики синтезированной энергоэффективной НС в результате имитационного моделирования подтвердили, что она соответствует технологическим требованиям (относительная среднеквадратическая ошибка – 3,82 %) и может быть

использована для создания программного обеспечения системы управления СБВ.

Аппаратная часть системы автоматизации реализована на базе микропроцессора AtMega с использованием периферийного оборудования (рис. 4).

Практическая проверка эффективности функционирования нейросетевой системы автоматизации согласно ДДЗ проводилась на СБВ производительностью 5 м³/сутки (рис. 5).

Алгоритм проведения экспериментальных исследований включал несколько этапов (табл. 1):

1. Создание модельных растворов с разными ДДЗ (согласно характеристикам сточных вод разных производственных объектов).

2. Подача на СБВ одного из видов модельного раствора и оценка эффективности очистки (качество воды определялось согласно методике Лурье).

3. Корректировка функционирования нейросетевой системы управления до получения необходимого качества работы согласно критерию энергоэффективности (3).

Оценка эффективности водоочистки по вторичному загрязнителю (например, для мясокомбинатов такой загрязнитель – взвешенные элементы) продемонстрировала, что достигается его устранение в описанной компоновке СБВ минимум на 30-95 % (в случае взвешенных элементов – на 95 %), что объясняется:

– действием окислительно-восстановительных

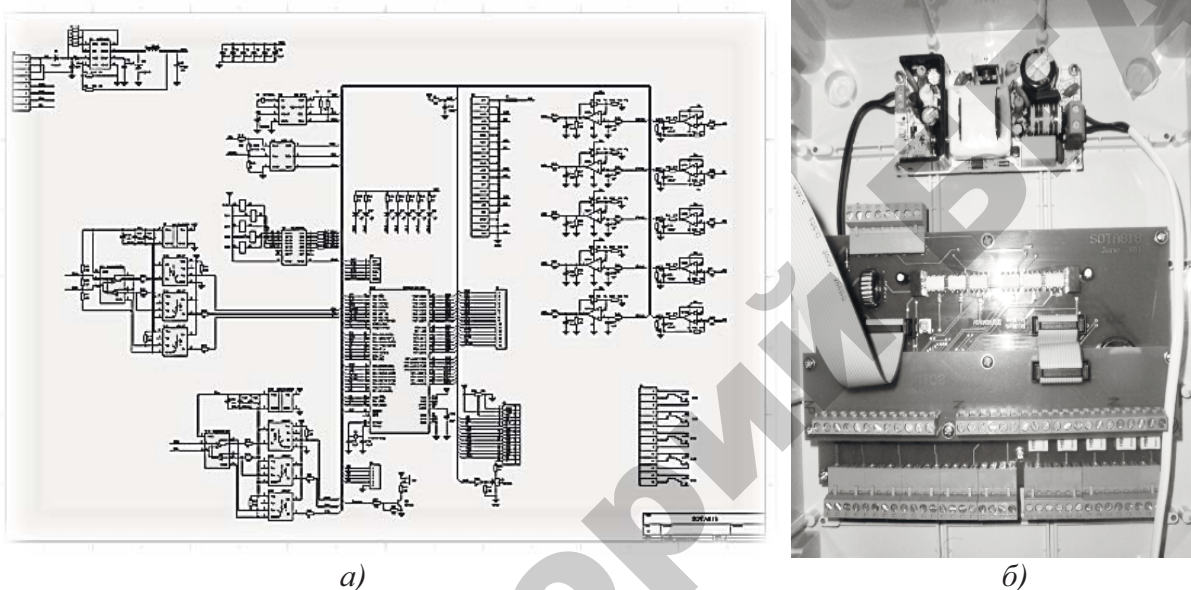


Рис. 4. Микропроцессорная система управления СБВ: а) принципиальная электрическая схема; б) внешний вид

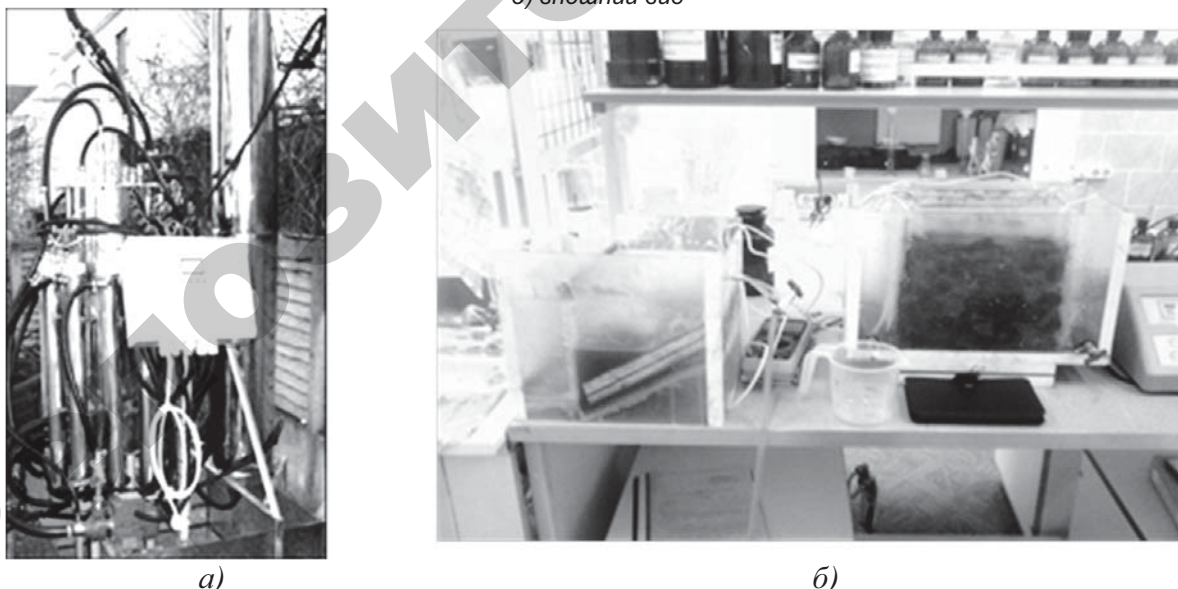


Рис. 5. Практическая проверка использования ДДЗ для построения систем автоматизации: а) внешний вид СБВ производительностью 5 м³/сутки; б) приготовление модельных растворов

Таблица 1. Практическая проверка системы автоматизации оборудования водоочистки согласно ДДЗ

Динамический доминирующий загрязнитель	Производственный объект, для которого типовым является ДДЗ	Критерий энергоэффективности водоочистки по ДДЗ, %/кВт
Нитраты (NO ₃ ⁻) и фосфаты (ортофосфаты PO ₄ ³⁻ и полифосфаты)	Бытовые стоки, агропромышленные предприятия, химическая промышленность	0,01
Жиры – критерий оценки – биологическая потребность кислорода (БПК)	Мясокомбинаты, молочные комбинаты, сыродельные заводы	0,02
Концентрация взвешенных элементов	Характерно большинству производственных объектов	0,015
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ)	Бытовые стоки, автомойки	0,03
pH	Гальванопроизводства	0,02

реакций в электролизном блоке и на вторичные загрязнители;

– электросорбционной фильтрацией, как ДДЗ, так и вторичного загрязнителя;

– при коррекции pH происходит химическое окисление органических элементов, что улучшает качественные показатели воды.

Проведение технологических процессов очистки не с ориентированием на первоочередное устранение ДДЗ, а на другие загрязнители продемонстрировало значительное ухудшение критерия энергоэффективности работы оборудования (критерий прекращения работы – доведение показателей до ПДК) на 30-90 %.

Заключение

Концепция автоматизации систем очистки сточных вод согласно ДДЗ представляет практический интерес при проектировании промышленного оборудования, поскольку улучшает энергоэффективность процессов (уменьшение затрат электроэнергии на доведение показателей до ПДК). Такие выводы базируются на результатах имитационно-практической проверки: относительная среднеквадратическая ошибка функционирования системы управления по сравнению с эталонными наборами данных – 3,82 %, практическая энергоэффективность водоочистки с применением алгоритмов ДДЗ – на 30 % лучше, чем при очистке без выделения доминирующего загрязнителя.

В дальнейшем необходимо провести исследования взаимосвязей между однородными типами за-

грязнителей, с перспективой объединения их в единый блок ДДЗ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штепа, В.М. Обґрунтування алгоритму експериментально-аналітичних досліджень режимів електротехнічної очистки стічних вод агропромислових об'єктів з метою побудови енергоефективних систем управління / В.М. Штепа // *Енергетика і автоматика [Електронний ресурс]*. – 2012. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2014_2_10.pdf. – Дата доступу: 10.09.2015.

2. Гончаров, Ф.И. Влияние формы импульсного тока на энергоэффективность получения коагулянта путем анодного растворения железа в зависимости от начального pH-раствора / Ф.И. Гончаров, А.П. Левчук // *Инновации в сельском хозяйстве*. – М.: ВИЭСХ. – 2014. – № 4 (9). – С. 24-29.

3. Гончаров, Ф.И. Експериментальні дослідження електролізних процесів у водних розчинах із міночими засобами / Ф.И. Гончаров, В.М. Штепа, А.П. Левчук, Р.С. Кот, С.В. Гондарук // *Енергетика і автоматика [Електронний ресурс]*. – 2012. – Режим доступу: [file:///C:/Users/Shtepa/Downloads/eia_2013_4_4%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Shtepa/Downloads/eia_2013_4_4%20(1).pdf). – Дата доступу: 10.09.2015.

4. Гончаров, Ф.И. Методологія підвищення екологічної безпеки об'єктів агропромислової та харчової індустрій / Ф.И. Гончаров, В.М. Штепа // *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2012. – Вип. 16 (30). – Книга 2. – С. 97-104.

5. Швецов, А.Б. Хлорные дезинфектанты и их применение в современной водоподготовке / А.Б. Швецов, А.В. Козырева, С.Г. Седунов, К.А. Тараскин // *Молекулярные технологии*. – Саратов: СГУ, 2009. – № 3. – С. 98-121.

6. Штепа, В.М. Обґрунтування архітектури системи управління комплексними методами очистки стічних вод промислових об'єктів / В.М. Штепа // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. – Харків: ХНУТСГ. – 2014. – Вип. 154. – С. 48-50.

7. 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.: НУБіП. – 2014. – Вип. 194. – Ч. 3. – С. 259-265.

8. Яромский, В.Н. Очистка сточных вод пищевых и перерабатывающих предприятий / В.Н. Яромский. – Минск: БГУ, 2009. – 171 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 14.03.2017