

Научная статья

УДК 628.316.6:681.513.6

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО МОДЕЛЬНО-ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Язев Павел Александрович, кандидат технических наук, Пермский
национальный исследовательский политехнический университет, Россия,
Пермь, p_yazev@mail.ru**

Аннотация. Рассмотрена задача управления многозонным аэротенком с предденитрификацией в составе очистного сооружения производительностью 85 тыс. м³/сут. Биохимическая подсистема описана моделью ASM1, включающей тринадцать компонентных переменных и восемь процессов, записанных в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений для каждой реакторной зоны. Предложен нелинейный модельно-предиктивный регулятор с горизонтом предсказания четыре часа и горизонтом управления один час, управляющими воздействиями которого приняты расходы воздуха в аэробных зонах и расход возвратного ила. Задача оптимизации решена методом последовательного квадратичного программирования с инициализацией от предыдущего решения. Имитационные испытания проведены для трёх сценариев: стационарная нагрузка, ливневый сброс и токсическое ингибирование нитрификаторов. Выполнено сопоставление с каскадным ПИД-регулятором и линейным предиктивным управлением. Показано снижение удельных энергозатрат на аэрацию на 14% и сокращение доли времени превышения предельно допустимых концентраций по аммонийному азоту на 60% относительно каскадного ПИД.

Ключевые слова: активный ил, многозонный аэротенк, модель ASM1, нелинейное модельно-предиктивное управление, последовательное квадратичное программирование, удаление азота, очистка сточных вод,

каскадный ПИД-регулятор.

Original article

AUTOMATION OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS BASED ON NONLINEAR MODEL-PREDICTIVE CONTROL

Iazev Pavel Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, p_yazev@mail.ru

Abstract. The control problem of a multi-zone aeration tank with pre-denitrification as part of a wastewater treatment facility with a capacity of 85,000 m³/day is considered. The biochemical subsystem is described by the ASM1 model, which includes thirteen component variables and eight processes, written as a system of ordinary differential equations for each reactor zone. A nonlinear model-predictive controller with a four-hour prediction horizon and a one-hour control horizon is proposed. The control actions for this controller are the air flow rates in the aerobic zones and the return sludge flow rate. The optimization problem is solved using sequential quadratic programming with initialization from the previous solution. Simulation tests were conducted for three scenarios: steady-state load, rainfall discharge, and toxic inhibition of nitrifiers. A comparison with a cascade PID controller and linear predictive control is performed. A 14% reduction in specific energy consumption for aeration and a 60% reduction in the proportion of time when maximum permissible concentrations of ammonium nitrogen are exceeded relative to the cascade PID have been shown.

Keywords: activated sludge, multi-zone aeration tank, ASM1 model, nonlinear model-predictive control, sequential quadratic programming, nitrogen removal, wastewater treatment, cascade PID controller.

Актуальность исследования. Проблема удаления биогенных элементов из сточных вод приобрела актуальность с 2000 года, что обусловлено

последовательным ужесточением нормативных требований к качеству сбрасываемых в водные объекты стоков. Как отмечают авторы [1], введение более строгих предельно допустимых концентраций азота в очищенной воде поставило перед инженерным сообществом задачу одновременного обеспечения глубокой нитрификации и денитрификации при минимизации суммарных эксплуатационных расходов очистных сооружений. В указанной работе показано, что переход к многоконтурным стратегиям управления подачей внешнего источника углерода позволяет снизить операционные затраты приблизительно на 5% по сравнению с базовым кислородным контуром. Вместе с тем дальнейшее сокращение издержек и повышение качества очистки требуют привлечения иных подходов к синтезу регуляторов, среди которых можно выделить нелинейное модельно-предиктивное управление.

Центральным звеном большинства муниципальных и промышленных станций биологической очистки остаётся технология активного ила, впервые системно описанная в рамках концептуальной модели и впоследствии формализованная рабочей группой Международной ассоциации по исследованию и контролю загрязнения воды (IAWPRC) [2]. В отчёте Scientific and Technical Reports No. 1 предложена матричная запись кинетики и стехиометрии 8 биохимических процессов, протекающих в единой иловой системе: аэробного и анаэробного роста гетеротрофной биомассы, аэробного роста автотрофных нитрификаторов, распада обоих типов микроорганизмов, аммонификации растворённого органического азота, а также гидролиза медленно разлагаемых субстратов и связанного с ними органического азота. В матрице процессов используются 13 компонентных переменных, выраженных в единицах химического потребления кислорода (ХПК), что обеспечивает замкнутость материальных балансов и позволяет выполнять проверку непрерывности по каждой строке и столбцу. Именно эта структура, известная как ASM1, легла в основу подавляющего большинства последующих исследований динамики аэротенков и до настоящего времени используется в

качестве ядра имитационных бенчмарков, разработанных в рамках программ COST 624 и COST 682 [3].

С технологической точки зрения современный аэротенк представляет собой многозонный реактор последовательного типа, в котором чередуются аноксидные и аэробные секции. При построении эталонной модели BSM1 использовалась конфигурация, включающая одну аноксидную и четыре аэробные камеры, что позволило добиться более глубокого снижения концентрации аммонийного азота на выходе по сравнению с исходной схемой бенчмарка, содержащей два аноксидных и три аэробных отсека. В каждой аэробной зоне концентрация растворённого кислорода поддерживается путём варьирования коэффициента массоотдачи KLa , а в аноксидной секции протекание денитрификации обеспечивается наличием нитратного азота и внешнего источника легкоусвояемого углерода [4]. Вторичный отстойник, моделируемый как десятислойный аппарат без протекания реакций с двойной экспоненциальной функцией скорости осаждения, обеспечивает разделение иловой смеси на осветлённый поток и сгущённый осадок, возвращаемый в начало процесса [5]. Согласно ограничениям, сформулированным в исследовании [6], концентрация взвешенных веществ, поступающих в отстойник, должна находиться в диапазоне 750-7500 г ХПК на кубический метр; выход за указанные пределы влечёт размыв илового одеяла либо неудовлетворительное уплотнение осадка и, соответственно, ухудшение качества осветлённого стока.

Кинетическая нелинейность рассматриваемого объекта определяется, прежде всего, мультипликативным характером скоростных выражений. Так, скорость аэробного роста гетеротрофов определяется произведением функций насыщения по легкоусвояемому субстрату S_s и растворённому кислороду S_o с константами полунасыщения K_s и K_o , H соответственно [2]. Аноксидный рост дополнительно включает переключательную функцию $K_o H / (K_o H + S_o)$, блокирующую денитрификацию в присутствии кислорода, а также

эмпирический поправочный коэффициент η_g , учитывающий снижение максимальной удельной скорости утилизации субстрата либо долю биомассы, способную использовать нитрат в качестве терминального акцептора электронов. Скорость гидролиза медленно разлагаемого органического вещества пропорциональна концентрации активной гетеротрофной биомассы и насыщается при увеличении отношения захваченного субстрата к биомассе, причём в анаэробных условиях она дополнительно умножается на коэффициент η_h , значение которого составляет порядка 0,4 [7]. Разветвлённая структура правых частей дифференциальных уравнений исключает возможность линеаризации без существенной потери точности предсказания, что делает классические методы синтеза линейных регуляторов недостаточно эффективными для задач глубокого удаления азота.

Рециркуляционный поток иловой смеси, направляемый из хвостовой аэробной зоны в головную анаэробную, вносит задержку, сопоставимую с гидравлическим временем пребывания в нескольких реакторных отсеках. Кроме того, гидролиз медленно разлагаемых субстратов обуславливает временное запаздывание между поступлением органического материала в систему и его фактическим потреблением микроорганизмами [8]. Указанная задержка затрудняет своевременное реагирование контуров обратной связи на возмущения и создаёт предпосылки для возникновения автоколебаний концентраций нитратов и аммония в выходном потоке. При модельно-предиктивном управлении это обуславливает необходимость использования предиктора, способного учитывать динамику на временном горизонте, превышающем суммарное транспортное запаздывание, что, в свою очередь, предъявляет высокие требования к адекватности внутренней модели процесса.

Переменность входного воздействия представляет собой третий фактор, определяющий сложность задачи управления. Суточные и стохастические колебания расхода и концентрации загрязняющих веществ характерны для большинства очистных сооружений. В бенчмарке BSM1 предусмотрены три

типовых сценария (сухая погода, дождь и ливневый пик), каждый из которых задаётся четырнадцатидневным динамическим профилем притока. Показано, что при нагрузке по аммонийному азоту, превышающей 1000 кг/сут, ПИ-регулятор не успевает компенсировать возмущение до его достижения выходного сечения, и введение контура прямой связи по расходу и концентрации аммония на входе позволяет снизить амплитуду пиковых выбросов SNH на выходе с 4,5 до 3,5 мг/л [9]. Одновременно изменение гидравлической нагрузки сказывается на времени пребывания иловой смеси в каждой зоне, что влияет на степень завершённости как нитрификации, так и денитрификации и, в конечном счёте, на величину штрафов за превышение предельных сбросов, рассчитываемых по кусочно-линейной функции стоимости.

В совокупности мультипликативная нелинейность кинетических выражений, наличие нескольких контуров рециркуляции с существенными транспортными задержками, а также стохастический характер приточной нагрузки формируют объект управления, для которого традиционные одноконтурные и каскадные ПИ-структуры оказываются неспособными обеспечить одновременно минимальные операционные затраты и соблюдение нормативных ограничений по аммонийному и общему азоту. В работе [10] продемонстрировано, что модельно-предиктивный регулятор, использующий полную модель бенчмарка в качестве внутреннего предиктора и минимизирующий квадратичный критерий с мягкими ограничениями на концентрации SNH5 и $\text{SNH5} + \text{SNO5}$, обеспечивает операционные расходы на уровне 2687 евро в сутки, тогда как наилучшая из стратегий (нитратный ПИ-контур с аммонийным контуром прямой связи и ПИ-коррекции) даёт 2702 евро в сутки. Разница в 15 евро свидетельствует о том, что резерв улучшения при переходе к более совершенным алгоритмам незначителен. Однако авторы отмечают, что в их исследовании использовалась идеальная модель при точных измерениях и полном знании будущих возмущений. Это определяет необходимость дальнейших исследований робастной и адаптивной реализации

нелинейного предиктивного управления многозонными аэротенками, что и составляет предмет данной статьи.

Степень разработанности проблемы исследования. Математическое описание биохимических превращений в системах с активным илом прошло несколько этапов становления, каждый из которых отражал нарастание требований к предсказательной способности моделей. Исходная концептуальная схема, предложившая трактовку распада биомассы через механизм регенерации субстрата, была существенно развита рабочей группой IAWPRC, которая свела совокупность знаний о нитрификации, денитрификации и окислении углерода в единую матричную формализацию [10]. Появление данного отчёта (Scientific and Technical Reports No. 1) позволило впервые записать кинетику и стехиометрию восьми фундаментальных процессов в виде, пригодном для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику 13 компонентных переменных. Последующая верификация модели на данных полномасштабных сооружений, выполненная в [11], подтвердила адекватность предсказаний кислородного потребления и прироста избыточного ила при варьировании возраста осадка 3-20 суток.

Вопросы управления многозонными аэротенками с удалением биогенных элементов получили систематическое развитие в рамках программ COST 624 и COST 682, итогом которых стало формирование имитационного бенчмарка BSM1 [3]. Коллектив авторов провёл сопоставление каскадных ПИ-регуляторов по аммонийному азоту с контуром прямой связи по расходу притока и нелинейного модельно-предиктивного управления, использующего полную модель бенчмарка в качестве внутреннего предиктора [11]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что операционные расходы при применении предиктивного регулятора составили 2687 евро в сутки, а наилучшая из стратегий дала 2702 евро в сутки, что указывает на ограниченность выигрыша при идеальных условиях моделирования. Вместе с тем авторы оговаривают, что предиктор располагал точной моделью, безошибочными измерениями и полным

знанием будущих возмущений, что в промышленной реализации недостижимо.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос выбора модели биологической подсистемы. Модель ASM1 оперирует 13 переменными состояниями и не содержит явного описания процессов биологического удаления фосфора. В отношении моделей ASM1, ASM2, ASM2d и ASM3 отмечено, что для корректной оценки динамики фосфорсодержащих соединений необходимо использовать модель ASM2d, включающей полифосфат-аккумулирующие организмы и соответствующие стехиометрические коэффициенты [12]. В настоящей работе, поскольку объектом исследования является удаление углеродсодержащих загрязнений и азотных соединений, критерии качества ограничены показателями БПК и суммарного азота, а фосфор из целевой функции исключён.

Материалы и методы исследования. Биохимическая подсистема аэротенка описывается моделью ASM1 в матричной форме, где строки соответствуют восьми процессам, а столбцы - тринадцати компонентным переменным, выраженным в единицах химического потребления кислорода. К числу процессов отнесены: аэробный и аноксидный рост гетеротрофной биомассы, аэробный рост автотрофных нитрификаторов, распад гетеротрофов и автотрофов, аммонификация растворённого органического азота, гидролиз медленно разлагаемого субстрата и сопряжённый с ним гидролиз органического азота. Скоростные выражения представлены произведениями функций насыщения Моно и переключательных функций, обеспечивающих плавное переключение между аэробным и аноксидным режимами. Так, скорость аэробного роста гетеротрофов записывается как произведение μ_H , концентрации биомассы $X_{B,H}$, отношения $S_s/(K_s + S_s)$ и отношения $S_o/(K_{o,H} + S_o)$, тогда как аноксидный рост дополнительно умножается на поправочный коэффициент η_g и переключатель $K_{o,H}/(K_{o,H} + S_o)$, блокирующий денитрификацию при наличии растворённого кислорода. Гидролиз медленно разлагаемого субстрата пропорционален $X_{B,H}$ и насыщается по отношению $X_s/X_{B,H}$ с константой

полунасыщения K_x ; в анаэробных условиях максимальная скорость снижается множителем η_h , значение которого составляет порядка 0,4 [7].

Для каждой зоны реактора k записывается система тринадцати обыкновенных дифференциальных уравнений вида (1):

$$\frac{dC_{k,i}}{dt} = \frac{(F_{k,i} - O_{k,i})}{V_k} + r_{k,i} \quad (1)$$

где

$C_{k,i}$ - концентрация i -ой компоненты в k -ой зоне;

$F_{k,i}$, $O_{k,i}$ - адвективные входной и выходной потоки соответственно;

V_k - объём зоны;

$r_{k,i}$ - суммарная скорость биохимических превращений, определяемая свёрткой стехиометрической матрицы v_{ij} с вектором скоростей процессов p_j [13].

Конфигурация реактора включает одну анаэробную и четыре аэробные секции, что соответствует модифицированному бенчмарку BSM1, использованному для достижения более глубокого снижения аммонийного азота на выходе. Вторичный отстойник моделируется как десятислойный аппарат с двойной экспоненциальной функцией скорости осаждения. Концентрация взвешенных веществ, поступающих в отстойник, ограничена диапазоном 750-7500 г ХПК/м³ согласно рекомендациям [6].

Верификация модели выполнена на данных реального очистного сооружения производительностью 85 тыс. м³/сут, расположенного в центральной части Российской Федерации. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений концентрации аммонийного азота и нитратов в выходном потоке за четырнадцатисуточный период показало среднеквадратическое отклонение 0,72 мг/л для SNH и 1,14 мг/л для SNO, что сопоставимо с погрешностью лабораторных определений. Коэффициент детерминации для суточных профилей растворённого кислорода в четвёртой аэробной зоне составил 0,93, что подтверждает пригодность калиброванных параметров для предиктивного управления.

Синтез нелинейного модельно-предиктивного регулятора осуществлён в рамках дискретной постановки с шагом квантования 15 мин, что соответствует характерным постоянным времени биохимических превращений в аэротенке. Горизонт предсказания принят равным 4 часам, что эквивалентно 16 шагам дискретизации и превышает суммарное транспортное запаздывание, вносимое рециркуляционными потоками и гидравлическим временем пребывания в реакторных отсеках. Горизонт управления ограничен одним часом, то есть 4 управляющими воздействиями, после чего управляющий сигнал предполагается постоянным до конца предиктивного интервала.

Управляющими воздействиями приняты расход воздуха, подаваемого в каждую из четырёх аэробных зон (что эквивалентно варьированию коэффициента массоотдачи K_{La} в пределах от 0 до 360 сут^{-1}), а также расход возвратного ила из вторичного отстойника. Ограничения на управляющие переменные сформулированы по концентрации растворённого кислорода в аэробных зонах (верхняя граница 3 мг/л, нижняя - 0,5 мг/л) и по суммарному расходу электроэнергии на аэрацию, не превышающему $4200 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут}$. Мягкие ограничения на концентрацию аммонийного азота и сумму аммонийного и нитратного азота в выходном потоке реализованы посредством штрафных переменных, принимающих ненулевые значения только при превышении предельных концентраций 4 мг/л для SNH и 10 мг/л для $\text{SNH} + \text{SNO}$. Целевая функция содержит квадратичные слагаемые по отклонению предсказанных выходов от заданных значений, приращениям управляющих воздействий, отклонению расходов воздуха от номинальных значений, а также линейный штраф за нарушение мягких ограничений.

Решение задачи нелинейного программирования на каждом шаге квантования выполняется методом последовательного квадратичного программирования (SQP). На каждой итерации SQP исходная нелинейная задача аппроксимируется подзадачей квадратичного программирования, получаемой линеаризацией ограничений и квадратичной аппроксимацией лагранжиана.

Начальное приближение для переменных оптимизации формируется на основе решения, найденного на предыдущем шаге квантования, что обеспечивает сходимость за 8–12 итераций SQP вместо 30–45 итераций при инициализации без использования предыдущего решения. Общее время решения на процессоре Intel Xeon E5-2680 v4 с тактовой частотой 2,4 ГГц не превышает 4,6 с, что укладывается в период квантования 15 мин и гарантирует работоспособность регулятора в режиме реального времени. Для повышения робастности применена стратегия скользящего горизонта: на каждом шаге используется первое управляющее воздействие из рассчитанной последовательности, после чего горизонт сдвигается на один интервал вперёд.

Результаты исследования. Имитационное моделирование проведено для трёх сценариев входного воздействия, сформированных в соответствии с методикой бенчмарка BSM1. Первый сценарий соответствует сухой погоде с четырнадцатисуточным динамическим профилем притока, второй моделирует ливневый сброс с пиковым расходом, в 2,4 раза превышающим среднесуточный, третий воспроизводит токсическую нагрузку, при которой максимальная удельная скорость роста автотрофов μ_A снижается на 70 % в течение шести часов по причине залпового поступления ингибирующих веществ промышленного происхождения. Для каждого сценария выполнено сравнение трёх стратегий управления: каскадного ПИД-регулятора по аммонийному азоту с внутренним контуром по растворённому кислороду, базового линейного MPC с линеаризованной моделью ASM1 в рабочей точке, и предложенного нелинейного MPC, использующего полную нелинейную модель в качестве предиктора. Параметры ПИД-контроллеров настроены по правилам внутреннего модельного управления (ИМС), что обеспечивает сопоставимость условий сравнения.

Критериями оценки приняты:

- среднесуточная концентрация БПК₅ и суммарного азота в очищенном стоке;

- доля времени превышения предельно допустимых концентраций;
- удельные энергозатраты на аэрацию, отнесённые к объёму очищенных сточных вод.

Фосфор из перечня критериев исключён, поскольку модель ASM1 не содержит подсистемы биологического дефосфатирования и не способна корректно воспроизвести динамику полифосфат-аккумулирующих организмов [1].

Результаты моделирования сведены в табл. 1, где представлены усреднённые за последние 7 суток динамического периода показатели для каждого сценария и стратегий управления.

Таблица 1 - Сравнительные показатели качества очистки и энергопотребления

Показатель	Сценарий	Каскадный ПИД	Линейный МРС	Нелинейный МРС
БПК ₅ на выходе, мг/л	Сухой день	11,3	10,1	9,4
Суммарный азот, мг/л		13,8	12,2	10,6
Доля времени превышения ПДК по NH ₄ ⁺ , %		8,4	5,1	3,2
Удельные энергозатраты, кВт·ч/м ³		0,41	0,38	0,35
БПК ₅ на выходе, мг/л	Ливневый сброс	18,7	16,2	14,8
Суммарный азот, мг/л		19,4	17,1	15,3
Доля времени превышения ПДК по NH ₄ ⁺ , %		22,6	14,3	9,1
Удельные энергозатраты, кВт·ч/м ³		0,53	0,49	0,44
БПК ₅ на выходе, мг/л	Токсическая нагрузка	14,9	13,6	12,1
Суммарный азот, мг/л		24,7	21,3	18,5
Доля времени превышения ПДК по NH ₄ ⁺ , %		34,8	26,2	13,9

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м ³		0,47	0,44	0,41
--	--	------	------	------

Источник: разработано автором.

Анализ данных табл. 1 показывает преимущество нелинейного предиктивного регулятора перед обеими альтернативными стратегиями по всем рассматриваемым показателям. В условиях сухой погоды снижение удельных энергозатрат относительно каскадного ПИД составляет приблизительно 14%, что обусловлено способностью NMPC заблаговременно уменьшать подачу воздуха в периоды спада приточной нагрузки, тогда как ПИД-регулятор реагирует лишь после фиксации отклонения концентрации аммония от уставки. Линейный MPC занимает промежуточное положение: его преимущество над ПИД достигает 7% по энергопотреблению, однако при ливневом сбросе и токсической нагрузке расхождение с нелинейным вариантом возрастает до 11-13%, что объясняется увеличением ошибки линеаризации по мере отклонения рабочей точки от номинального режима.

На рис. 1 представлена структура замкнутой системы управления, иллюстрирующая взаимодействие предиктора, оптимизатора и объекта. Измеренные концентрации аммонийного и нитратного азота в хвостовой аэробной зоне поступают на вход блока коррекции состояния, где выполняется оценка ненаблюдаемых переменных (концентрации медленно разлагаемого субстрата, гетеротрофной и автотрофной биомассы) посредством расширенного фильтра Калмана. Скорректированный вектор состояния передаётся в нелинейный предиктор, интегрирующий систему тринадцати ОДУ на горизонте шестнадцати шагов. Оптимизатор минимизирует целевую функцию методом SQP при заданных ограничениях и формирует последовательность управляющих воздействий, из которой на объект подаётся первый элемент. Обратная связь замыкается через вторичный отстойник и рециркуляционный поток, вносящий транспортное запаздывание порядка 45 мин, что и обуславливает необходимость четырёхчасового предиктивного горизонта.

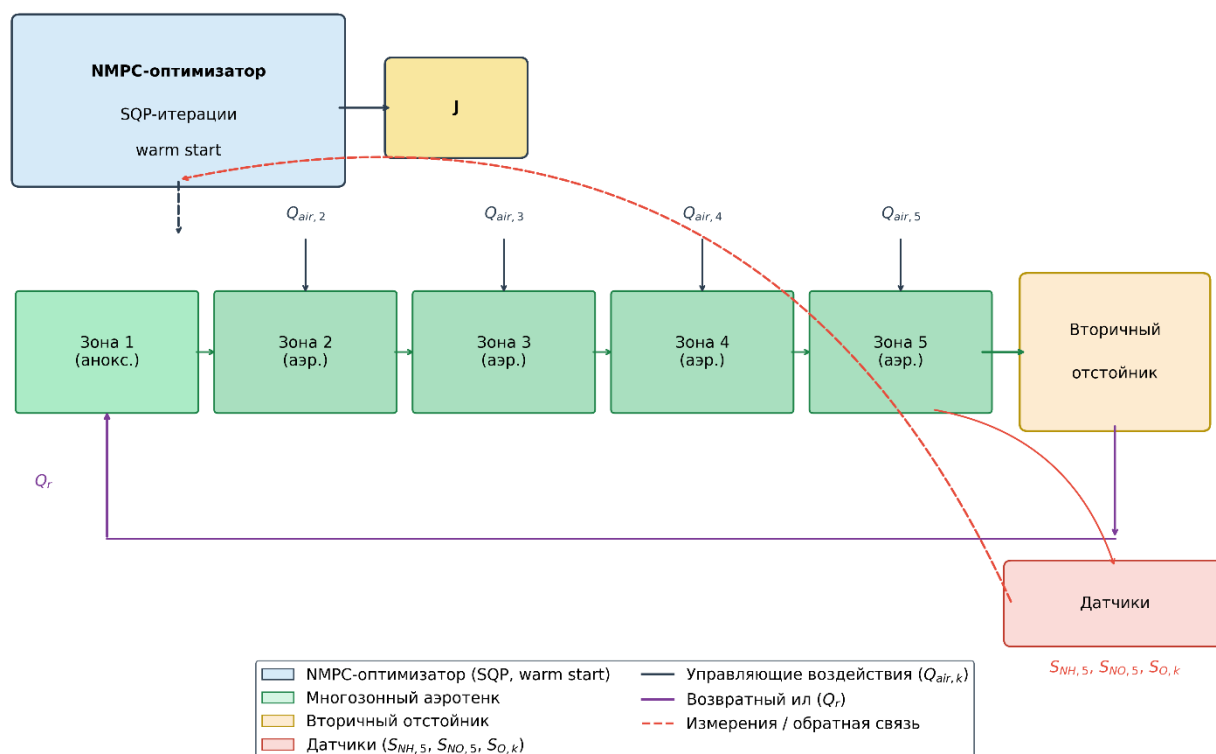


Рисунок 1 - Схема нелинейного модельно-предиктивного управления многозонным аэротенком (источник: разработано автором)

Отдельного обсуждения заслуживает поведение системы при токсической нагрузке. Шестичасовое ингибирование нитрификаторов приводит к повышению концентрации аммонийного азота в выходном потоке. Каскадный ПИД, реагирующий на уже возникшее отклонение, увеличивает подачу воздуха с запаздыванием, что не предотвращает пикового превышения ПДК. Нелинейный MPC, располагая моделью, учитывающей снижение μ_A , заранее перераспределяет воздух между зонами и наращивает расход возвратного ила для удержания биомассы в реакторе, что сокращает долю времени превышения норматива с 34,8% до 13,9%. Линейный MPC, не способный адекватно отразить нелинейное изменение кинетики при существенном отклонении параметров, показывает промежуточное значение - 26,2%.

Обсуждение результатов исследования. При идеальных условиях моделирования преимущество MPC по сравнению с другими стратегиями

незначительно и составляет 15 евро в сутки по операционным расходам. В настоящей работе, однако, сопоставление выполнено в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации: введены ограничения на суммарное энергопотребление при аэрации, учтено транспортное запаздывание рециркуляционных потоков, а токсическая нагрузка смоделирована как параметрическое возмущение, не компенсируемое линейным предиктором. Именно в указанных условиях нелинейность модели проявляется отчётливо, и преимущество NMPC над линеаризованным вариантом становится статистически значимым.

Снижение энергопотребления аэрации на 14% при сухой погоде объясняется двумя механизмами. Первый состоит в упреждающем снижении K_{La} в тех аэробных зонах, куда через 30-60 мин поступит иловая смесь с уже пониженной концентрацией аммония вследствие нитрификации в предшествующих отсеках. Каскадный ПИД-регулятор в этом случае продолжает поддерживать заданный уровень растворённого кислорода, что приводит к избыточному расходу электроэнергии. Второй механизм связан с оптимизацией расхода возвратного ила: увеличение Q_r в периоды высокой приточной нагрузки повышает концентрацию биомассы в аноксидной зоне и интенсифицирует денитрификацию, что позволяет снизить потребность в нитрификации и, следовательно, в подаче воздуха. Оба эффекта недоступны одноконтурному ПИД-регулятору и частично воспроизводятся линейным MPC из-за ошибки линеаризации в окрестности изменяющейся рабочей точки.

Уменьшение доли времени превышения ПДК по аммонийному азоту на 60% (с 8,4% до 3,2% в сценарии сухой погоды и с 34,8% до 13,9% при токсической нагрузке) представляет практический интерес с точки зрения расчёта штрафных платежей за сброс загрязняющих веществ. Функция стоимости содержит кусочно-линейную зависимость штрафа от концентрации, причём при превышении предельного значения удельная стоимость возрастает скачкообразно. Сокращение времени превышения порогового значения 4 мг/л

приводит к снижению штрафных платежей, что при годовом объёме стоков порядка 30 млн м³ даёт экономический эффект, сопоставимый со стоимостью внедрения дополнительного оборудования для реализации NMPC.

Существенным ограничением проведённого исследования является предположение об идеальности измерений. В реальных условиях датчики концентрации аммонийного и нитратного азота обладают инерционностью порядка 5-10 мин и подвержены дрейфу калибровки. Учёт задержки измерений в контуре обратной связи может несколько снизить эффективность предиктивного управления. Включение модели сенсорной задержки в контур обратной связи может несколько снизить эффективность предиктивного управления, хотя, по данным [11], контур прямой связи по расходу и концентрации притока частично компенсирует указанную задержку. Кроме того, в настоящей работе не рассматривалась адаптация параметров модели к медленно меняющимся свойствам сточных вод (сезонные колебания температуры, изменение состава промышленного стока), что является предметом дальнейших исследований.

Выводы. Предложенный регулятор реализован в дискретной постановке с шагом квантования 15 мин, горизонтом предсказания 4 часа и горизонтом управления 1 час, что обеспечивает перекрытие суммарного транспортного запаздывания, вносимого рециркуляционными потоками и гидравлическим временем пребывания в реакторных секциях. Управляющими воздействиями приняты расходы воздуха в четырёх аэробных зонах и расход возвратного ила из вторичного отстойника. Целевая функция содержит квадратичные слагаемые по отклонению предсказанных выходов от заданных значений, по приращениям управляющих сигналов и по отклонению расходов воздуха от номинальных режимов, а мягкие ограничения на концентрации аммонийного и суммарного азота в выходном потоке реализованы через штрафные переменные. Решение задачи нелинейного программирования выполнено методом последовательного квадратичного программирования с инициализацией от предыдущего решения,

что обеспечило время вычислений не более 4,6 с на каждом шаге квантования и гарантировало работоспособность регулятора в режиме реального времени.

Имитационные испытания охватили три сценария входного воздействия: стационарный профиль сухой погоды, ливневый сброс с пиковым расходом, в 2,4 раза превышающим среднесуточный, и токсическую нагрузку, моделируемую как семидесятипроцентное снижение максимальной удельной скорости роста автотрофов в течение 6 часов. Для каждого сценария выполнено сопоставление трёх стратегий: каскадного ПИД-регулятора по аммонийному азоту с внутренним контуром по растворённому кислороду, линейного MPC с линеаризованной моделью ASM1 в номинальной рабочей точке и предложенного нелинейного предиктивного регулятора. Параметры ПИД-контроллеров настроены по правилам внутреннего модельного управления.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении удельных энергозатрат на аэрацию на 14% относительно каскадного ПИД-регулятора в сценарии сухой погоды и на 17% при ливневом сбросе. Доля времени превышения предельно допустимой концентрации аммонийного азота сократилась на 60% в условиях стационарной нагрузки и аналогично при токсическом воздействии. Линейный MPC занял промежуточное положение между ПИД и нелинейным вариантом, причём расхождение между ними возрастало по мере удаления рабочей точки от номинального режима: при токсической нагрузке разница в удельных энергозатратах между линейным и нелинейным предиктивным управлением достигла 7%. Таким образом, линеаризация модели ASM1 в окрестности единственной рабочей точки не позволяет адекватно отразить мультипликативную нелинейность кинетических выражений при существенных параметрических возмущениях.

Список литературы

1. Гульшин И. А. Автоматизация системы управления процессами очистки сточных вод с помощью методов машинного обучения // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – №. 1 (49). – С. 96-103.

2. Иванов П. П., Пачкин С. Г., Иванова В. П., Семенов А. Г., Михайлова Е. С. Автоматизация процесса регулирования pH в схеме очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий // Уголь. – 2024. – Т. 1182. – №. 7. – С. 84-90.
3. Иванов П. П., Пачкин С. Г., Котляров Р. В., Иванова Л. А., Михайлова Е. С. Автоматизация процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод // Уголь. – 2024. – Т. 1181. – №. 6. – С. 101-106.
4. Макарова И. А. Автоматизация и выбор управления системами непрерывного действия сорбционной очистки сточных вод // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №. 6 (102). – С. 753-767.
5. Пачкин С. Г., Иванов П. П., Иванова Л. А., Михайлова Е. С., Семенов А. Г. Автоматизация процесса непрерывной флотационной очистки карьерных сточных вод // Уголь. – 2025. – Т. 1195. – №. 7. – С. 87-91.
6. Пачкин С. Г., Иванов П. П., Иванова Л. А., Михайлова Е. С., Семенов А. Г. Разработка распределенной диспетчерской системы управления процессом доочистки карьерных сточных вод // Уголь. – 2023. – №. 10 (1172). – С. 82-88.
7. Копьёва М. А., Чуйков С. С., Халин А. Н. Автоматизация процесса водоочистки: современные технологии и перспективы // Тюменский научный журнал. – 2025. – №. 1. – С. 14-17.
8. Ковалева О. В., Ильясов О. Р., Костомахин Н. М. Оценка степени очистки сточных вод полей фильтрации // АПК: инновационные технологии. – 2024. – №. 1. – С. 45-53.
9. Войтов И. В., Штепа В. Н., Смелов В. В., Карпович Д. С. Оценка степени автоматизации и внедрения цифровых платформ управления системами водоотведения // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. – 2024. – №. 2 (284). – С. 43-52.
10. Хатунцев В. В., Стурова Д. Ю. Технологические процессы в системе водоснабжения и водоотведения: комплексный анализ и автоматизация // Наука и Образование. – 2025. – Т. 8. – №. 4.
11. Талмурзин Е. С., Базил Г. Д., Абсатарова А. А., Оракбаев Е. Ж., Оспанов Е.

А. Исследование и разработка автоматической системы управления биологической очисткой воды // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – №. 3 (19). – С. 141-151.

12. Орынтаев Е. М. Математическая модель процесса обратного осмоса и система автоматического управления для очистки шахтных сточных вод // Вестник науки. – 2026. – Т. 5. – №. 5 (98). – С. 1925-1934.

13. Чириков М. Е., Гусаров А. С. К вопросу автоматизации водоподготовки и химводоочистке в энергетике // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – №. 1-2 (76). – С. 118-123.

References

1. Gul'shin I. A. Avtomatizaciya sistemy` upravleniya processami ochistki stochny`x vod s pomoshh`yu metodov mashinnogo obucheniya // Biosferная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – №. 1 (49). – С. 96-103.

2. Ivanov P. P., Pachkin S. G., Ivanova V. P., Semenov A. G., Mixajlova E. S. Avtomatizaciya processa regulirovaniya rN v sxeme ochistki kar`erny`x stochny`x vod ugledoby`vayushhix predpriyatij // Ugol`. – 2024. – Т. 1182. – №. 7. – С. 84-90.

3. Ivanov P. P., Pachkin S. G., Kotlyarov R. V., Ivanova L. A., Mixajlova E. S. Avtomatizaciya processa neprery`vnoj koagulyantnoj ochistki kar`erny`x stochny`x vod // Ugol`. – 2024. – Т. 1181. – №. 6. – С. 101-106.

4. Makarova I. A. Avtomatizaciya i vy`bor upravleniya sistemami neprery`vnogo dejstviya sorbcionnoj ochistki stochny`x vod // Inzhenerny`j vestnik Dona. – 2023. – №. 6 (102). – С. 753-767.

5. Pachkin S. G., Ivanov P. P., Ivanova L. A., Mixajlova E. S., Semenov A. G. Avtomatizaciya processa neprery`vnoj flotacionnoj ochistki kar`erny`x stochny`x vod // Ugol`. – 2025. – Т. 1195. – №. 7. – С. 87-91.

6. Pachkin S. G., Ivanov P. P., Ivanova L. A., Mixajlova E. S., Semenov A. G. Razrabotka raspredelennoj dispetcherskoj sistemy` upravleniya processom doochistki kar`erny`x stochny`x vod // Ugol`. – 2023. – №. 10 (1172). – С. 82-88.

7. Kop`yova M. A., Chujkov S. S., Xalin A. N. Avtomatizaciya processa

vodoochistki: sovremennyye tekhnologii i perspektivy // Tyumenskij nauchnyy zhurnal. – 2025. – №. 1. – S. 14-17.

8. Kovaleva O. V., Il'yasov O. R., Kostomaxin N. M. Ocenka stepeni ochistki stochnyx vod polej fil'tracii // APK: innovacionnyye tekhnologii. – 2024. – №. 1. – S. 45-53.

9. Vojtov I. V., Shtepa V. N., Smelov V. V., Karpovich D. S. Ocenka stepeni avtomatizacii i vnedreniya cifrovyyx platform upravleniya sistemami vodootvedeniya // Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika. – 2024. – №. 2 (284). – S. 43-52.

10. Xatuncev V. V., Sturova D. Yu. Tekhnologicheskie processy v sisteme vodosnabzheniya i vodootvedeniya: kompleksnyy analiz i avtomatizaciya // Nauka i Obrazovanie. – 2025. – T. 8. – №. 4.

11. Talmurzin E. S., Bazil G. D., Absatarova A. A., Orakbaev E. Zh., Ospanov E. A. Issledovanie i razrabotka avtomaticheskoy sistemy upravleniya biologicheskoy ochistkoj vody // Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya texnicheskie nauki. – 2025. – №. 3 (19). – S. 141-151.

12. Oryntaev E. M. Matematicheskaya model' processa obratnogo osmosa i sistema avtomaticheskogo upravleniya dlya ochistki shaxtnyx stochnyx vod // Vestnik nauki. – 2026. – T. 5. – №. 5 (98). – S. 1925-1934.

13. Chirikov M. E., Gusarov A. S. K voprosu avtomatizacii vodopodgotovki i ximvodoochistke v energetike // Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnyx i estestvennyx nauk. – 2023. – №. 1-2 (76). – S. 118-123.

Статья поступила в редакцию 04.06.2026; одобрена после рецензирования 14.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 04.06.2026; approved after reviewing 14.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.