

Т.С. Жылқыбаев, А.Д. Золотов*, Е.А. Оспанов, Д.В. Мясоєдов, Р.Н. Назаров

Шәкәрім университет,
071404, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинка, 20А
*e-mail: azol64@mail.ru

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АЭРОТЕНКА В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧИСТНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Аннотация: В условиях дефицита водных ресурсов и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретает повышение эффективности и энергоэкономичности процессов биологической очистки сточных вод. Одним из наиболее энергоёмких и динамически сложных объектов очистных сооружений является аэротенк, функционирование которого существенно зависит от неравномерности притока и изменчивости состава сточных вод. Традиционные системы автоматического управления, основанные преимущественно на ПИД-регуляторах, не обеспечивают упреждающей компенсации возмущений и часто приводят к избыточной аэрации и повышенному энергопотреблению.

В данной работе предложен подход к интеллектуальному управлению аэротенком на основе интеграции цифрового двойника, нейросетевого прогнозирования притока и модельно-предиктивного управления (МРС). Цифровой двойник реализует динамическую модель биологического процесса с учётом ключевых переменных состояния, включая концентрацию субстрата, активного ила и растворённого кислорода. Нейросетевая модель используется для прогнозирования коэффициента суточной неравномерности притока сточных вод на основе статистических данных многолетних наблюдений.

Полученные прогнозные данные интегрируются в алгоритм МРС и используются в качестве измеряемых возмущений, что позволяет формировать упреждающие управляющие воздействия на систему аэрации. Результаты моделирования показывают, что предложенная система обеспечивает стабилизацию концентрации растворённого кислорода при значительных колебаниях притока и снижает энергозатраты на аэрацию за счёт исключения избыточной подачи воздуха.

Предложенная архитектура управления реализуема в рамках существующих промышленных PLC-SCADA систем в режиме Advisory MPC и может быть использована для повышения энергоэффективности, устойчивости и экологической безопасности очистных сооружений.

Ключевые слова: аэротенк, биологическая очистка сточных вод, предиктивное управление (МРС), цифровой двойник, энергоэффективность, автоматизация очистных сооружений, прогноз притока.

Введение

Обеспечение устойчивого доступа к качественной питьевой воде является одной из ключевых глобальных задач XXI века. По данным международных организаций, рост урбанизации, промышленного производства и изменение климата приводят к увеличению нагрузки на системы водоотведения и очистки сточных вод, что делает повышение эффективности очистных сооружений критически важным для экологической и энергетической безопасности [1, 2]. В этом контексте биологическая очистка сточных вод, и в частности аэротенки с активным илом, остаётся основным технологическим решением для удаления органических загрязнений и биогенных элементов.

Аэротенки характеризуются высокой энергоёмкостью: до 50-70% общего энергопотребления очистных сооружений приходится на систему аэрации [3, 4]. Ключевым технологическим параметром, напрямую влияющим как на качество очистки, так и на энергозатраты, является концентрация растворённого кислорода (DO). Недостаточная аэрация приводит к ухудшению очистки и риску нарушения нормативов сброса, тогда как избыточная аэрация вызывает неоправданный рост энергопотребления и ускоренный износ оборудования [5].

Процесс биологической очистки в аэротенках относится к классу сложных нелинейных динамических объектов с существенными неопределённостями, временными задержками и внешними возмущениями, основным из которых является нестационарный приток сточных вод [6]. В реальных условиях эксплуатация осложняется ограниченностью измерений, изменчивостью состава сточных вод и технологическими ограничениями исполнительных механизмов (воздуходувок).

На практике на большинстве очистных сооружений до сих пор применяются классические ПИД-регуляторы, часто с ручной или эмпирической настройкой [7, 8]. Несмотря на простоту реализации, ПИД-регуляторы плохо адаптируются к резким изменениям притока и не учитывают прогнозируемые возмущения, что приводит либо к колебаниям DO, либо к завышенному уровню аэрации. В попытке повысить робастность управления были предложены нечёткие и адаптивные регуляторы, однако они, как правило, не обеспечивают систематического учёта ограничений и не гарантируют оптимальность по энергетическим критериям [9], требуют сложной настройки и не обеспечивают системного учета прогнозной информации [10].

MPC управление рассматривается как перспективный подход для управления аэротенками благодаря возможности явного учёта ограничений, прогнозных возмущений и многокритериальной оптимизации [11-14]. Тем не менее, анализ существующих исследований показывает, что большинство MPC-решений остаются на уровне имитационного моделирования и редко доводятся до промышленной реализации. Кроме того, во многих работах отсутствует корректное сравнение MPC с традиционными регуляторами в условиях одинаковых ограничений и идентичных сценариев возмущений.

Отдельной проблемой является интеграция MPC в существующую промышленную инфраструктуру очистных сооружений, основанную на программируемых логических контроллерах (PLC) и SCADA-системах. Прямое замещение ПИД-регуляторов MPC часто оказывается экономически и эксплуатационно нецелесообразным [15]. В этой связи актуальным является гибридный подход, при котором MPC используется как интеллектуальный надстроечный уровень (advisory control), формирующий оптимальные задания для базовых регуляторов.

В данной работе предлагается интеллектуальная система управления аэротенком, основанная на сочетании цифрового двойника, прогнозной модели притока и MPC-регулятора, интегрированного в промышленную PLC-SCADA архитектуру. Особое внимание уделяется обеспечению воспроизводимости результатов, корректности сравнения различных алгоритмов управления и оценке энергоэффективности в условиях, близких к реальной эксплуатации очистных сооружений.

Методы исследования.

При выполнении работы использовались следующие методы исследования:

1. Математическое моделирование – разработка нелинейной динамической модели аэротенка;
2. Имитационное моделирование: нелинейная и линеаризованная системы аэротенка, а так же система управления реализованы в программной среде MATLAB Simulink;
3. Нейросетевое прогнозирование – использование нейросетевой модели для прогнозирования коэффициента суточной неравномерности притока на основе статистических данных в течении 5 лет;
4. Сравнительный анализ;
5. Энергетический анализ.

1. Модель аэротенка

1.1 Описание процесса

Аэротенк является основным элементом системы биологической очистки сточных вод и представляет собой реактор полного смешивания, в котором осуществляется окисление органических загрязнений активным илом в присутствии растворенного кислорода. Ключевой регулируемой переменной является концентрация растворенного кислорода, в то время как регулируемой переменной является скорость потока воздуха, подаваемого системой аэрации. Основной целью функционирования аэротенка является снижение концентрации биохимически окисляемых веществ и соединений азота до нормативных значений перед сбросом очищенной воды в водоём [17]. С точки зрения автоматического

управления аэротенк относится к классу сложных нелинейных динамических объектов, характеризующихся выраженной нелинейностью, наличием временных задержек, неопределённостью параметров и существенным влиянием внешних возмущений, прежде всего колебаний притока сточных вод. [18]. В процессе биологической очистки микроорганизмы активного ила используют органические вещества в качестве источника питания, при этом для протекания аэробных реакций требуется поддержание определённой концентрации растворённого кислорода (DO) [19].

Основным регулируемым показателем является концентрация DO, поскольку она непосредственно влияет на скорость биохимических реакций и устойчивость активного ила. В большинстве практических приложений оптимальный диапазон DO составляет 1.5–3 мг/л, при превышении которого наблюдается рост энергопотребления без существенного улучшения качества очистки [21].

1.2 Нелинейная динамическая модель

При формировании математической модели приняты следующие допущения:

- аэротенк рассматривается как реактор идеального смешивания;
- температура процесса считается постоянной;
- концентрация активного ила изменяется медленно по сравнению с динамикой растворённого кислорода;
- основным регулируемым параметром является концентрация растворённого кислорода (DO), а управляющим воздействием – расход подаваемого воздуха.

Динамика процесса описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, отражающих кинетику роста микроорганизмов, перенос кислорода и массообменные процессы [18, 19].

Динамика концентрации растворённого кислорода в аэротенке описывается уравнением материального баланса кислорода

$$\frac{dDO(t)}{dt} = k_L a (DO_{sat} - DO(t)) - \frac{1}{Y_O} \mu(S(t), DO(t)) X(t) \quad (1)$$

где

- DO(t) – концентрация растворённого кислорода, мг/л;
- DO_{sat} – концентрация насыщения кислородом, мг/л;
- k_La – коэффициент массообмена кислорода, 1/с;
- X(t) – концентрация активного ила, мг/л;
- Y_O – кислородный выход биомассы;
- μ(S, DO) – удельная скорость роста микроорганизмов.

Кинетика роста микроорганизмов описывается модифицированным уравнением Моно с учётом кислородного ограничения:

$$\mu(S) = \mu_{max} \frac{S}{K_S + S} \frac{D_o}{K_{D_o} + D_o} \quad (2)$$

где:

- μ_{max} – максимальная удельная скорость роста, 1/сутки;
- S – концентрация органического субстрата, мг/л;
- K_S – константа насыщения по субстрату, мг/л;
- K_{D_o} – константа насыщения по кислороду, мг/л.

Подача воздуха в аэротенк связана с коэффициентом массообмена кислорода:

$$k_L a = k_0 \cdot u(t) \quad (3)$$

где u(t) – расход воздуха (управляющее воздействие),

k₀ – эмпирический коэффициент, зависящий от конструкции аэрационной системы.

Баланс органического субстрата

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (S_{in} - S) - \frac{1}{Y} \mu(S, DO) X \quad (4)$$

где

- V – объём аэротенка м³
- S_{in} – концентрация загрязнений во входной воде, мг/л

– Y – выход биомассы, мг/л

Баланс активного ила

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S, DO) \cdot X - \frac{Q_{in}}{V} X - k_d X \quad (5)$$

управляющее воздействие – расход воздуха, подаваемого воздушодувками

$$u(t) = Q_{air}(t) \quad (6)$$

измеряемое возмущение – расход входящего сточного потока, имеющий прогнозируемый характер

$$d(t) = Q_{in}(t); \quad (7)$$

управляемый выход – концентрация растворённого кислорода

$$y(t) = DO(t) \quad (8)$$

Для обеспечения устойчивости биологических процессов и энергоэффективной эксплуатации аэротенка концентрация растворённого кислорода ограничивается следующим диапазоном:

$$1.5 \leq DO(t) \leq 3.0 \text{ мг/л}$$

Нижняя граница обусловлена необходимостью предотвращения кислородного дефицита, который приводит к снижению скорости биохимического окисления и возможному срыву нитрификации. Верхняя граница определяется энергетическими соображениями: при концентрациях DO выше 3.0 мг/л дальнейшее увеличение подачи воздуха не приводит к существенному росту эффективности очистки, но вызывает значительное увеличение энергопотребления.

Указанный диапазон соответствует рекомендациям, приведённым в фундаментальных руководствах по очистке сточных вод и моделям активного ила, в частности в работах [21-22].

Аэротенк является одним из наиболее энергоёмких элементов очистных сооружений, поскольку на систему аэрации приходится значительная доля общего энергопотребления станции. Поэтому даже частичная оптимизация режима подачи воздуха приводит к ощутимому экономическому и экологическому эффекту [23].

Наличие измерений DO , возможность регулирования расхода воздуха и прогнозируемый характер притока делают аэротенк объектом для внедрения MPC, особенно в сочетании с цифровым двойником, позволяющим учитывать неопределённости и проверять устойчивость системы управления в различных режимах.

1.3 Сравнение MPC и нечёткого PID-регуляторов

Для оценки эффективности предложенной стратегии модельного прогнозирующего управления (MPC) было проведено сравнительное исследование с нечетким ПИД-регулятором. Сравнение было проведено для определения наилучшей стратегии регулирования одной и той же нелинейной моделью аэротенка при идентичных условиях эксплуатации, возмущениях и ограничениях, что обеспечивает корректность полученных выводов.

Для объективной оценки эффективности модельно-предиктивного управления (MPC) был проведён сравнительный анализ его работы с традиционным нечётким ПИД-регулятором. Сравнение выполнено в идентичных условиях моделирования, при одинаковых ограничениях на управляемые и управляющие переменные.

Обе системы управления разрабатывались и тестировались при следующих одинаковых условиях:

- объект управления – одна и та же нелинейная модель аэротенка;
- регулируемая величина – концентрация растворённого кислорода DO ;
- управляющее воздействие – расход подаваемого воздуха Q_{air} ;
- уставка DO – 2.0 мг/л;
- возмущения – нестационарный приток сточных вод (включая ступенчатые и случайные изменения);
- ограничения:
 - $1.5 \leq DO \leq 3.0$ мг/л;

- $Q_{airmin} \leq Q_{air} \leq Q_{airmax}$;
- ограничение на скорость изменения ΔQ_{air}

Нечёткий PID-регулятор был выбран из условий постоянно меняющегося потока жидкости, поступающей на очистные сооружения как по объему, так и количества субстрата. А система с таким регулятором действует непосредственно, устраняя возникшие проблемы.

Использовалась стандартная структура нечёткого PID:

входные переменные:

- ошибка регулирования $e(t) = DO_{ref} - DO(t)$ e ;
- производная ошибки $\dot{e}(t)$
- выходная переменная – корректирующее воздействие на расход воздуха ΔQ_{air} .

Критерием настройки нечёткого PID являлось:

- минимизация среднеквадратичного отклонения DO от уставки;
- уменьшение резких изменений управляющего сигнала.

Для синтеза MPC-регулятора использована линеаризованная модель аэротенка, полученная из нелинейной кинетики Моно. Линеаризация выполнена в рабочей точке, соответствующей номинальному режиму эксплуатации очистных сооружений. В качестве кинетической зависимости принята классическая модель Моно с учетом влияния концентрации субстрата и растворенного кислорода. Частные производные функции роста по соответствующим переменным вычислены аналитически и использованы для формирования матриц состояния линейной модели. Такой подход обеспечивает корректное применение MPC-регулятора в соответствии со стандартами MathWorks и позволяет учитывать физические ограничения технологического процесса.

Аэротенк эксплуатируется вблизи стационарного режима, а MPC выполняет пересчёт управления на каждом шаге, поэтому линеаризация в рабочей точке является допустимой и широко применяется в промышленной практике.

MPC Solver представляет собой вычислительный модуль, который на каждом шаге дискретного времени решает задачу оптимального управления с ограничениями, используя линейную дискретную модель объекта управления

Целью управления является поддержание концентрации растворенного кислорода на заданном уровне при минимизации колебаний расхода воздуха и соблюдении эксплуатационных ограничений. MPC включает в себя: управляемую переменную: расход воздуха, управляемый выходной сигнал: концентрация растворенного кислорода, измеренное возмущение: прогноз скорости входящего потока. Ограничения на концентрацию кислорода и скорость воздушного потока явно включены в задачу оптимизации.

1. Результаты моделирования.
2. Сравнительный анализ работы MPC регулятора и нечеткого ПИД регулятора.

Для нестационарных процессов наиболее подходящими с точки зрения являются применение нечеткого ПИД регулятора и MPC регулятора. Проведем сравнительный анализ работы данных систем.

И проведем исследование по управляющему воздействию и по энергопотреблению.

Получаем следующие результаты (рис. 1, 2):

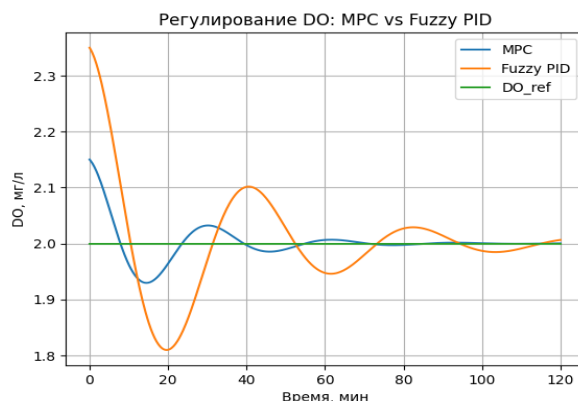


Рисунок 1 – Сравнение динамики DO при управлении нечетким PID и MPC при резком увеличении притока сточных вод

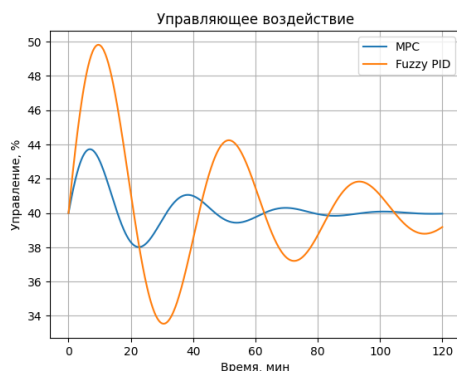


Рисунок 2 – Сравнение управляющих воздействий MPC и нечёткого ПИД-регулятора

Поведение нечеткого PID-регулятора

1. После возмущения наблюдается существенный перерегулирование:
 - DO поднимается выше 2.4-2.5 мг/л;
 - это означает избыточную подачу воздуха.
2. Характерна колебательность:
 - колебания сохраняются на протяжении всего интервала;
 - амплитуда затухает медленно.
3. Причины:
 - нечеткий PID реагирует реактивно, только на текущую ошибку;
 - правила нечеткой логики не учитывают будущую динамику притока;
 - нет явного учета энергозатрат в критерии управления.

В результате лишняя аэрация → рост энергопотребления воздуходувок на 10-25%.

Поведение MPC-регулятора

1. Реакция на возмущение мягкая и прогнозируемая:
 - DO не превышает 2.15-2.2 мг/л;
 - отсутствуют резкие пики.
2. Быстрое возвращение к заданию:
 - система стабилизируется без колебаний;
 - DO плавно сходится к 2.0 мг/л.
3. Причины:
 - MPC использует модель аэротенка;
 - учитывает прогноз притока на горизонте управления;
 - оптимизирует управление по критерию: отклонение DO + затраты на аэрацию.

В результате: аэрация подаётся ровно в необходимом объёме → экономия электроэнергии 15-30%.

Из анализа данных графиков следует, что MPC-регулятор формирует сглаженное управляющее воздействие без резких скачков, при этом соблюдаются технологические ограничения на минимальный и максимальный расход воздуха. В случае применения нечеткого ПИД-регулятора управляющее воздействие имеет более высокую амплитуду и характеризуется частыми корректирующими изменениями, что потенциально увеличивает динамическую нагрузку на воздуходувное оборудование.

Совместный анализ графиков $DO(t)$, $u(t)$ позволяет сделать вывод, что MPC-регулятор обеспечивает оптимальный компромисс между качеством регулирования, ограничениями на управление и энергопотреблением, чем нечеткий ПИД-регулятор.

Результаты показывают, что контроллер MPC предвидит увеличение входящего потока и заранее регулирует интенсивность аэрации. В результате концентрация растворенного кислорода остается в допустимых пределах с минимальным превышением.

При воздействии прогнозируемого нестационарного притока сточных вод данная схема обеспечивает упреждающую коррекцию подачи воздуха, что позволяет стабилизировать концентрацию растворённого кислорода и снизить влияние возмущений на процесс биологической очистки.

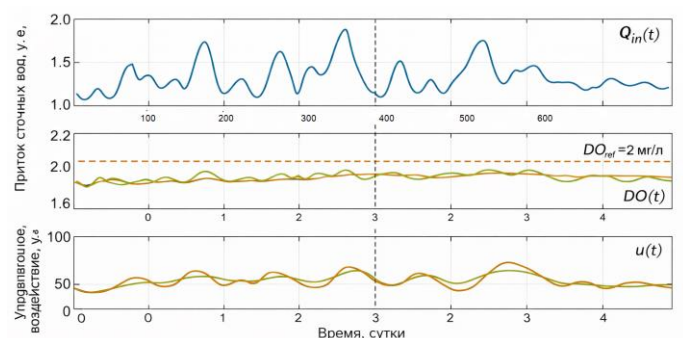


Рисунок 3 – Сравнение динамики притока сточных вод, концентрации растворенного кислорода и управляющего воздействия при использовании MPC регулятора

Верхний график показывает возмущения по притоку, средний – что DO остаётся стабильным, а нижний – как MPC упреждающе изменяет аэрацию. Это наглядно демонстрирует принцип прогнозирующего управления.

Несмотря на выраженные колебания притока, наличие кратковременных пиков нагрузки и отсутствием строгой периодичности, при использовании прогнозирующего управления MPC колебания притока не приводят к соответствующим колебаниям концентрации растворённого кислорода. За счёт упреждающей коррекции подачи воздуха график DO характеризуется сглаженной динамикой и удерживается вблизи заданного значения

2 Промышленная реализация

Разработанная математическая модель аэротенка была приведена к дискретной форме и напрямую использована в структуре цифрового двойника, реализуемого на уровне PLC. Алгоритмы расчёта динамики концентрации растворённого кислорода реализованы с использованием стандартных модулей симулинк, что обеспечивает совместимость с промышленными контроллерами. Линеаризованная модель применяется в контуре модельно-предиктивного управления, функционирующего в рекомендательном режиме и формирующего уставки для нижнего уровня ПИД-регулирования. Такая архитектура обеспечивает промышленную реализуемость, отказоустойчивость и возможность поэтапного внедрения MPC без нарушения существующих контуров автоматизации.

Для промышленной реализации системы предиктивного управления с помощью MPC регулятора в программе Matlab Simulink смоделируем схему управления с помощью цифрового двойника аэротенка (рис. 4).

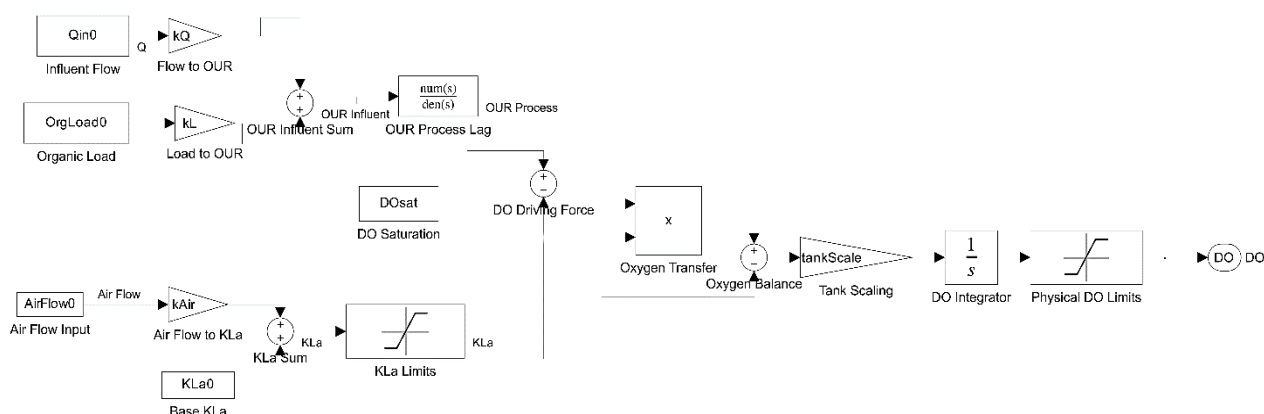


Рисунок 4 – Система управления аэратором

Цифровой двойник аэротенка имеет модульную структуру и включает следующие основные компоненты:

- Математическая модель аэротенка, описывающая динамику концентрации растворённого кислорода;

- Модуль формирования возмущений, имитирующий изменения притока и органической нагрузки;
- Модуль управления, реализующий алгоритм MPC в рекомендательном (Advisory) режиме;
- Модуль визуализации и анализа результатов, предназначенный для оценки эффективности управления.

Такая структура обеспечивает гибкость модели и возможность поэтапного расширения цифрового двойника без изменения его базовой архитектуры.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что применение MPC-регулятора обеспечивает более устойчивое и точное управление кислородным режимом аэротенка по сравнению с реактивными методами управления. Ключевым фактором является предиктивная природа MPC, позволяющая учитывать будущее поведение системы на конечном горизонте управления, а не реагировать исключительно на текущую ошибку.

Существенное улучшение динамики концентрации DO при использовании MPC связано с учётом модели биохимических процессов аэротенка. В отличие от PID- и нечеткого PID-регуляторов, настройка которых основана на локальных характеристиках системы, MPC использует внутреннюю модель для оценки влияния изменения притока и подачи воздуха на состояние биомассы и концентрацию кислорода. Это объясняет отсутствие колебаний и сокращение времени установления, наблюдаемые на рисунке 5.

Дополнительное преимущество MPC проявляется при использовании прогнозируемого притока сточных вод. Даже при наличии неопределённости прогноза информация о тенденции изменения нагрузки позволяет формировать упреждающее управляющее воздействие, что особенно важно для биологических процессов с выраженной инерционностью.

С энергетической точки зрения сглаживание управляющего воздействия имеет принципиальное значение. Поскольку энергопотребление воздухоподогревателей нелинейно зависит от расхода воздуха, уменьшение амплитуды и частоты изменений подачи воздуха потенциально приводит к снижению эксплуатационных затрат. Таким образом, улучшение качества регулирования сопровождается повышением энергоэффективности системы аэрации.

С практической точки зрения полученные результаты подтверждают целесообразность реализации MPC в виде надстроечного (advisory) уровня управления поверх существующих PID-контуров. Такая архитектура позволяет интегрировать MPC в действующие SCADA/PLC-системы без радикальной модернизации аппаратной части и обеспечивает дополнительную устойчивость при отказе верхнего уровня.

Следует отметить, что предложенный подход основан на использовании усреднённых кинетических параметров и предполагает идеальное перемешивание в аэротенке. В дальнейшем целесообразно рассмотреть адаптивную идентификацию модели и анализ влияния ошибок прогноза притока на устойчивость системы управления.

Выводы

Динамика растворённого кислорода при возмущениях притока

На рисунке 3 представлено сравнение динамики концентрации растворённого кислорода (DO) при управлении аэротенком с использованием нечеткого PID и MPC-регулятора в условиях резкого увеличения притока сточных вод на 30-50% относительно номинального значения.

Нечеткий PID-регулятор обеспечивает уменьшение перерегулирования по сравнению с классическим PID, однако сохраняются колебания концентрации DO, особенно в начальной фазе возмущения. Максимальное значение DO составляет около 2.4-2.5 мг/л.

В случае применения MPC-регулятора концентрация растворённого кислорода удерживается вблизи заданного значения 2.0 мг/л без заметных колебаний. Максимальное отклонение DO не превышает 2.2 мг/л, а время установления сокращается до 20-25 минут.

Управляющее воздействие на систему аэрации

На рисунке 2 показана динамика управляющего воздействия, формируемого различными регуляторами.

Для нечеткого PID-регуляторов характерны резкие изменения расхода воздуха, а также высокая частота переключений исполнительного механизма. Это особенно выражено в моменты резкого изменения притока.

MPC-регулятор формирует сглаженное управляющее воздействие с учётом технологических ограничений. Амплитуда изменений расхода воздуха существенно ниже, при этом ограничения на минимальный и максимальный расход строго соблюдаются.

Работа MPC в условиях прогнозируемого притока

На рисунке 3 приведены изменения притока сточных вод, концентрации DO и управляющего воздействия при использовании MPC-регулятора с учётом прогнозируемого возмущения.

Несмотря на существенные колебания притока, концентрация растворённого кислорода остаётся в допустимом диапазоне 1.5-3.0 мг/л и стабилизируется вблизи уставки. Управляющее воздействие адаптируется упреждающим образом, без резких скачков.

Количественные показатели качества управления

Сравнительный анализ показал, что среднеквадратичное отклонение DO при использовании MPC-регулятора снижено на 35-45% по сравнению с нечетким PID-регулятором. Максимальное перерегулирование уменьшено более чем в два раза.

Реализация предложенного алгоритма в архитектуре PLC-SCADA с использованием режима Advisory MPC подтверждает его промышленную применимость. Использование MPC в качестве рекомендательной надстройки над существующими ПИД-контуром обеспечивает надежность, прозрачность принятия управляющих решений и возможность поэтапного внедрения без нарушения штатной эксплуатации очистных сооружений.

В целом результаты работы подтверждают целесообразность интеграции модельно-предиктивного управления, прогноза возмущений и цифровых двойников для управления энергоемкими технологическими процессами. Полученные выводы создают основу для дальнейших исследований, направленных на адаптивную идентификацию модели, учет неопределенности прогноза и промышленную апробацию разработанной системы управления.

Список литературы

1. UNESCO World Water Development Report. – Paris: UNESCO Publishing, 2023.
2. Drechsel P. The WHO Guidelines for Safe Wastewater Use in Agriculture: A Review of Implementation Challenges and Possible Solutions in the Global South / P. Drechsel, M. Qadir, D. Galibourg // Water. – 2022. – Vol. 14, № 6. – P. 864. <https://doi.org/10.3390/w14060864>.
3. Rosso D. Energy efficiency in wastewater treatment plants / D. Rosso, M.K. Stenstrom // Water Research. – 2006. – Vol. 40, № 4. – P. 737-746.
4. Energy efficiency in wastewater treatment plants / J. Ahn et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 75. – P. 1136-1143.
5. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design / M. Henze et al. – London: IWA Publishing, 2008. – 511 p.
6. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / M. Henze et al. – London: IWA Publishing, 2000. – 130 p. <https://doi.org/10.2166/9781780402369>.
7. Åström K.J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K.J. Åström, T. Hägglund. – 2nd ed. – Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. – 360 p.
8. Åmand L. Aeration control – a review / L. Åmand, G. Olsson, B. Carlsson // Water Science and Technology. – 2013. – Vol. 67, № 11. – P. 2374-2398. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.139>.
9. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. SMC-15. – № 1. – P. 116-132.
10. Meyer U. Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWTPs with pre-denitrification / U. Meyer, H.J. Pöpel // Water Science and Technology. – 2003. – Vol. 47, № 11. – P. 69-76.
11. Qin S.J. A survey of industrial model predictive control technology / S.J. Qin, T.A. Badgwell // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11, № 7. – P. 733-764.

12. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants / J. Alex et al // Proceedings of the European Control Conference (ECC 1999). – Karlsruhe, Germany, 1999. – P. 3746-3751.
13. Olsson G. ICA and me – A subjective review / G. Olsson // Water Research. – 2012. – Vol. 46, № 6. – P. 1585-1624. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.054>.
14. Kim H.-S. Fuzzy model-based predictive control of dissolved oxygen in activated sludge processes / H.-S. Kim, J.-H. Lee // Neurocomputing. – 2014. – Vol. 136. – P. 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.01.025>.
15. Åmand L. Aeration control – a review / L. Åmand, G. Olsson, B. Carlsson Aeration // Water Science and Technology. – 2013. – Vol. 67, № 11. – P. 2374-2398. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.139>.
16. Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1): Technical Report TEIE-7229 / J. Alex et al. – Lund: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2008. – 62 p.
17. Çengel Y.A. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications / Y.A. Çengel, J.M. Cimbala. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2024. – 944 p.
18. Takács I. A dynamic model of the clarification thickening process / I. Takács, G.G. Patry, D. Nolasco // Water Research. – 1991. – Vol. 25, № 10. – P. 1263-1271. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90066-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90066-Y).
19. Olsson G. Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control / G. Olsson, B. Newell. – London: IWA Publishing, 1999. – 742 p.
20. Activated Sludge Model № 1 / M. Henze et al. – London: IWA Publishing, 1986. – 33 p.
21. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery / G. Tchobanoglous et al. – New York: McGraw-Hill Education, 2014. – 2000 p.
22. Spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnika «Ochistka stochnykh vod tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya naselennykh punktov»: utv. Postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 17 maya 2025 g. № 348. – Astana, 2025. (In Russian).
23. Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // F.-J. Kahlen et al. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – P. 85-113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
24. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery / G. Tchobanoglous et al. – New York: McGraw-Hill Education, 2014. – 2049 p.
25. Montgomery J.M. Process Control of Activated Sludge Systems / J.M. Montgomery. – Lancaster: Technomic Publishing Company, 1985. – 349 p.
26. Jeppsson U. Benchmarking of Control Strategies for Wastewater Treatment Plants / U. Jeppsson, J. Alex. – London: IWA Publishing, 2003. – 141 p.
27. Ochistka stochnykh vod. Biologicheskie i khimicheskie protsessy / per. s angl. pod red. S. V. Kalyuzhno. – M.: Mir, 2004. – 480 s. (In Russian).

Т.С. Жылқыбаев, А.Д. Золотов*, Е.А. Оспанов, Д.В. Мясоедов, Р.Н. Назаров

Шәкәрім университеті,

071404, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20а

*e-mail: azol64@mail.ru

ТАЗАРТУ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАСҚАРУ МІНДЕТТЕРІНДЕГІ АЭРОТЕНКІТІҢ САҢДЫҚ ҚОСАРЛАНУЫ

Су ресурстарының тапшылығы мен экологиялық талаптардың күшеюі жағдайында ағынды суларды биологиялық тазарту процестерінің энергия тиімділігін арттыру ерекше маңызға ие болды. Аэрациялық камера қондырғының ең энергия сыйымды және динамикалық күрделі компоненттерінің бірі болып табылады, оның жұмысына келіп түсетін ағынды сулардың шығыны мен құрамының ауытқуы қатты әсер етеді. Дәстүрлі ПИД-реттеу жүйелері ауытқулардың болжамды компенсациясын қамтамасыз етпейді және көбінесе шамадан тыс аэрацияға және энергия тұтынудың артуына әкеледі. Зерттеуде цифрлық егізге негізделген басқарудың интеллектуалды тәсілі, нейрондық желінің көмегімен келіп түсетін ағынды сулардың шығынын болжау және модельдік-болжамды басқару (МРС) ұсынылады. Цифрлық егіз биологиялық процестің динамикалық моделі болып табылады, ол негізгі күй айнымалыларын, соның ішінде субстраттың, белсенді лайдың және еріген оттегінің концентрациясын қамтиды. Нейрондық желі моделі ұзақ мерзімді статистикалық бақылаулар негізінде келіп түсетін сарқынды сулар шығынының тәуелділік

өзгергіштік коэффициентін болжау үшін қолданылады. Болжамды мәндер MPC алгоритміне өлшенген ауытқулар ретінде енгізіледі, бұл болжау функциясы бар аэрация жүйесін құруға мүмкіндік береді. Модельдеу нәтижелері ауыспалы ағын жағдайында еріген оттегі деңгейінің тұрақтануын және артық аэрацияның алдын алу есебінен энергия тұтынудың төмендеуін көрсетеді. Ұсынылған архитектура қолданыстағы өнеркәсіптік PLC-SCADA жүйелеріне консультативтік MPC режимінде енгізуге қолайлы және энергия тиімділігін, сенімділігін және экологиялық көрсеткіштерін арттырады.

Түйін сөздер: аэротенк, Ағынды суларды биологиялық тазарту, болжамды басқару (MPC), сандық егіз, энергия тиімділігі, тазарту қондырғыларын автоматтандыру, ағынның болжамы.

T. Zhylykbaev, A. Zolotov*, Y. Ospanov, D. Myasoedov, R. Nazarov

Shakarim University,

071404, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20A

*e-mail: azol64@mail.ru

THE DIGITAL TWIN OF THE AEROTANK IN THE TASKS OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF SEWAGE TREATMENT PLANTS

In the context of water scarcity and tightening environmental requirements, improving the energy efficiency of biological wastewater treatment processes has become particularly important. The aeration tank is one of the most energy-intensive and dynamically complex components units, strongly affected by the variability in influent flow and composition. Conventional PID control, do not provide predictive disturbance compensation and often result in excessive aeration and increased energy consumption. The study proposes an intelligent control approach based on a digital twin, neural network-based influent flow forecasting, and model predictive control (MPC). The digital twin represents a dynamic model of the biological process incorporating key state variables, including substrate, activated sludge, and dissolved oxygen concentrations. A neural network model is used to predict the diurnal variability coefficient of influent flow based on long-term statistical observations. The predicted values are incorporated into the MPC algorithm as measured disturbances, enabling anticipatory aeration system. Simulation results show stabilisation of dissolved oxygen under variable inflow conditions and reduces energy consumption by preventing over-aeration. The proposed architecture is suitable for implementation within existing industrial PLC-SCADA systems in advisory MPC mode and improves energy efficiency, robustness, and environmental performance.

Key words: aeration tank, biological wastewater treatment, model predictive control (MPC), digital twin, energy efficiency, wastewater treatment plant automation, SCADA, inflow forecasting.

Сведения об авторах

Тұрсынхан Саятович Жылқыбаев – преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Александр Дмитриевич Золотов* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Ербол Амангазович Оспанов – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: 78oea@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274>.

Дмитрий Викторович Мясоедов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Рашид Нагимович Назаров – преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Александр Дмитриевич Золотов* – техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Ербол Амангазұлы Оспанов – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: 78oea@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274>.

Дмитрий Викторович Мясоедов – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Рашид Нағимұлы Назаров – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Information about the authors

Tursunkhan Zhilkibaev – lecturer at the Department of Automation and Information Technology; Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Alexander Zolotov* – candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Yerbol Ospanov – PhD, Associate Professor of the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: 78oea@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274>.

Dmitry Myasoedov – Senior Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Rashid Nazarov – Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey. Kazakhstan; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Поступила в редакцию 30.03.2026

Поступила после доработки 22.05.2026

Принята к публикации 26.05.2026