

УДК 685.5

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

© 2026 Н.А. Жильникова, К.Г. Вашуров

Санкт–Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт–Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 27.01.2026

В статье рассматривается актуальная проблема повышения эффективности функционирования очистных сооружений в условиях ужесточения экологических нормативов. Проанализированы недостатки существующих автоматизированных систем диагностики, отсутствие всесторонней системы контроля в которых приводит к росту аварийности, сбоям технологических процессов и нерациональному энергопотреблению. Предложен комплексный подход к оценке эффективности работы очистных сооружений, базирующийся на системе взаимосвязанных критериев, обеспечивающих соблюдение нормативно-правовых требований к качеству сточных вод. Научно-методическую основу исследования составили методы системного анализа, математического моделирования, а также применение аппарата рекуррентных нейронных сетей. На их базе разработаны критерии эффективности автоматизированной системы диагностики. Внедрение предложенного подхода позволит достичь значимых экологических и экономических результатов: снизить эксплуатационные затраты за счет оптимизации процессов, минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций и гарантировать соблюдение нормативных показателей качества очистки стоков. *Ключевые слова:* очистные сооружения, автоматизированные системы, критерии эффективности, энергопотребление, оптимизация, сточные воды, качество.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-36-42

EDN: BHHBDY

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие промышленности и городской застройки оказывает большое влияние на окружающую среду. В ответ на ужесточение требований к экологической безопасности и ресурсосбережению все большее внимание уделяется охране окружающей среды.

В настоящее время очистные сооружения (ОС), используемые повсеместно, необходимы для соблюдения вышеупомянутых норм экологической и промышленной безопасности [1]. Данные системы представляют собой технологические комплексы с интегрированными автоматизированными системами диагностики (АСД), позволяющими осуществлять постоянный мониторинг и производить оценку качества работы очистных сооружений [2].

Сбой или неэффективная работа данных систем может привести к серьезным последствиям для окружающей среды, таким как загрязнению водных ресурсов или экономическим убыткам для производства. Существующие системы зачастую не учитывают множество критически важных параметров, так же, как и не обладают достаточной «гибкостью» к постоянно изменяющимся параметрам.

По причине постоянно изменяющихся условий очистных сооружений требуется внедрение алгоритмов, которые в свою очередь оперативно реагируют на изменения параметров.

В настоящее время используемые системы не способны быстро адаптироваться, что приводит к ухудшению качества очистки, перерасходу ресурсов и росту эксплуатационных расходов. Необходимо отметить, что автоматизация таких сложных процессов способствует снижению затрат для производства.

Перспективным решением является внедрение интеллектуальных систем, что обуславливается способностью к прогнозированию возникновения аварийных ситуаций на очистных сооружениях и помощью оперативному обслуживающему персоналу принимать решения по их предотвращению.

Применение таких технологий позволяет соблюдать экологические нормы и стандарты, оптимизировать расходы ресурсов и свести к минимуму риски возникновения аварийных ситуаций [3].

Жильникова Наталья Александровна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: n.zhilnikova@guar.ru

Вашуров Константин Геннадьевич, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: ale.brai@mail.ru

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ

Использование автоматизированных систем диагностики очистных сооружений позволяет минимизировать количество отказов системы, однако существующие системы, не отвечают необходимым требованиям, что приводит к повышению риска возникновения аварийных ситуаций. В связи с этим, актуальной задачей становится разработка и внедрение комплексных и измеримых критериев эффективности внедрения автоматизированных систем диагностики. Данные критерии должны не только оценивать текущее состояние системы, но и обеспечивать автономность и прогнозирование для обеспечения надлежащей работы.

Для достижения необходимого результата, разработана система критериев. Ключевые критерии эффективности основаны на параметрах работы самих очистных сооружений, а именно: качества воды, надежности ОС, ресурсопотребления и текущего состояния используемого оборудования [4].

1-й критерий: степень автоматизации мониторинга головных параметров качества воды.

Данный критерий наглядно показывает, насколько заменим «ручной» труд процессом мониторинга очистных сооружений. Это позволяет оценить способность системы принимать решения без прямого взаимодействия с обслуживающим персоналом. При помощи постоянного мониторинга в режиме реального времени АСД позволяет определить наиболее важные для текущей работы параметры качества.

Автоматизация процесса по отбору проб воды на очистных сооружениях с помощью установленных датчиков значительно повышает качество полученных данных, в то время как ручной отбор проб оперативным персоналом занимает долгое время (включая сам сбор проб, доставку в химическую лабораторию и дальнейшее проведение анализа проб воды) [5].

Автоматизируется также процесс анализа и принятия решения, посредством постоянно обновляющихся данных на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора.

Поступающие в онлайн режиме данные сравниваются с заданными «нормальными» значениями, что позволяет системе предложить наиболее подходящий вариант, для избежания возникновения аварийной ситуации. Как результат – сокращение времени на принятие решения оперативным персоналом, в случае выявления «отклонений» [6].

Таблица 1. Показатели предельно допустимой концентрации (ПДК) веществ в воде, прошедшей очистку, соответствующей требованиям, предъявляемым при сбросе в водоем рыбохозяйственного назначения первой категории

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
1	Взвешенные вещества	мг/л	6-8
2	БПК _{полн}	мг/л	3
3	Азот аммонийных солей	мг/л	0,4
4	Фосфор фосфатов P – PO ₄	мг/л	0,2
5	Нефтепродукты	мг/л	0,05
6	Общие колиформные бактерии	КОЕ/100мл	не более 100
7	Колифаги	КОЕ/100мл	не более 100

На основе полученных данных система самостоятельно корректирует работу технологического оборудования, а именно предлагает изменить требуемую дозировку активных веществ, работу воздухоуловов, откорректировать работу установленных насосов для рециркуляции активного ила. Это позволяет обеспечить необходимую стабильность технологического процесса.

Данный критерий позволяет значительно экономить ресурсы, такие как реагенты, так как будет выбрана необходимая дозировка по потребности. В дополнение, данный критерий эффективности автоматизированных систем диагностики очистных сооружений позволяет избежать наложения больших штрафов на предприятие со стороны контролирующих органов, в связи с некачественной очисткой сточных вод. К тому же предотвращение загрязнения водных объектов позволит сохранить экосистему в надлежащем состоянии. Все это позволяет повысить надежность системы, тем самым увеличить срок службы оборудования, минимизировать затраты на дорогостоящий ремонт в случае возникновения аварийной ситуации и избежать наложения штрафов и репутационных потерь.

Автоматизации определяется по следующим параметрам:

1. Требуется выявить общее количество параметров системы очистных сооружений, которые необходимо контролировать, тем самым это позволит выявить «охват» автоматизации данных очистных сооружений;

2. Время, затраченное на принятие решения по минимизации аварийной ситуации;

3. Количество технологических операций, которые находятся под постоянным мониторингом АСД.

Степень автоматизации очистных сооружений следует разделить на 3 позиции, таких как:

1. Нулевая степень автоматизации – все операции на очистных сооружениях производятся оперативным персоналом, посредством наблюдения и принятия решений;

2. Средняя степень автоматизации – заключается в наличии автоматизированной системы диагностики очистных сооружений, без возможности указания на АРМ оперативного персонала предупреждений о возможном возникновении аварийных ситуаций;

3. Высокая степень автоматизации – использование автоматизированной системы диагностики на очистных сооружениях, для постоянного мониторинга параметров системы с возможностью предупреждения, прогнозирования и указания требуемых действий оперативного персонала для минимизации возникновения аварийной ситуации.

Данный критерий позволяет произвести объективную оценку и степень автоматизации очистных сооружений на производстве [7].

2-й критерий: способность автоматизированной системы диагностики к прогнозированию, предупреждению и предотвращению аварийных ситуаций.

Данный критерий позволяет произвести оценку того, как заблаговременно вычисляется вероятность возникновения аварийной ситуации на очистных сооружениях.

За счет автоматизированной системы диагностики с использованием рекуррентной нейронной сети производится постоянный сбор и агрегация требуемых для прогнозирования данных [8]. АСД производит мониторинг о текущем состоянии очистных сооружений сравнивая их с историческими данными (за длительный период), что значительно сокращает время и необходимость «ручного» сбора данных, посредством обходов и постоянного присутствия обслуживающего персонала на очистных сооружениях [9]. Применение АСД позволяет проводить анализ взаимосвязей между необходимыми параметрами, для выявления «отклонений» от нормального режима работы очистных сооружений и минимизации возникновения аварийной ситуации. Благодаря возможности АСД к ранжированию возможных угроз и формированию предупреждений оперативный персонал будет располагать необходимым временем для принятия решений по их устранению. Эффективность автоматизации заключается во времени заблаговременного прогнозирования, а также точности прогнозирования АСД аварийных ситуаций на очистных сооружениях.

Для должного уровня автоматизации требуется, чтобы автоматизированная система диагностики имела возможность к прогнозированию, ранжированию и формированию предупреждений. Способность прогностических данных, позволяющая предотвращать аварийные ситуации является одним из ключевых элементов надлежущей работы очистных сооружений и как следствие позволяет избежать репутационных, экологических и экономических потерь [10].

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что за счет важных критериев, таких как: непрерывность основного технологического процесса, качества очистки сточных вод, предотвращения аварийных ситуаций, избежания штрафных санкций в адрес производства, снижения затрат на ликвидацию последствий, в части дорогостоящего ремонта оборудования и аварийно-восстановительных работ очистных сооружений данный критерий является необходимым, для оценки качества эффективности.

3-й критерий: сокращение энергопотребления на производстве.

Очистные сооружения, используемые на производствах, являются неотъемлемым элементом, который позволяет поддерживать надлежащий уровень экологических норм. Для того, чтобы использовать очистные сооружения, необходимо затрачивать большое количество энергии для работы. Критерий, связанный с сокращением энергопотребления, позволяет оценить, насколько автоматизированная система диагностики очистных сооружений может рассчитывать и поддерживать максимально энергоэффективный режим работы, при условии постоянно изменяющейся нагрузки системы. Автоматизированная система диагностики позволяет оперативному обслуживающему персоналу принимать решения, которые в свою очередь снижают энергопотребление. АСД производит постоянный мониторинг используемой нагрузки, что значительно экономит перерасход электроэнергии на производстве. Так же посредством анализа АСД планирует пиковые часы нагрузки системы (работа в ночное время), что дает возможность затрачивать большее количество электроэнергии за счет меньшей ставки за электроэнергию.

В свою очередь уровень автоматизации измеряется показателем оптимизации энергопотребления за счет использования автоматизированных систем диагностики очистных сооружений. Данный критерий показывает техническую готовность АСД к оптимизации.

Степень автоматизации состоит из 3 позиций, таких как:

1. Нулевая степень автоматизации – обслуживающий персонал самостоятельно принимает решение для экономии электроэнергии, посредством наблюдения и выявления необходимости в работе устройств, используемых на очистных сооружениях;

2. Средняя степень автоматизации – автоматизированная система диагностики позволяет производить мониторинг затрачиваемой электроэнергии очистными сооружениями, без возможности прогнозирования;

3. Высокая степень автоматизации – автоматизированная система диагностики позволяет производить мониторинг, с возможностью прогнозирования оптимальных режимов работы системы, для рационального энергопотребления очистными сооружениями.

На основании данного критерия появляется возможность объективной оценки уровня оптимизации, что значительно сокращает экономические и энерго затраты.

4-й критерий: показатель точности и скорости диагностики используемого оборудования на очистных сооружениях.

Данный критерий позволяет определить способность автоматизированной системы диагностики очистных сооружений к прогнозированию возникновения возможных аварийных ситуаций, с целью минимизации необходимости «ручного» осмотра оборудования.

В настоящий момент требуется четко отслеживать, способна ли АСД в режиме реального времени записать, обработать и проанализировать данные, поступающие с головных датчиков, установленных на критически важном оборудовании. Это требуется для того, чтобы автоматизированная система диагностики на основании полученных выходных данных текущего состояния оборудования проводила аналогию с «эталонным» показателем полностью исправного оборудования и посредством предупреждающих сигналов, окон на рабочем столе АРМ диспетчера / оперативного персонала, указывала о необходимости скорого ремонта определенного оборудования [11].

Используемые в настоящее время методы выявления аварийных ситуаций не отвечают необходимым требованиям, в части оперативности и достоверности информации. При проведении внешнего визуального осмотра оборудования очистных сооружений обслуживающий персонал может не заметить поломку или возможно скорый выход из строя оборудования, что в дальнейшем приведет к возникновению аварийной ситуации и дорогостоящему ремонту. Данный критерий необходим для исключения «человеческого фактора» и дополнительных затрат на ремонт оборудования в случае возникновения аварийной ситуации. В дополнение это позволяет прогнозировать остаточный ресурс работки оборудования очистных сооружений и более детально и рационально планировать бюджет.

За счет использования АСД значительно сокращается время обнаружения дефекта оборудования, что позволяет заблаговременно выявить возможное возникновение аварийной ситуации и выход из строя головного оборудования. АСД проводит постоянный мониторинг всех систем очистных сооружений, что позволяет сократить время на выявление отклонений от нормального режима работы [12]. Так же автоматизированная система диагностики позволяет наиболее точно выявлять место возможного выхода из строя оборудования, что повышает точность обнаружения дефектов.

Степень автоматизации делится на 2 степени:

Нулевая степень автоматизации – заключается в проведении осмотров обслуживающим персоналом;

Высокая степень автоматизации – автоматизированная система диагностики проводит постоянный мониторинг, что позволяет заблаговременно предупреждать обслуживающий персонал, посредством вывода на автоматизированное рабочее место уведомлений о текущем состоянии оборудования, с возможностью прогнозирования возникновений возможных аварийных ситуаций.

Применение данного критерия значительно снижает затраты на ремонт вышедшего из строя оборудования и увеличить срок службы оборудования. Это позволяет оценить эффективность внедрения автоматизированной системы диагностики.

Представленная структурная схема иллюстрирует взаимосвязь критериев эффективности автоматизированных систем диагностики очистных сооружений. Совокупность разработанных показателей формирует единую систему, обеспечивающую высокую точность комплексной оценки функционирования объекта.

Практическое применение данного подхода будет способствовать достижению заданного эколого-экономического эффекта, заключающегося в минимизации эксплуатационных издержек и строгом соблюдении природоохранных нормативов.

Рассмотрим локальные очистные сооружения машиностроительного предприятия производительностью 2000 м³/сут, где одним из наиболее важных экологических факторов является сброс нефтепродуктов в водный объект (табл.2).

Нарушение технологического режима работы флотационных и сорбционных установок обуславливает сверхнормативный сброс нефтепродуктов массой 29,9 кг/сут (при фактической концентра-

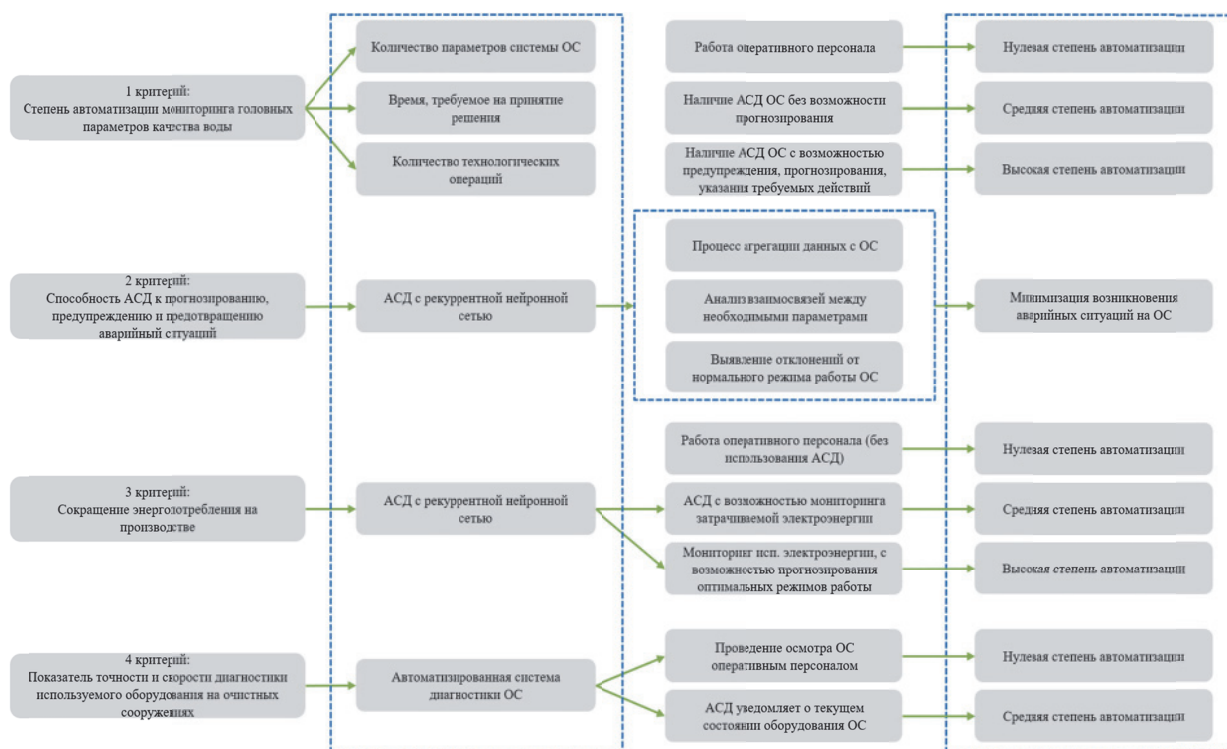


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи критериев эффективности автоматизированных систем диагностики очистных сооружений

Таблица 2. Численная оценка фактора

Показатель	ПДК, мг/л	Фактическое значение при стабильной работе, мг/л	Фактическое значение при наличии сбоев, мг/л
Нефтепродукты	0,05	0,04	15,0

ции 15,0 мг/л против норматива 0,05 мг/л и расходе 2000 м³/сут). Суммарная масса загрязняющего вещества за 30 дней составляет 0,897 т.

Согласно Распоряжению Правительства РФ № 1852-р, с 01.01.2025 г. базовая ставка платы за сброс нефтепродуктов составляет 22 214,67 руб./т. С учетом коэффициента индексации (1,045) и повышающего коэффициента K=25 (ст. 16.3 ФЗ «Об охране окружающей среды»), расчетная плата за негативное воздействие на окружающую среду достигает 520 600 руб./мес.

В рамках интегрированной системы менеджмента (система менеджмента качества и система экологического менеджмента) данный аспект классифицируется как критический риск. При ручном управлении (вероятность отказа P=0,4) величина риска оценивается в 208 240 руб./мес. Внедрение АСД минимизирует вероятность сбоя до P=0,05, снижая ожидаемые потери до 26 030 руб./мес., что подтверждает рост результативности СМК и экологической безопасности производства.

В таблице 3 представлены результаты внедрения АСД для обеспечения устойчивости процесса очистки сточных вод.

Управление рассмотренным экологическим аспектом обусловлена эксплуатационной эффективностью флотационно-сорбционного оборудования. Автоматизированная система диагностики позволяет оперативно минимизировать стохастические отклонения показателя неустойчивости, оптимизировать организацию производственного процесса и гарантировать соблюдение нормативных требований к качеству очистки стоков от нефтепродуктов без участия оператора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая система критериев оценки формирует базу для оптимизации работы очистных сооружений, обеспечивая снижение операционных расходов и повышение промышленной безопасности за счет прогнозирования рисков. Выделены следующие критерии эффективности:

1. Степень автоматизации контроля параметров водной среды.
2. Способность системы к предиктивной диагностике и предупреждению сбоев.

Таблица 3. Результаты внедрения АСД для обеспечения технологической и экологической устойчивости процесса очистки сточных вод

Показатель	Ручное управление	Автоматическое управление	Снижение
Концентрация нефтепродуктов	$\pm 1,5$ мг/л	$\pm 0,05$ мг/л	Примерно на 96%

3. Энергоэффективность производственного цикла.

4. Достоверность и оперативность определения технического состояния агрегатов.

Разработанные критерии формируют основу для управления приоритетными направлениями функционирования очистных сооружений, охватывая технологические, экологические и экономические аспекты.

Внедрение комплексной оценки ведет к оптимизации затрат на ремонтные работы и увеличению ресурса оборудования при соблюдении природоохранных нормативов. Предложенный комплекс критериев дает возможность объективно оценить эффективность АСД через систему коррелирующих показателей.

Важным преимуществом подхода является функция предиктивной диагностики, позволяющая заблаговременно фиксировать отклонения от нормативных режимов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жильникова, Н.А. Информационное обеспечение контроля и управления качеством воды в производственных системах / Н.А. Жильникова, В.О. Смирнова, И.А.Шишкин, А.А. Баранова// Датчики и системы. – 2022. – № 4(263). – С. 15-20.
2. Кобец, Д. В. Роботизация и автоматизация в промышленности / Д. В. Кобец, О. Ю. Авилова, Д. Н. Бойко // Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики. – 2023. – С. 96-98.
3. Путинцева, Д. Е. Применение цифровых технологий в управлении системами водоотведения: автоматизация процессов, мониторинг и прогнозирование / Д. Е. Путинцева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – №. 12-3. – С. 171-174.
4. Понкратова С.А. Экспертная роль компьютерного комплекса на очистных сооружениях / С.А. Понкратова, В.М. Емельянов, О.А. Дмитриева // 2 Всероссийские научные Зворыкинские чтения. – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2010. – С. 428.
5. Moldovan A., Nuca I. Automation of wastewater treatment plant //2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). – IEEE, 2019. pp 1-4. DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905867.
6. Tahoor M. et al. Automated Water Control System in Wastewater Treatment Plants //Application of Artificial Intelligence in Wastewater Treatment. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. pp.155-174.
7. Corominas L. et al. Performance evaluation of fault detection methods for wastewater treatment processes // Biotechnology and bioengineering. – 2011. – Vol. 108. – No. 2. – pp. 333-344.
8. Жильникова, Н.А. Создание цифровой модели системы водоотведения производства с использованием искусственных нейронных сетей / Н.А. Жильникова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – №. 3(125). – С. 67-75.
9. Ширяева, М. А. Алгоритм прогнозирования параметров качества водных объектов с использованием нейронной сети / М. А. Ширяева, О. О. Сеницына, М. В. Пушкарева, В. В. Турбинский //Анализ риска здоровью. – 2024. – №. 4. – С. 50-62.
10. Olsson G. Automation development in water and wastewater systems //Environmental Engineering Research. – 2007. – Vol. 12. – No. 5. – pp. 197-200.
11. Collivignarelli M. C. et al. The performance evaluation of wastewater service: a protocol based on performance indicators applied to sewer systems and wastewater treatment plants //Environmental Technology. – 2022. – Vol. 43. – No. 22. – pp. 3426-3443.
12. Balmér P, Hellström D. Performance indicators for wastewater treatment plants. Water Sci Technol. 2012;65(7):1304-10. doi: 10.2166/wst.2012.014. PMID: 22437030.

DEVELOPMENT OF EFFICIENCY CRITERIA FOR AUTOMATED DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR WASTEWATER TREATMENT FACILITIES

© 2026 N.A. Zhilnikova, K.G. Vashurov

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

This article examines the pressing issue of improving the efficiency of wastewater treatment facilities in the face of increasingly stringent environmental regulations. It analyzes the shortcomings of existing automated diagnostic systems, the lack of a comprehensive approach to which leads to increased accident rates, process failures, and inefficient energy consumption. A comprehensive approach to assessing the efficiency of wastewater treatment facilities is proposed, based on a system of interrelated criteria that ensures compliance with regulatory requirements for wastewater quality. The study's methodological framework included systems analysis, mathematical modeling, and recurrent neural networks. These methods were used to develop performance criteria for the automated diagnostic system. Implementation of the proposed approach will achieve significant environmental and economic benefits: reduced operating costs through process optimization, minimized risks of emergency situations, and guaranteed compliance with wastewater treatment quality standards.

Keywords: treatment facilities, automated systems, efficiency criteria, energy consumption, optimization, wastewater, quality.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-36-42

EDN: BHHBDY

REFERENCES

1. *Zhil'nikova, N.A.* Informacionnoe obespechenie kontrolya i upravleniya kachestvom vody v proizvodstvennykh sistemah / N.A. Zhil'nikova, V.O. Smirnova, I.A. Shishkin, A.A. Baranova // *Datchiki i sistemy*. – 2022. – № 4(263). – S. 15-20.
2. *Kobec, D. V.* Robotizatsiya i avtomatizatsiya v promyshlennosti / D. V. Kobec, O. Yu. Avilova, D. N. Bojko // *Innovatsii i informacionnye tekhnologii v usloviyah cifrovizatsii ekonomiki*. – 2023. – S. 96-98.
3. *Putinceva, D. E.* Primenenie cifrovyykh tekhnologiy v upravlenii sistemami vodootvedeniya: avtomatizatsiya processov, monitoring i prognozirovaniye / D. E. Putinceva // *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyykh i estestvennykh nauk*. – 2024. – №. 12-3. – S. 171-174.
4. *Ponkratova S.A.* Ekspertnaya rol' komp'yuternogo kompleksa na ochestnykh sooruzheniyah / S.A. Ponkratova, V.M. Emel'yanov, O.A. Dmitrieva // *2 Vserossijskie nauchnye Zvorykinskie chteniya*. – Murom: Izd.-poligraf. centr MI VIGU, 2010. – S. 428.
5. *Moldovan A., Nuca I.* Automation of wastewater treatment plant //2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). – IEEE, 2019. pp 1-4. DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905867.
6. *Tahoor M. et al.* Automated Water Control System in Wastewater Treatment Plants //Application of Artificial Intelligence in Wastewater Treatment. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. pp.155-174.
7. *Corominas L. et al.* Performance evaluation of fault detection methods for wastewater treatment processes // *Biotechnology and bioengineering*. – 2011. – Vol. 108. – No. 2. – pp. 333-344.
8. *Zhil'nikova, N.A.* Sozdanie cifrovoj modeli sistemy vodootvedeniya proizvodstva s ispol'zovaniem iskusstvennykh nejronnykh setej / N.A. Zhil'nikova // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2025. – T. 27. – №. 3(125). – S. 67-75.
9. *Shiryaeva, M. A.* Algoritm prognozirovaniya parametrov kachestva vodnykh ob'ektov s ispol'zovaniem nejronnoj seti / M. A. Shiryaeva, O. O. Sinicyna, M. V. Pushkareva, V. V. Turbinskij // *Analiz riska zdorov'yu*. – 2024. – №. 4. – S. 50-62.
10. *Olsson G.* Automation development in water and wastewater systems // *Environmental Engineering Research*. – 2007. – Vol. 12. – No. 5. – pp. 197-200.
11. *Collivignarelli M. C. et al.* The performance evaluation of wastewater service: a protocol based on performance indicators applied to sewer systems and wastewater treatment plants // *Environmental Technology*. – 2022. – Vol. 43. – No. 22. – pp. 3426-3443.
12. *Balmér P, Hellström D.* Performance indicators for wastewater treatment plants. *Water Sci Technol.* 2012;65(7):1304-10. doi: 10.2166/wst.2012.014. PMID: 22437030.

*Natalya Zhilnikova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems.
E-mail: n.zhilnikova@guap.ru
Konstantin Vashurov, Graduate Student of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems.
E-mail: ale.brai@mail.ru*