

УДК 621.3.011.712

Н. М. Олиферович, Д. А. Гринюк, И. Г. Сухорукова, И. О. Оробей
Белорусский государственный технологический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВОДОПОДГОТОВКИ

В статье проводится анализ современных информационных технологий в системах водоподготовки. Указываются особенности использования современных технологий обработки информации, которые широко применяются в данных процессах. Наибольшее внимание уделяется использованию систем искусственного интеллекта, особенно на базе нейронных систем. Применение данного подхода обусловлено не только отсутствием решения проблем водоподготовки, но и появлением новых: учет экономических задач при проектировании и работе, уменьшение выбросов в атмосферу и т. д.

Развитие технологий компьютерного моделирования позволило на новом уровне решать актуальные задачи проектирования, построения и эксплуатации. Данное направление в системах водоподготовки характеризуется использованием большого круга готовых программных продуктов. Технологии Building Information Model также находят широкое применение при проектировании и эксплуатации очистных сооружений. Они дают возможность обеспечивать качество, уменьшать влияние работы неквалифицированных кадров; экономить ресурсы; уменьшать время ввода в эксплуатацию; тестировать стрессовые ситуации; координировать работу служб.

Отдельное внимание уделено узкому направлению применения информационных технологий для получения моделей и построения систем управления оптимальной дозировки реагентов. Решение данной проблемы невозможно без информационного обеспечения систем управления. В системах оптимизации дозирования основное внимание акцентируется на использовании пробной коагуляции, времени фильтрации, времени капиллярного всасывания, контроле вязкости, электрокинетических свойств, проводимости. Рассматриваются структура управления по модели для системы дозирования, а также следящая система.

Ключевые слова: системы управления, водоподготовка, оптимальное дозирование.

Для цитирования: Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О. Повышение эффективности функционирования систем управления процессами водоподготовки // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 2 (284). С. 70–79.
DOI: 10.52065/2520-6141-2024-284-10.

N. M. Oliferovich, D. A. Hryniuk, I. G. Suhorukova, I. O. Orobei
Belarusian State Technological University

INCREASING THE EFFICIENCY OF WATER TREATMENT CONTROL SYSTEMS

The article analyzes modern information technologies in water treatment systems. The features of the use of modern information processing technologies, which are widely used in these processes, are indicated. The greatest attention is paid to the use of artificial intelligence systems, especially those based on neural systems. The use of this approach is due not only to the lack of solutions to water treatment problems, but also to the emergence of new problems: taking into account economic objectives in design and operation, reducing emissions into the atmosphere, etc.

The development of computer modeling technologies has made it possible to solve current problems of design, construction and operation at a new level. This direction in water treatment systems is characterized by the use of a wide range of ready-made software products. Building Information Model technologies are also widely used in the design and operation of wastewater treatment facilities. They make it possible to ensure quality and reduce the impact of the work of unqualified personnel; save resources; reduce commissioning time; test stressful situations; coordinate the work of services.

Special attention is paid to the narrow area of application of information technologies to obtain models and build control systems for the optimal dosage of reagents. Solving this problem is impossible without information support for control systems. Dosing optimization systems focus on the use of test coagulation, filtration time, capillary suction time, control of viscosity, electrokinetic properties, and conductivity. Model-based control structures for the dosing system, as well as a tracking system, are proposed.

Keywords: control systems, water treatment, optimal dosing.

For citation: Oliferovich N. M., Hryniuk D. A., Suhorukova I. G., Orobei I. O. Increasing the efficiency of water treatment control systems. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2024, no. 2 (284), pp. 70–79 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-6141-2024-284-10.

Введение. Объекты автоматизации технологических процессов не являются универсальными с точки зрения применения последних достижений в развитии теории управления, технических средств, программирования. Хотя на всем пути использования систем регулирования шла постоянная работа в области типовых универсальных средств измерения, управляющих и исполняющих систем. Однако особенности функционирования некоторых отраслей и предприятий не позволяют решить этот вопрос окончательно. Так, традиционно химическая отрасль характеризуется высокими требованиями к надежности и взрывобезопасности, что зачастую предполагает применение особых управляющих систем, датчиков и систем для функционирования, систем противоаварийной защиты. Пищевая и фармацевтическая отрасли характеризуются особыми требованиями к гигиене, что влияет также на построение систем автоматизации.

Процессы водоподготовки имеют свои специфические особенности, которые сильно влияют на автоматизацию данных техпроцессов. В первую очередь следует отметить стохастические свойства обрабатываемых сред. При этом эти свойства могут изменяться в широком диапазоне, что приводит к тому, что часто меняется технология обработки.

Другим важным аспектом является применение нетипичных систем измерения состояния среды и технологических аппаратов. Данное направление характеризуется использованием измерительных приборов для параметров, которые применяются исключительно в процессах водоподготовки. Но самая достоверная информация по принятию решений для управления технологическими процессами и аппаратами часто исходит из ручного или полуавтоматического лабораторного анализа, периодичность которого очень низкая.

Вышеуказанные проблемы привели к тому, что аппараты и установки водоподготовки часто характеризуются большой инерционностью, что затрудняет эффективное применение автоматизации. То есть фактически автоматизация играет, в большей степени, вспомогательную роль. Консервативность подходов к процессам водоподготовки мешает применению тех решений по автоматизации, которые уже давно используются в других отраслях промышленности. Но применение современных технологий автоматизации может быть полезным для повышения эффективности функционирования многих процессов

водоподготовки. Рассмотрим основные направления внедрения автоматизации.

Использование искусственного интеллекта (ИИ). Технология искусственного интеллекта уже стала рабочим инструментом по поиску оптимальных решений для многих задач. Комплексный анализ измерительной информации в процессах водоподготовки начался давно, ввиду особенностей технологии. На передовых станциях водоочистки давно производится постоянный поиск связи качества очистки с текущими измерениями расхода, pH, редокс-потенциала, температуры, мутности, проводимости и т. д. Интеллектуальная оптимизация результатов измерений для очистных сооружений питьевой и сточной воды может позволить усовершенствовать работу операторов очистных сооружений при принятии решений в режиме реального времени, а, возможно, где-то и перевести в автоматический режим. Операторы могут получать данные, которые помогут им точно настроить работу станции для удовлетворения критериев качества воды с меньшими затратами. Внедрение технологии искусственного интеллекта, создание цифровых копий, решение которых принимали опытные операторы, может позволить сэкономить на процессах очистных сооружений и исключить ошибки. Возможности самообучающихся систем ИИ анализировать тенденции на основе истории трендов и давать эффективные прогнозы гораздо выше, чем у операторов. В целом технология искусственного интеллекта может улучшить стабильность качества воды и эффективность водоочистных сооружений, т. е. обеспечить соответствие стандартам качества воды в течение большей части срока службы. Это дает предприятиям водоснабжения возможность повысить уровень удовлетворенности потребителей, обеспечить необходимые экономические требования и уменьшить вероятность экологических сбоев.

Однако пока использование искусственного интеллекта в очистке воды все еще находится в зачаточном состоянии. Кроме консервативности самой отрасли, важной проблемой является получение модели, способной воспроизвести процессы, которые происходят в очистных сооружениях. Без решения этой проблемы, которая требует учета сведений из теории физико-химических процессов, прямое управление на основе статистики, которую обработал ИИ, может привести к проскокам, когда появляются входные данные, которые значительно отличаются от прошлых.

Одновременно актуальной проблемой является достаточное информативное обеспечение системы управления, а также достоверность этих данных. В целом системы очистки характеризуются большим набором данных, часто специфических. Некоторые методы ИИ [1, 2], искусственных нейронных сетей [3, 4], генетические алгоритмы могут позволить обнаружить зависимости, которые скрывались в больших объемах информации.

Важным аспектом является оптимизация водоочистных сооружений. Часто контроль доступного количества физических, химических и биологических параметров недостаточен для точного принятия решений [5]. Очень полезным может быть проектирование многостадийной обработки воды с целью получения промежуточных параметров для более точного последующего прогнозирования.

К очистным сооружениям в некоторых странах вводятся требования к энергоэффективности [6]. Математические модели в области очистки сточных вод, а также текущий анализ существующих систем, может существенно помочь инженерам в работе над оптимизацией очистных сооружений. Традиционная очистка сточных вод создает огромное количество первичного и вторичного осадков, которые вместе называются осадком сточных вод. Не вызывает сомнения, что состояние этих осадков, во многом, определяется обработкой на предыдущих стадиях. Системная интеграция процессов очистки и обработки осадков может существенно способствовать формированию более эффективной обработки [7]. Это имеет хорошую экономическую основу, так как затраты с осадками могут составлять до 60% от общих эксплуатационных затрат на очистные сооружения [8]. Существуют разработки эффективного взаимодействия экспериментальных данных и моделирования на реальных объектах [9].

Одно из направлений оптимизации работы систем управления – использование интегральных индексов, что является следствием сложных нелинейных свойств очистных сооружений как объектов управления [10]. В деле создания эффективных моделей сосредоточено много усилий [11, 12].

Еще один аспект, который пытаются учесть при управлении и проектировании очистных сооружений, – снижение выбросов парниковых газов [13, 14].

Одной из частных проблем при очистке сточных вод является оптимизация дозирования химических реагентов. Особенно это касается процесса коагуляции и флокуляции. Особенностью дозирования коагулянтов является то, что текущий недостаток коагулянта способствует

ухудшению протекания последующих стадий, таких как седиментация, фильтрация и т. д. При передозировании происходит перерасход химического реактива, а также сам коагулят может выступать в качестве загрязнения. Возможности использования нейронных сетей широко обсуждаются в публикациях [15–17].

ВІМ-технологии. Применение цифровых технологий при проектировании стало неотъемлемой стороной при проведении проектирования и сопровождения технологических процессов. Водоподготовка не является исключением. Использование Building Information Model (BIM) только на этапе проектирования не раскрывает весь потенциал преимуществ этой технологии. BIM показывает свой потенциал на этапе строительства, как в области раннего планирования строительно-монтажных работ, составления графика и увязки их с графиками поставок оборудования, так и в плане материально-технических ресурсов, необходимых для нормального, ритмичного строительного процесса. Цифровизация, связь с единой моделью здания или сооружения, контроль и мониторинг строительных процессов и расходов материально-технического обеспечения – важнейшая задача обеспечения быстрого, экономичного и малозатратного строительства любых объектов, в том числе объектов промышленного производства. BIM на текущем этапе развития уже используется на всех этапах существования зданий, предприятий, технологий. Когда-то имевшая место имитационная модель предприятия может быть использована не только для планирования и оптимизации, но и для решения дальнейших вопросов, касающихся жизненного цикла предприятия. Модель можно использовать, например, для планирования концепций расширения этапов, для виртуального ввода в эксплуатацию систем автоматизации, для непрерывной оптимизации производительности и затрат на уборку, в качестве обучающего моделирования или в качестве компонента системы управления на основе модели.

Комплексное планирование систем автоматизации в сочетании со спецификациями механического оборудования и технологическими процессами требует использования BIM систем [18]. Растущее использование инструментов моделирования является компонентом общего цифрового планирования предприятий. Цифровые документы планирования являются современными (чертежи, документы) и становятся все более комплексными. Разумным сценарием применения является виртуальный ввод в эксплуатацию технологии автоматизации [19–22]. Преимущества такого подхода весьма разнообразны:

- рациональное использование материальных ресурсов;

– сокращение сроков ввода в эксплуатацию и простоев производственных процессов.

Так же существенно повышает эффективность использование постоянного уточнения моделей на этапе активного строительства.

Применительно к очистным сооружениям можно выделить, например, следующие причины:

– обеспечение качества (комплексное тестирование), аспект нехватки квалифицированных рабочих;

– испытание в сокращенное время, при этом реальный процесс характеризуется большими постоянными времени;

– тестирование комплексной автоматизации;

– тестирование стрессовых ситуаций (например, высокая нагрузка в дождливую погоду)

– проверка уровня ущерба;

– систематизация концепции автоматизации между оператором, проектировщиком процессов и инженером по автоматизации.

Комплексная автоматизация биологических процессов. Несмотря на ограничения биологических процессов на очистных сооружениях, существует интересный потенциал для их улучшения с помощью современных систем управления. Этот потенциал может быть использован для улучшения качества очистки сточных вод и повышения энергоэффективности.

Однако оптимальное использование этого потенциала является сложной междисциплинарной инженерной задачей. Если проследить за судьбой химически окисляемых веществ (ХПК) на очистных сооружениях (ОСВ), то можно увидеть, что значительная их часть окисляется (кислородом или нитратами). Часть, окисляемая кислородом, обеспечивает основную потребность в энергии очистных сооружений. Напротив, та часть, которая в конечном итоге присутствует в виде биогаза, может использоваться в качестве источника энергии (тепловой и электрической). Таким образом, доступны следующие возможности как для оптимизации процесса, так и для планирования концепций автоматизации, направленных на минимизацию энергопотребления:

– минимизация потребности в энергии для обеспечения необходимого кислорода;

– максимизация эффективности производства сжатого воздуха;

– минимизация избытка кислорода.

Кроме того, следует увеличить количество ХПК, доступной в виде биогаза, и в то же время уменьшить количество, подлежащее окислению. Оптимальное использование предварительной обработки и контроль возраста осадка.

Кроме того, доля аэробно-окисленного ХПК должна быть уменьшена в пользу бескислородного ХПК, т. е. максимальная денитрификация.

Помимо энергии, необходимой для подачи кислорода, требуется энергия для транспортировки сточных вод и активного ила, а также для смешивания и предотвращения осаждения ила. При эксплуатации насосов следует уделять внимание конструкции насосной системы и режиму работы с оптимальным КПД в каждом конкретном случае.

Почти все эти меры могут поддерживаться во время работы с помощью соответствующих функций управления.

Автоматизация с использованием моделирования. Как отмечалось выше, для обеспечения эффективного управления требуется учесть динамические аспекты аппаратов водоподготовки. Мощным инструментом для решения таких задач является использование моделирования. Чтобы иметь возможность анализировать взаимодействие между процессами, оборудованием и автоматизацией, необходимо проводить моделирование, которое можно использовать для описания взаимодействия всех компонентов [20].

Динамика процессов водоподготовки очень специфична. Для адекватности требуется учитывать нелинейные свойства этих процессов. В данном направлении можно встретить ряд готовых моделей. Так, для описания процессов биологического разложения доступны надежные модели активного ила, проверенные в течение многих лет. Некоторые наиболее распространенные из них: BLOWIN [23], AQUASIM [24], GPS-X [25], SIMBA [26], SUMO [27], WEST [28] и др.

Традиционные подходы к моделированию продолжают использоваться для задач водоподготовки [29, 30]. Однако следует отметить, что поиск параметров моделей часто происходит с помощью нечетких множеств, нейронных сетей или генетических алгоритмов.

Измерительные системы. Развитие измерительных систем для автоматизации водоподготовки не столь стремительно, как это было в прошлом веке. Используются все те же измерительные приборы, которые призваны оптимизировать реагентную обработку. Развитие технологии приборостроения позволило получить более удобные интерфейсы работы с измерительными приборами. Так, для оптимальной обработки осадков рекомендуются анализировать время фильтрации (TTF) [31], удельное сопротивление фильтрации (SRF) [9, 32, 33], время капиллярного всасывания (CST) [34, 35], скорость сдвига и напряжение [36], вязкость [33, 37] и электрокинетические свойства [38–41]. Некоторые исследователи идут дальше и создают программные сенсоры для управления дозировкой [42].

Насыщенность физическими приборами контроля может быть различна. Следует добавить,

что существуют и другие решения, например использование проводимости или пробной коагуляции. Пробная коагуляция (Jar testing) является вариантом фактического моделирования, когда малые пробы текущей среды подвергаются обработке разными дозами реагентов и по результатам наблюдений принимаются решения о текущей дозе. Несмотря на то, что этот подход широко используется в системах водоочистки, он может давать хорошие результаты только при медленном изменении качества обрабатываемой воды. Кроме этого, существует проблема, что условия протекания процессов в пробирке могут несколько отличаться от физико-химических процессов в ОСВ.

При оптимизации непрерывного управления дозировки коагулянтов преобладают приборы, представленные в таблице [43].

Датчики непрерывного контроля процессов коагуляции и фильтрации

Тип датчика	Контроль на входе	Коагуляция	Освещение	Фильтрация
pH	1	1	2	2
Мутность	1	3	1	1
Счетчик частиц	2	3	2	1
Поглощение ультрафиолета	1	1	2	2
SCD	2	1	3	3
Перепад давления	–	–	3	1

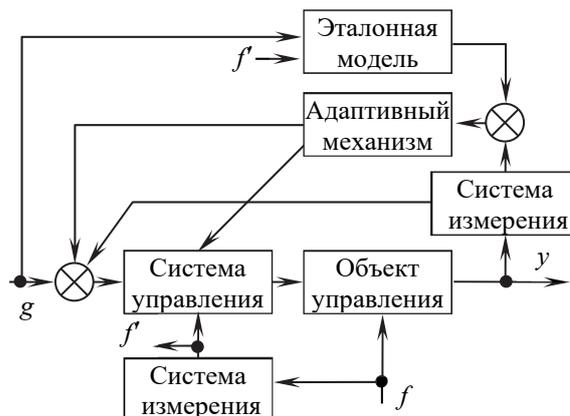
Следует добавить, что многие приборы контроля качества, которые применяются в системах управления, требуют качественного обслуживания для обеспечения достоверности получаемых измерений.

Оптимизация дозировки реагентов. При построении систем управления можно встретить два подхода [44]. С одной стороны, используется анализ физических принципов работы и выбор в качестве основы вышеупомянутых физических параметров CST, SCD, проводимость, размер частиц и т. д.

С другой стороны, можно встретить и системы по возмущению, что очень логично в условиях большой инерционности ОСВ. Иногда их дополняют системами с обратной связью, например по электрокинетическим характеристикам или проводимости. Существуют варианты по применению управления по эталонной модели. Структура адаптивного управления может иметь вид, приведенный на рисунке.

Однако следует отметить, что основной проблемой при построении систем управления является определение нужной дозировки реагентов. Поэтому структуру на рисунке следует дополнять элементами экстремального управления.

Но эффективность такого решения упирается в высокую инерционность процессов водоподготовки.



Система управления с эталонной моделью:
 g – вектор управления; y – вектор выходных параметров; f и f' – вектор возмущения и результат их измерения

Другим решением является использование статистики и различных подходов к анализу данных: модели искусственных нейронных сетей, анализ многомерной регрессии, модели нечеткой логики и поверхности отклика. Однако практическое применение модели упирается в обработку больших объемов данных, а также стохастический характер процессов водоподготовки, основанных на воде и факторах, связанных с технологическими процессами, для анализа данных.

Интересным решением может быть создание условий постоянного проведения «пробной» коагуляции (флокуляции). К примеру, устанавливаются параллельно три технологические цепочки обработки. Центральная цепочка может иметь максимальную производительность, а две крайние быть меньшего объема. Дозирование в крайние цепочки можно осуществлять меньше и больше в сравнении с центральной, но так, чтобы было достаточно для идентификации отличий между результатами обработки с помощью непрерывных систем измерения, например проводимости или мутности. Дозирование для обработки осадков можно осуществлять по тому же принципу, только для контроля можно использовать другие параметры: влажность осадка, CST или TTF.

Заключение. Анализ публикаций показывает, что существует большое количество решений подходов к применению информационных потоков и построению систем управления в процессах водоподготовки. В последнее время наибольшее внимание уделяется интеграции технологий нейронных сетей, нечетким множествам и гибридным алгоритмам. Их пытаются

применять во многих аспектах процессов водоподготовки. Но, как отмечают некоторые авторы, эти технологии могут помочь при быстрой оптимизации, обработке информации, но пока с их помощью нелегко учесть структурные и физические сложности процессов водоподготовки для успешного решения проблем. Возможно, нейронные сети могут оказаться полезными при анализе публикаций по этой теме, особенно

если будут иметь доступ к закрытым базам для дальнейшего поиска решений по оптимальному проектированию, технологическим аспектам, оптимизации дозировки и т. д. Видится хорошим решением для управления обработкой реагентами совместное проектирование технологий для достижения целей водоподготовки и эффективности использования возможностей теории управления.

Список литературы

1. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, American / U. M. Fayyad [et al.]. Cambridge, MA, USA: AAAI Press, 1996. 611 p.
2. Thuraisingham B. Data Mining: Technologies, Techniques, Tools, and Trends. Boca Raton, FL: CRC Press, 1998. 288 p.
3. Chau K.W. A review on integration of artificial intelligence into water quality modeling // Marine Pollution Bulletin. 2006. Vol. 52. P. 726–733.
4. Koroteev D., Tekic Z. Artificial intelligence in oil and gas upstream: Trends, challenges, and scenarios for the future // Energy AI, 2021. Vol. 3. P. 100041. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100041.
5. Lee D. S., Park J. M. Neural network modeling for on-line estimation of nutrient dynamics in a sequentially-operated batch reactor // Journal of Biotechnology. 1999. Vol. 75. P. 229–239.
6. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy / D. Panepinto [et al.] // Applied Energy. 2016. Vol. 161. P. 404–411.
7. Energy feasibility study of sludge pretreatments. A review / R. Cano [et al.] // Applied Energy. 2015. Vol. 149. P. 176–185. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.132.
8. Minimization of sludge production by a side-stream reactor under anoxic conditions in a pilot plant / M. Coma [et al.] // Bioresource Technology. 2013. Vol. 129. P. 229–235.
9. Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation / S. Borzooei [et al.] // The Science of the Total Environment. 2019. Vol. 691. P. 1182–1189.
10. A performance indicators system for urban wastewater treatment plants / S. Quadros [et al.] // Water Science and Technology. 2010, Vol. 62. P. 2398–2407. DOI: 10.2166/wst.2010.526.
11. Fang F., Ni B. J., Yu H. Q. Estimating the kinetic parameters of activated sludge storage using weighted non-linear least-squares and accelerating genetic algorithm // Water Research. 2009. Vol. 43. P. 2595–2604. DOI: 10.1016/j.watres.2009.01.002.
12. Wu Y., Liu S. Automating calibration, sensitivity and uncertainty analysis of complex models using the R package Flexible Modeling Environment (FME): SWAT as an example // Environmental Modelling and Software. 2012. Vol. 31. P. 99–109. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.11.013.
13. Kim D., Bowen J. D., Ozelkan E. C. Optimization of wastewater treatment plant operation for greenhouse gas mitigation // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 163. P. 39–48.
14. Lal B., Nallakukkala S. Gas Hydrate in Water Treatment: Technological, Economic, and Industrial Aspects. NJ, USA, Hoboken: John Wiley & Sons; 2022. 325 p.
15. Optimal experimental design and artificial neural networks applied to the photochemically enhanced Fenton reaction / S. Göb [et al.] // Water Science and Technology. 2001. Vol. 44. P. 339–345.
16. Lek S., Guisresse M., Giraudel J. L. Predicting stream nitrogen concentration from watershed features using neural networks // Water Research. 1999. Vol. 33. P. 3469–3478.
17. Maier H. R., Morgan N., Chow C. W. K. Use of artificial neural networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters // Environmental Modelling and Software. 2004. Vol. 19. P. 485–494. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00163-4.
18. Alex J. Simulationsplattform zum integrierten Prozess- und Automatisierungsentwurf von Abwassersystemen // Automatisierungstechnik. 2015. Vol. 63 (7). P. 553–563.
19. Drath R., Weber P., Mauser N. An evolutionary approach for the industrial introduction of virtual commissioning // IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, Hamburg, Germany, 2008. P. 5–8. DOI: 10.1109/ETFA.2008.4638359.
20. Virtual commissioning of manufacturing systems a review and new approaches for simplification / P. Hoffmann [et al.] // 24th European Conference on Modelling and Simulation, Kuala Lumpur, 2010. P. 175–181. DOI: 10.7148/2010-0175-0181.
21. The use of process simulation models in Virtual commissioning of process automation software in drinking water treatment plants / G. I. M. Worm [et al.] // Water Science & Technology: Water Supply. 2013. Vol. 13. P. 1331. DOI: 10.2166/ws.2013.131.

22. Wolf G., Pfeffer A. Integrierte virtuelle Inbetriebnahme // *Atp Magazin*. 2015. Vol. 57 (01-02). P. 68–79. DOI: 10.2166/ws.2013.131.
23. Kim M., Nakhla G., Keleman M. Modeling the impact of food wastes on wastewater treatment plants // *J. of Environmental Management*. 2019. Vol. 237. P. 344–358.
24. Comparison on biological nutrient removal and microbial community between full-scale an-aerobic/anoxic/aerobic process and its upgrading processes / K. Wang [et al.] // *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 374. P. 128757. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128757.
25. How inoculation affects the development and the performances of microalgal-bacterial consortia treating real municipal wastewater / S. Petrini [et al.] // *J. of Environmental Management*. 2020. Vol. 263. P. 110427. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110427.
26. Inoculum mixture optimization as strategy for to improve the anaerobic digestion of food waste for the methane production / B. Parra [et al.] // *J. of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6. P. 1529–1535. DOI: 10.1016/j.jece.2018.01.048.
27. Comprehensive evaluation of starter culture impact on the bioreactor performance and microbial kinetics / E. Demirkaya [et al.] // *Biochemical Engineering J.* 2021. Vol. 177. P. 108233.
28. An inoculum for the aerobic treatment of wastewaters with high concentrations of fats and oils / K. Tano-Debrah // *Bioresource Technology*. 1999. Vol. 69 (2). P. 133–139.
29. Magdi S. M. Coordinated Control of Waste Water Treatment Process // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. 2010. Vol. 90. P. 515–528. DOI: 10.1007/978-94-007-1192-1_41.
30. Ani V. A. Process Modelling and Simulation of a Simple Water Treatment Plant // *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2016. Vol. 4 (4). P. 84–94.
31. Dentel S. K., Abu-Orf M. M., Walker C. A., Optimization of slurry flocculation and dewatering based on electrokinetic and rheological phenomena // *Chem. Eng. J.* 2000. Vol. 80. P. 65–72.
32. Zhao Y. Q. Correlation between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering // *Chem. Eng. J.* 2003. Vol. 92. P. 227–235.
33. Zhao Y. Q., Papavasiliopoulos E. N., Bache D. H. Clogging of filter medium by excess polymer during alum sludge filtration // *Filtration & Separation*. 1998. Vol. 35 (10). P. 947–950.
34. Wu C. C., Huang C., Lee D. J. Effects of polymer dosage on alum sludge dewatering characteristics and physical properties // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*. 1997. Vol. 122. P. 89–94. DOI: 10.1016/S0927-7757(97)00006-X.
35. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates // *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, Lithuania, 2015. P. 1–4.
36. Bache D.H., Papavasiliopoulos E. N. On the role of aluminium hydroxide the conditioning of an alum sludge // *Water Sci. Technol.* 1998. Vol. 38 (2). P. 33–40.
37. Bache D. H., Papavasiliopoulos E. N. Viscous behavior of sludge centrate in response to polymer conditioning // *Water Res.* 2000. Vol. 34 (1). P. 354–358.
38. Automatic control of polymer dosage using streaming potential for waterworks sludge conditioning / S. Byun [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 2007. Vol. 57 (2). P. 230–236.
39. Pyrite activated peroxymonosulfate combined with as a physical-chemical conditioner modified biochar to improve sludge dewaterability: analysis of sludge floc structure and de-watering mechanism / W. Gao // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29 (49). P. 74725–74741. DOI: 10.1007/s11356-022-21074-4.
40. Electrokinetic Converter using AN Unsteady Shift: A Quantitative Model / D. Hryniuk [et al.] // *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, Lithuania, 2019. P. 1–4.
41. Преобразователи электрокинетического потенциала гидродисперсных систем / Н. М. Богослав [и др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 106–110.
42. Hernandez H. L., Lann M. V. Development of a neural sensor for on-line prediction of coagulant dosage in a potable water treatment plant in the way of its diagnosis // *In Advances in Artificial Intelligence-IBERAMIA-SBIA*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. P. 249–257.
43. Teefy S., Farmerie J., Pyles E. Jar test // *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes*. Third ed. Denver, CO: American Water Works Association, 2011. P. 17–58.
44. Sheng D. P. W., Bilad M. R., Shamsuddin N. Assessment and optimization of coagulation process in water treatment plant: A Review // *ASEAN J. of Science and Engineering*. 2023. Vol. 3 (1). P. 81–100.

References

1. Fayyad U. M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P., Uthurusamy R. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, American. Cambridge, MA, USA, AAAI Press Publ., 1996. 611 p.

2. Thuraisingham B. Data Mining: Technologies, Techniques, Tools, and Trends. Boca Raton, FL, CRC Press Publ., 1998. 288 p.
3. Chau K. W. A review on integration of artificial intelligence into water quality modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, vol. 52, pp. 726–733.
4. Koroteev D., Tekic Z. Artificial intelligence in oil and gas upstream: Trends, challenges, and scenarios for the future. *Energy AI*, 2021, vol. 3, pp. 100041. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100041.
5. Lee D. S., Park J. M. Neural network modeling for on-line estimation of nutrient dynamics in a sequentially-operated batch reactor. *Journal of Biotechnology*, 1999, vol. 75, pp. 229–239.
6. Panepinto D., Fiore S., Zappone M., Genon G., Meucci, L. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy*, 2016, vol. 161, pp. 404–411.
7. Cano R., Pérez-Elvira S. I., Fdz-Polanco F. Energy feasibility study of sludge pretreatments. A review. *Applied Energy*, 2015, vol. 149, pp. 176–185. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.132.
8. Coma M., Rovira S., Canals J., Colprim, J. Minimization of sludge production by a side-stream reactor under anoxic conditions in a pilot plant. *Bioresource Technology*, 2013, vol. 129, pp. 229–235.
9. Borzooei S., Campo G., Cerutti A., Meucci L., Panepinto D., Ravina M., Riggio V., Ruffino B., Scibilia G., Zanetti M. Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation. *The Science of the Total Environment*, 2019, vol. 691, pp. 1182–1189.
10. Quadros S., Rosa M. J., Alegre H., Silva C. A performance indicators system for urban wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 2010, vol. 62, pp. 2398–2407. DOI: 10.2166/wst.2010.526.
11. Fang F., Ni B. J., Yu H. Q. Estimating the kinetic parameters of activated sludge storage using weighted non-linear least-squares and accelerating genetic algorithm. *Water Research*, 2009, vol. 43, pp. 2595–2604. DOI: 10.1016/j.watres.2009.01.002.
12. Wu Y., Liu S. Automating calibration, sensitivity and uncertainty analysis of complex models using the R package Flexible Modeling Environment (FME): SWAT as an example. *Environmental Modelling and Software*, 2012, vol. 31, pp. 99–109. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.11.013.
13. Kim D., Bowen J. D., Ozelkan E. C. Optimization of wastewater treatment plant operation for greenhouse gas mitigation. *J. of Environmental Management*, 2015, vol. 163, pp. 39–48.
14. Lal B., Nallakukkala S. Gas Hydrate in Water Treatment: Technological, Economic, and Industrial Aspects. NJ, USA, Hoboken, John Wiley & Sons Publ., 2022. 325 p.
15. Göb S., Oliveros E., Bossmann S. H., Braun A. M., Nascimento C. A. O., Guardani R. Optimal experimental design and artificial neural networks applied to the photochemically enhanced Fenton reaction. *Water Science and Technology*, 2001, vol. 44, pp. 339–345.
16. Lek S., Guisresse M., Giraudel J. L. Predicting stream nitrogen concentration from watershed features using neural networks. *Water Research*, 1999, vol. 33, pp. 3469–3478.
17. Maier H. R., Morgan N., Chow C. W. K. Use of artificial neural networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters. *Environmental Modelling and Software*, 2004, vol. 19, pp. 485–494. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00163-4.
18. Alex J. Simulationsplattform zum integrierten Prozess- und Automatisierungsentwurf von Abwassertechniken. *Automatisierungstechnik*, 2015, vol. 63 (7), pp. 553–563.
19. Drath R., Weber P., Mauser N. An evolutionary approach for the industrial introduction of virtual commissioning. *IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation Publ.* Hamburg, Germany, 2008, pp. 5–8. DOI: 10.1109/ETFA.2008.4638359.
20. Hoffmann P., Schumann R., Maksoud T. M. A., Premier G. C. Virtual commissioning of manufacturing systems a review and new approaches for simplification. *24th European Conference on Modelling and Simulation*. Kuala Lumpur, 2010, pp. 175–181. DOI: 10.7148/2010-0175-0181.
21. Worm G. I. M., Kelderman J. P., Lapikas, T., van der Helm A. W. C., van Schagen K. M., Rietveld L. C. The use of process simulation models in Virtual commissioning of process automation software in drinking water treatment plants. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2013, vol. 13, p. 1331. 10.2166/ws.2013.131.
22. Wolf G., Pfeffer, A. Integrierte virtuelle Inbetriebnahme. *Atp Magazin*, 2015, vol. 57 (01-02), pp. 68–79. DOI: 10.2166/ws.2013.131.
23. Kim M., Nakhla G., Keleman M. Modeling the impact of food wastes on wastewater treatment plants. *J. of Environmental Management*, 2019, vol. 237, pp. 344–358.
24. Wang K., Zhou C., Zhou H., Jiang M., Chen G., Wang C., Zhang Z., Zhao X., Jiang L.-M., Zhou Z. Comparison on biological nutrient removal and microbial community between full-scale an-aerobic/anoxic/aerobic process and its upgrading processes. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 374, pp. 128757. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128757.
25. Petrini S., Foladori P., Beghini F., Armanini F., Segata N., Andreottola G. How inoculation affects the development and the performances of microalgal-bacterial consortia treating real municipal wastewater. *J. of Environmental Management*, 2020, vol. 263, pp. 110427. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110427.

26. Parra-Orobio B. A., Angulo-Mosquera L. S., Loaiza-Gualtero J. S., Torres-López W., Torres-Lozada P. Inoculum mixture optimization as strategy for to improve the anaerobic digestion of food waste for the methane production. *J. of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 1529–1535. DOI: 10.1016/j.jece.2018.01.048.
27. Demirkaya E., Ciftcioglu B., Ozyildiz G., Zengin G. E., Pala-Ozkok I., Cokgor E., Tas D. O. Comprehensive evaluation of starter culture impact on the bioreactor performance and microbial kinetics. *Biochemical Engineering J.*, 2021, vol. 177, pp. 108233.
28. Tano-Debrah K., Fukuyama S., Otonari N., Taniguchi F., Ogura M. An inoculum for the aerobic treatment of wastewaters with high concentrations of fats and oils. *Bioresource Technology*, 1999, vol. 69 (2), pp. 133–139.
29. Magdi S. M. Coordinated Control of Waste Water Treatment Process. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2010, vol. 90, pp. 515–528. DOI: 10.1007/978-94-007-1192-1_41.
30. Ani V. A. Process Modelling and Simulation of a Simple Water Treatment Plant. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 2016, vol. 4 (4), pp. 84–94.
31. Dentel S. K., Abu-Orf M. M., Walker C. A., Optimization of slurry flocculation and dewatering based on electrokinetic and rheological phenomena. *Chem. Eng. J.*, 2000, vol. 80, pp. 65–72.
32. Zhao Y. Q. Correlation between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering. *Chem. Eng. J.*, 2003, vol. 92, pp. 227–235.
33. Zhao Y. Q., Papavasiliopoulos E. N., Bache D. H. Clogging of filter medium by excess polymer during alum sludge filtration. *Filtration & Separation*, 1998, vol. 35 (10), pp. 947–950.
34. Wu C.C., Huang C., Lee D.J. Effects of polymer dosage on alum sludge dewatering characteristics and physical properties. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 1997, vol. 122, pp. 89–94. DOI: 10.1016/S0927-7757(97)00006-X.
35. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, Lithuania, 2015, pp. 1–4.
36. Bache D. H., Papavasiliopoulos E. N. On the role of aluminium hydroxide the conditioning of an alum sludge. *Water Sci. Technol.*, 1998, vol. 38 (2), pp. 33–40.
37. Bache D. H., Papavasiliopoulos E. N. Viscous behavior of sludge centrate in response to polymer conditioning. *Water Res.*, 2000, vol. 34 (1), pp. 354–358.
38. Byun S., Kwon J.-H., Kim M.-h., Park K.-y., Lee S. Automatic control of polymer dosage using streaming potential for waterworks sludge conditioning. *Separation and Purification Technology*, 2007, vol. 57 (2), pp. 230–236.
39. Gao W., Song L., Wang Z., Xuan L. Pyrite activated peroxymonosulfate combined with as a physical-chemical conditioner modified biochar to improve sludge dewaterability: analysis of sludge floc structure and de-watering mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29 (49), pp. 74725–74741. DOI: 10.1007/s11356-022-21074-4.
40. Hryniuk D., Orobei I., Oliferovich N., Suhorukova I. Electrokinetic Converter using AN Unsteady Shift: A Quantitative Model. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2019.8732159.
41. Bogoslav N. M., Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobei I. O., Orobei O. I. Converters of the electrokinetic potential of hydrodispersed systems. *Izvestiya TulGU [Izvestiya TulGU]*, 2011, no. 3, pp. 106–110 (In Russian).
42. Hernandez H. L., Lann M. V. Development of a neural sensor for on-line prediction of coagulant dosage in a potable water treatment plant in the way of its diagnosis. *In Advances in Artificial Intelligence-IBERAMIA-SBIA 2006*. Berlin; Heidelberg, Springer Publ., 2006, pp. 249–257.
43. Teefy S., Farmerie J., Pyles E. Jar test. *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes*, third ed. Denver, CO, American Water Works Association Publ., 2011, pp. 17–58.
44. Sheng D. P. W., Bilad M. R., Shamsuddin N. Assessment and optimization of coagulation process in water treatment plant: A Review. *ASEAN J. of Science and Engineering*, 2023, vol. 3 (1), pp. 81–100.

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniukda@gmail.com

Олиферович Надежда Михайловна – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Оробей Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniukda@gmail.com

Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna – Senior Lecturer, the Department of Automation Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

Suhorukova Irina Gennad'yevna – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Orobei Igor Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Поступила после доработки 25.04.2024