АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В ПРОЦЕССАХ АЭРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД

Махмудов М.И., Нуров С.С.
Бухарский государственный технический университет

Мамиров У.Ф.
Ташкентский государственный технический университет

Васильев М.А.
ООО "Кнауф ГИПС БУХАРА"
https://doi.org/10.5281/zenodo.21888178

Аннотация. В данной работе изучены факторы, влияющие на эффективность процесса аэрации сточной воды, в частности на концентрацию растворенного кислорода, который определяет в большой степени качества процесса аэрации. Приведены параметры с указанием их характеристики влияния на текущее значение уровня кислорода в аэротенке. Также в работе предложен система управления процессом аэрации, основанной на нечеткую логику управления, которая в последнее время набирает все более широкий масштаб применения в системах управления технологическими процессами и производства. Проведен сравнительный анализ преимущества и недостаток данного метода с классическим ПИД регулированием. Разработана математическая модель нечеткой логики управления процессом аэрации на основе метода Мамдани и база правил управления параметрами входных и выходных сигналов в текущий момент времени.
Ключевые слова: Аэрация, концентрация растворенного кислорода, сточная вода, нечеткая логика, фаззификация.

Abstract. This study investigates the factors affecting the efficiency of the wastewater aeration process, particularly the concentration of dissolved oxygen, which largely determines the quality and effectiveness of aeration. The main parameters are presented along with their characteristics and their influence on the current dissolved oxygen concentration in the aeration tank. The study also proposes an aeration process control system based on fuzzy logic, which has recently gained widespread application in industrial and technological process control systems. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of the proposed method in relation to conventional PID control is presented. A mathematical model for fuzzy logic control of the aeration process based on the Mamdani inference method was developed, together with a rule base for controlling the input and output parameters according to their current values.
Keywords: aeration, dissolved oxygen concentration, wastewater, fuzzy logic, fuzzification.

Annotatsiya. Ushbu ishda oqova suvlarni aeratsiyalash jarayonining samaradorligiga, xususan, aeratsiya jarayoni sifatini belgilovchi asosiy ko‘rsatkichlardan biri bo‘lgan erigan kislorod konsentratsiyasiga ta’sir etuvchi omillar o‘rganilgan. Aerotenkdagi erigan kislorod miqdorining joriy qiymatiga ta’sir ko‘rsatuvchi asosiy parametrlar va ularning ta’sir xususiyatlari keltirilgan. Shuningdek, ishda so‘nggi yillarda texnologik va ishlab chiqarish jarayonlarini boshqarish tizimlarida keng qo‘llanilayotgan noaniq mantiq (fuzzy logic) asosidagi aeratsiya jarayonini boshqarish tizimi taklif etilgan. Mazkur usulning an’anaviy

PID rostlash usuliga nisbatan afzalliklari va kamchiliklari qiyosiy tahlil qilingan. Mamdani usuli asosida aeratsiya jarayonini noaniq mantiq yordamida boshqarishning matematik modeli ishlab chiqilgan hamda kirish va chiqish signallari parametrlarining joriy qiymatlariga asoslangan boshqaruv qoidalari bazasi shakllantirilgan.

Kalit so‘zlar: aeratsiya, erigan kislorod konsentratsiyasi, oqova suv, noaniq mantiq, fazzifikatsiya.

Введение. В настоящее время концентрация растворенного кислорода (КРК) является одним из наиболее важных параметров для контроля из-за его влияния на биологические процессы и экономию энергии, связанную с аэрацией. Концентрация растворенного кислорода в процессе аэробной биологической очистки должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить микроорганизмы в активном иле достаточным количеством кислорода для эффективного разложения органических веществ [1]. С другой стороны, слишком высокая концентрация РК, требующая высокой скорости подачи воздуха, приводит к повышенному энергопотреблению и может ухудшить качество активного ила. Оптимальное содержание РК обеспечивает эффективное разложение органических веществ активным илом, минимизируя эксплуатационные затраты и обеспечивая соответствие нормативным требованиям по качеству очищенной воды.

На концентрацию РК влияет множество факторов, включая физико-химические, технологические и экологические параметры. В случае технологии аэробной биологической очистки сточных вод, измерительные приборы, управление и автоматизация являются ключевыми факторами, когда процесс должен быть настроен для достижения строгих нормативов сброса. Таким образом, как по экономическим, так и по технологическим причинам контроль концентрации растворенного кислорода представляет значительный интерес. Управление процессом аэрации осложняется неопределенностью, связанной с изменчивостью входных параметров и сложностью их взаимодействия. В данной статье рассматриваются ключевые факторы, влияющие на КРК, их математические модели, а также возможности применения методов нечеткой логики - фаззификации для оптимизации управления аэрацией.

Эффективная работа процесса аэробной очистки ограничена и затруднена, поскольку на нее влияет множество физических, химических и биологических факторов. Классические методы управления - включение/выключение и ПИД-регуляторы, широко использовались, но из-за нелинейного характера биопроцессов и отсутствия доступных моделей регуляторы разрабатывались для конкретных эксплуатационных и экологических условий. Наиболее значительное преимущество интеллектуального управления заключается в том, что не требуется точная математическая модель, которая может эффективно аппроксимировать любую нелинейную непрерывную функцию и устранять недостатки традиционного управления, чрезмерно зависящего от точной математической модели. В данном изобретении разработан интегрированный нейро-нечеткий контроллер процесса для прогнозирования и управления производительностью аэрации в процессе аэробной очистки сточных вод. С использованием такого гибридного алгоритма нечеткого управления предложенный контроллер может определять оптимальную скорость подачи воздуха в течение эксплуатационного периода, что в конечном итоге позволяет экономить энергию.

Концентрация КРК в аэротенке определяется балансом между поступлением кислорода за счет аэрации и его потреблением микроорганизмами, химическими реакциями. Основные факторы, влияющие на КРК, можно классифицировать следующим образом:

Интенсивность аэрации: Скорость подачи воздуха (объем воздуха, подаваемого в единицу времени, м³/ч) и тип аэраторов определяют эффективность массопереноса кислорода. Более высокая интенсивность увеличивает КРК, но повышает энергозатраты. Эффективность массопереноса кислорода зависит от размера пузырьков (мелко пузырьковые аэраторы более эффективны) и глубины погружения аэраторов [2]. Мелко пузырьковые аэраторы обеспечивают коэффициент массопереноса кислорода K_L в диапазоне 3-10 ч⁻¹, тогда как крупно пузырьковые – 1-4 ч⁻¹. Стандартная эффективность переноса кислорода для мелко пузырьковых систем: 4-8% на метр глубины погружения. При подаче воздуха 0,5-2 м³/м³·ч (на кубический метр аэротенка в час) КРК может поддерживаться на уровне 1,5-3 мг/л при типичной органической нагрузке. Исследования показывают, что увеличение интенсивности аэрации на 10% повышает DO на 0,5-1 мг/л, но увеличивает энергопотребление на 8-15%. Энергозатраты на аэрацию **составляют 50–70%** от общей энергии очистных сооружений.

Температура. Еще одним фактором, оказывающим влияние на биологическую очистку сточных вод, является температура исходных сточных вод и температура наружного воздуха. Средняя температура сточных вод в городах России в холодное время года колеблется от 15 до 17°С, температура вод в небольших и средних поселках 9 - 14°С. В аэротенках с обычным режимом аэрации при температуре воздуха от 10 до20°С, температура стоков за время обработки падает на 1 - 3°С, в аэротенках с продленным режимом аэрации, с перекрытием из щитов, на 4 - 9°С, что приводит к замедлению или полному прекращению процесса биохимической очистки сточных вод. В странах с жарким климатом высокие температуры сточных вод и воздуха и прямые солнечные лучи способствуют повышению температуры обрабатываемых стоков до 35°С и выше, что также отрицательно сказывается на растворимости кислорода воздуха и скорости процесса очистки стоков [3]. Выполнение очистных сооружений канализации в закрытом исполнении частично решает проблемы охлаждения или нагрева очищаемой жидкости. Но основным направлением оптимизации температурного режима работы сооружений, является повышение коэффициента использования кислорода воздуха.

Концентрация активного ила $К_{аи}$: Высокая концентрация активного ила г/л, увеличивает потребление кислорода микроорганизмами для метаболизма и разложения органики, снижая КРК [4]. Низкий $К_{аи}$ может привести к недостаточной биомассе, что также влияет на баланс КРК. Типичный диапазон: 2-5 г/л для стандартных аэротенков, 8-12 г/л для мембранных биореакторов. Увеличение $К_{аи}$ с 3 до 5 г/л повышает скорость потребления кислорода на 30-50%, снижая DO на 0,5-1,5 мг/л при неизменной аэрации. OUR для активного ила: 10-30 мг O_2/г $К_{аи}$·ч при BOD 100-300 мг/л. Высокий $К_{аи}$ >6 г/л может снизить DO до $К_{аи}$<1 мг/л, что подавляет нитрификацию на 50–70%. Оптимальный $К_{аи}$ (3–4 г/л) обеспечивает баланс между DO и эффективностью очистки. Например: при $К_{аи}$ 4 г/л и BOD 200 мг/л OUR составляет около 80 мг/л·ч, что требует подачи воздуха 1,5 м³/ч для поддержания DO 2 мг/л.

Органическая нагрузка (БПК, ХПК): БПК отражает количество кислорода, необходимое для аэробного разложения биоразлагаемых органических веществ микроорганизмами. Высокая БПК в поступающих сточных водах увеличивает потребность в кислороде в аэротенке [5]. Если система аэрации не обеспечивает достаточного количества растворенного кислорода (обычно требуется поддерживать уровень 1–2 мг/л), процесс разложения замедляется, что снижает эффективность очистки. Недостаток кислорода может привести к переходу от аэробных условий к

анаэробным, вызывая накопление продуктов неполного разложения (например, сероводорода), ухудшение качества очистки и появление неприятных запахов. **ХПК** показывает общее содержание органических веществ, которые могут быть окислены химическим путем. Высокий **ХПК** указывает на значительную органическую нагрузку, но часть веществ, входящих в **ХПК**, может быть трудно разлагаемой или токсичной для микроорганизмов в аэротенке. Это увеличивает нагрузку на систему аэрации, так как требуется больше кислорода для окисления доступных органических соединений. Если отношение **БПК** / **ХПК** низкое <0,3, это указывает на преобладание не биоразлагаемых веществ, что снижает эффективность биологической очистки и требует дополнительных методов обработки (например, химической коагуляции). Высокая органическая нагрузка **БПК** и **ХПК** увеличивает потребность в кислороде в аэротенке, усложняя поддержание оптимального кислородного режима КРК. Это требует усиленной аэрации, увеличивает энергозатраты и может снижать эффективность очистки при перегрузке. Для стабильной работы аэротенка необходимо контролировать органическую нагрузку, регулировать подачу кислорода и, при необходимости, использовать предварительную очистку сточных вод.

pH-это мера кислотности или щелочности раствора, которая показывает концентрацию ионов водорода H^+ в среде. pH влияет на активность микроорганизмов и химические реакции, изменяя потребление кислорода. pH регулирует активность микроорганизмов и скорость химических реакций, напрямую влияя на потребление кислорода [6]. Оптимальный pH обеспечивает максимальную биологическую и химическую активность, тогда как экстремальные значения (слишком низкий или высокий pH) подавляют эти процессы или смещают их в сторону специфических реакций. Оптимальный pH: Большинство микроорганизмов имеют диапазон pH, при котором их ферменты работают наиболее эффективно (обычно pH 6-8 для нейтрофилов). Отклонение от этого диапазона снижает активность ферментов, замедляя метаболизм и потребление кислорода. Также pH изменяет скорость окисления веществ и растворимость газов. Например, в кислой среде некоторые реакции ускоряются, увеличивая потребление кислорода, а в щелочной - замедляются. Аэробные микроорганизмы используют кислород для разложения органики. Если pH не оптимален, их активность падает, и потребление кислорода уменьшается. Химические процессы, зависящие от pH, также влияют на скорость использования O_2.

Для описания динамики КРК в аэротенках используются математические модели, основанные на уравнениях массопереноса и кинетики биологических процессов [7]. Основные подходы включают:

Уравнение массопереноса кислорода. Концентрация РК описывается дифференциальным уравнением, учитывающим поступление и потребление кислорода, так называемом уравнением:

$$\frac{dC}{dt}=K_L a\left(C_s-C_{рк}\right)-v_{пк}$$

где:

$C_{рк}$- концентрация растворенного кислорода (мг/л),

K_L - коэффициент массопереноса кислорода ($ч^{-1}$),

C_s - концентрация насыщения кислорода (мг/л),

$v_{пк}$ - скорость потребления кислорода (мг/л·ч).

Коэффициент K_L зависит от: Интенсивности аэрации, Температуры $\left((K_L a \propto T^{0.024})\right)$, Солесодержания и ПАВ.

$v_{пк}$ - скорость потребления кислорода зависит от концентрации активного ила и органической нагрузки:

$$v_{пк}=q_{O_2} \cdot X \cdot S$$

где:

q_{O_2} - удельная скорость потребления кислорода (мг O_2/г ила·ч),

X - концентрация активного ила (г/л),

S - концентрация субстрата (мг/л).

В свою очередь скорость потребления кислорода $v_{пк}$ зависит от pH это можно и выразить как функцию активности микроорганизмов. Эмпирически это может быть описано, например, гауссовой зависимостью:

$$v_{пк}=v_{пкmax} * e^{-\frac{(pH-pH_{опт})^2}{2\sigma^2}}$$

где

$v_{пкmax}$ - максимальная скорость потребления кислорода при оптимальном ($pH_{опт}$≈ 7–7,5);

σ - параметр, характеризующий чувствительность микроорганизмов к изменению pH.

Для конкретного аэротенка зависимость РК от pH обычно определяется экспериментально или через моделирование. В общем случае:

- При 6 <pH> 9 концентрация РК может увеличиваться из-за снижения биологической активности.
- При pH 6,5 – 8,5 РК стабилизируется на уровне, определяемом интенсивностью аэрации и органической нагрузкой.

Аэрация - это нелинейный процесс, зависящий от множества переменных (концентрация растворенного кислорода, температура, уровень загрязнений, биологическая активность микроорганизмов). ПИД-регуляторы, разработанные для линейных систем, плохо справляются с нелинейной динамикой. При изменении условий (например, скачок концентрации органических веществ в сточных водах) ПИД-регулятор может выдавать неадекватные управляющие воздействия, приводя к перерасходу воздуха или недостаточной аэрации. Например: В аэротенках изменение притока стоков вызывает колебания уровня кислорода, что затрудняет точную настройку ПИД-регулятора. В системах аэрации существует временная задержка между подачей воздуха и изменением концентрации растворенного кислорода (из-за диффузии и реакции микроорганизмов). ПИД-регуляторы плохо справляются с системами, имеющими значительные транспортные задержки [8]. Регулятор может запаздывать с реакцией, вызывая колебания (осцилляции) или нестабильность процесса. Например: В биореакторе подача воздуха может не сразу повлиять на уровень O_2, что приводит к неоптимальному управлению.

ПИД-регуляторы требуют точной настройки коэффициентов (Кп, Ки, Кд), что может быть затруднительно для систем с переменными параметрами. Оптимальные настройки для одних условий могут стать неэффективными при изменении нагрузки или состава среды. Неправильная настройка приводит к перерегулированию (слишком интенсивная подача воздуха) или недорегулированию (недостаток кислорода), что снижает эффективность процесса и увеличивает энергозатраты. ПИД-регуляторы обычно работают с одной управляющей переменной (например, концентрацией O_2). В аэрации же требуется учитывать множество факторов одновременно: температура, pH,

концентрация загрязнений, расход воздуха. Игнорирование дополнительных переменных приводит к неоптимальному управлению, снижая качество очистки или увеличивая затраты. ПИД-регуляторы часто работают в режиме постоянной коррекции, что может приводить к избыточной подаче воздуха, особенно при резких изменениях условий. Перерасход энергии на работу воздуходувок, что составляет значительную часть эксплуатационных затрат в системах аэрации (до 50–70% в очистке стоков).

Кроме этого, ПИД-регуляторы не обладают встроенной адаптивностью к изменениям в процессе. Для сложных систем, таких как аэрация, требуется динамическая перенастройка параметров, что невозможно без дополнительных алгоритмов. Система становится менее эффективной при сезонных изменениях, изменении состава стоков или других внешних факторах. Например: В зимний период снижение температуры воды замедляет биологические процессы, но ПИД-регулятор продолжает работать по старым настройкам, что снижает качество очистки.

Нечеткая логика позволяет моделировать сложные системы с неопределенностью, используя лингвистические правила [9]. В последнее время, фаззификация, как элемент нечеткой логики, активно применяется для управления сложными процессами, включая аэрацию, где точные математические модели затруднены из-за неопределенности и изменчивости параметров.

Фаззификация - это процесс преобразования четких числовых входных данных в нечеткие множества с функциями принадлежности, что позволяет системе учитывать неопределенность [10]. Аэрация - процесс насыщения жидкости кислородом, используемый в очистке сточных вод, ферментации или водоподготовке. Применение фаззификации в управлении аэрацией позволяет оптимизировать процесс, учитывая нечеткие данные, такие как переменные концентрации кислорода, температура или состав сырья.

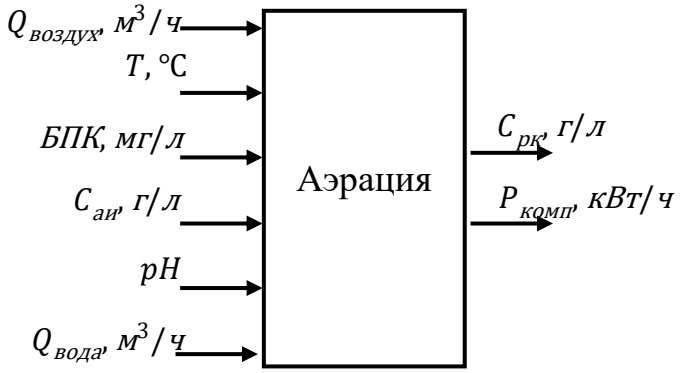

Рис.1. Модель входных и выходных параметров процесса аэрации сточной воды.

где: $Q_{воздух}$ – расход подачи воздуха, $м^3/ч$; Т - температура сточной воды, °С; БПК – биохимическая потребность кислорода входящей сточной воды, мг/л; $C_{аи}$ – концентрация активного ила в аэротенке, г/л; pH – кислотность воды, $Q_{вода}$ – объем сточной воды в аэротенке, $м^3/ч$; $C_{рк}$ – концентрация растворенного кислорода, г/л; $P_{комп}$ – потребляемая мощность компрессором, кВт/ч.

Разработки нечеткой системы управления процессом аэрации методом Мамдани

Нечеткая модель Мамдани может предназначаться для управления процессом аэрации в аэротенке, который обеспечивает биологическую очистку сточных вод путем подачи воздуха для поддержания активности микроорганизмов [11]. Модель принимает входные параметры, описывающие состояние системы, и выдает управляющие параметры для оптимизации концентрации растворенного кислорода $C_{рк}$ и потребляемой мощности компрессора $P_{комп}$. Для разработки нечеткой системы управления процессом аэрации, сначала определяем входные (Таблица 1.) и выходные параметры (Таблица 2.):

Таблица 1. Входные параметры.

Параметры	Единица измерения	Диапазон всевозможных значений
$Q_{воздух}$- расход подачи воздуха	м³/ч	100,1200
Т - температура сточной воды	°С	5,35
БПК - биохимическая потребность в кислороде	мг/л	50,600
$C_{аи}$ - концентрация активного ила	г/л	1,7
pH - кислотность воды	-	5,5-9,5
$Q_{вода}$ - объем сточной воды	м³/ч	500,6000

Таблица 2. Выходные параметры**.**

Параметры	Единица измерения	Диапазон всевозможных значений
$C_{рк}$ - концентрация растворенного кислорода	г/л	0-2,5
$P_{комп}$ - потребляемая мощность компрессора	кВт/ч	5-120

После определения входных и выходных переменных системы управления, составляем последовательность выполнения нечеткой логики управления процессом аэрации по методу Мамдани (рис.2). Каждая входная и выходная переменная представляется в виде нечетких множеств с соответствующими функциями принадлежности $\mu(x)$, которые определяют степень принадлежности значения x к определенному лингвистическому терму (например, "низкий", "средний", "высокий"). Функции принадлежности выбираются треугольными $\mu_{тре}(x)$ или трапецеидальными $\mu_{тр}(x)$для граничных термов.



Рис.2. Последовательность выполнения нечеткой логики управления.

Для каждого параметра определяем пять термов для повышения точности. Правила выбора термов для нечеткой модели процесса аэрации в аэротенке с использованием метода Мамдани основываются на принципах нечеткой логики, технологических особенностях процесса аэрации и экспертных знаниях. Термы - это лингвистические описания состояний входных и выходных параметров, которые используются для представления значений в нечетких множествах. Ниже описаны правила и критерии выбора термов, адаптированные к вашему запросу, без лишних деталей и с учетом математической строгости.

✓ Термы должны отражать реальные состояния параметров, характерные для процесса аэрации;

✓ Выбор термов учитывает физические ограничения, такие как растворимость кислорода или биохимическую потребность в кислороде;

✓ Используется больше термов для каждого параметра, чтобы обеспечить достаточную детализацию и гибкость модели. Это позволяет описывать переходные состояния и избегать слишком грубого разделения, Термы выбираются так, чтобы обеспечить покрытие всех возможных комбинаций входных параметров в базе правил;

✓ Диапазон каждого параметра делится на перекрывающиеся интервалы, чтобы учесть нечеткость и плавные переходы. Перекрытие функций принадлежности составляет около 20–30% между соседними термами (Таблица 3.);

Таблица 3. Определение терм для параметров

Параметры	Термы	Диапазон термы
$Q_{воздух}$, ($м^3/ч$)	Очень низкий	[100, 100, 200, 300]
	Низкий	[200, 400, 600]
	Средний	[400, 700, 900]
	Высокий	[700, 1000, 1100]
	Очень высокий	[1000, 1100, 1200, 1200]
T, (°C)	Очень низкий	[5, 5, 8, 12]
	Низкий	[8, 15, 20]
	Средний	[15, 22, 28]
	Высокий	[25, 30, 33]
	Очень высокий	[30, 33, 35, 35]
БПК, (мг/л)	Очень низкий	[50, 50, 100, 150]
	Низкий	[100, 200, 300]
	Средний	[200, 350, 450]
	Высокий	[400, 500, 550]
	Очень высокий	[500, 550, 600, 600]

$C_{аи}$, (г/л)	Очень низкий	[1, 1, 1.5, 2]
	Низкий	[1.5, 2.5, 3.5]
	Средний	[2.5, 4, 5.5]
	Высокий	[4.5, 5.5, 6.5]
	Очень высокий	[5.5, 6, 7, 7]
pH	Очень низкий	[5.5, 5.5, 6, 6.5]
	Низкий	[6, 6.8, 7.2]
	Средний	[6.8, 7.5, 8.2]
	Высокий	[7.8, 8.5, 9]
	Очень высокий	[8.5, 9, 9.5, 9.5]
$Q_{вода}$, ($м^3$/ч)	Очень низкий	[500, 500, 1000, 1500]
	Низкий	[1000, 2000, 3000]
	Средний	[2000, 3500, 4500]
	Высокий	[4000, 5000, 5500]
	Очень высокий	[5000, 5500, 6000, 6000]
$C_{рк}$, (г/л)	Очень низкий	[0.2, 0.2, 0.5, 1]
	Низкий	[0.5, 1.5, 2.5]
	Средний	[1.5, 2.5, 3.5]
	Высокий	[2.5, 3.5, 4.5]
	Очень высокий	[3.5, 4.5, 5, 5]
$P_{комп}$, (кВт/ч)	Очень низкий	[5, 5, 15, 30]
	Низкий	[15, 30, 50]
	Средний	[30, 60, 90]
	Высокий	[60, 90, 110]
	Очень высокий	[90, 110, 120, 120]

База правил представляет собой набор условных утверждений вида "ЕСЛИ ... ТО ...", связывающих входные и выходные переменные. Правила основаны на экспертных знаниях о процессе аэрации. Математическое представление правила-каждое правило R_k имеет вид:

R_k: ЕСЛИ $x_1 = A_{1k}$ И $x_2 = A_{2k}$ И … И $x_6 = A_{6k}$, ТО $y_1 = B_{1k}$ И $y2 = B_{2k}$

где x_i – входные переменные, A_{ik} – нечеткое множество для x_i, y_i – выходные переменные, B_{jk} – нечеткое множество для y_i.

Степень активации правила R_k вычисляется как:

$$w_k = \min\left(\mu_{A_{1k}}(x_1), \mu_{A_{2k}}(x_2), \ldots, \mu_{A_{6k}}(x_6)\right)$$

где w_k - вес правила, определяемый минимальной степенью принадлежности входов.

Для получения числовых значений $\mathbf{C_{рк}}$ и $\mathbf{P_{комп}}$ используется метод центроида:

$$y_j^* = \frac{\int y \cdot \mu_{y_j}(y)\, dy}{\int \mu_{y_j}(y)\, dy}$$

где y_j^* - итоговое значение выхода ($\mathbf{C_{рк}}$ или $\mathbf{P_{комп}}$), $\mu_{y_j}(y)$ - агрегированная функция принадлежности.

Результаты моделирования исследований

Целью эксперимента является оценка эффективности разработанной нечеткой системы управления процессом аэрации по сравнению с классическим ПИД-регулятором при изменяющихся технологических параметрах сточной воды. Для оценки производительности разработанного нечеткого логического контроллера по сравнению с классическим ПИД-контроллером было проведено моделирование системы управления процессом аэрации в среде MATLAB/Simulink.

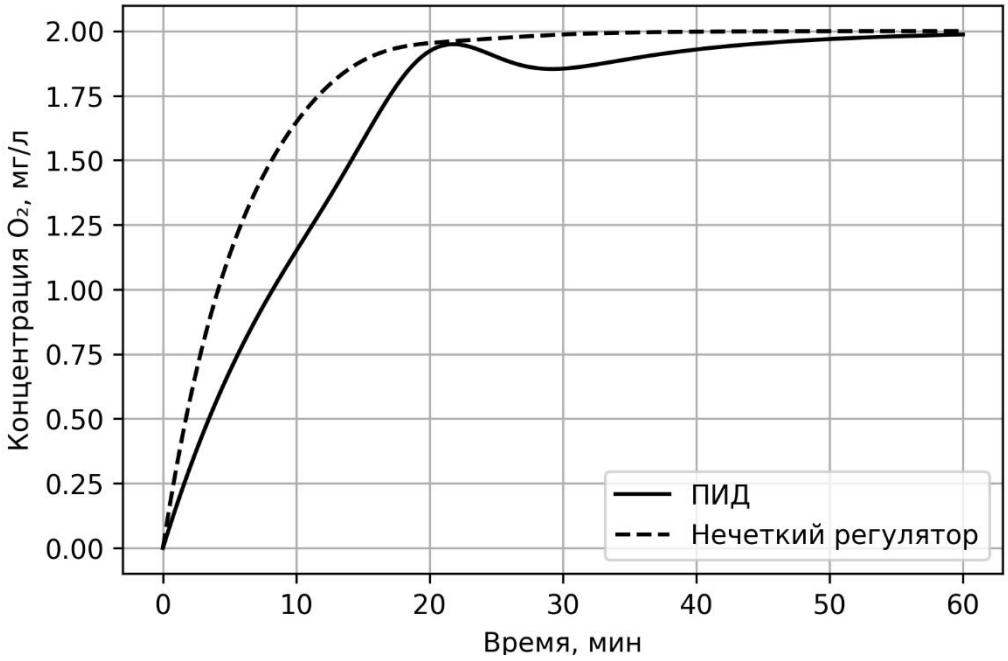

Рис.3. Результаты моделирования системы управления процессом аэрации

На рисунке 3 представлено изменение концентрации растворенного кислорода в аэротенке при использовании классического ПИД-регулятора и разработанной нечеткой системы управления. Как видно из графика, при использовании ПИД-регулятора наблюдается значительное перерегулирование и колебательный характер переходного процесса, обусловленный нелинейностью объекта управления и наличием транспортного запаздывания процесса аэрации. Время установления составляет около 18–20 минут. В случае применения нечеткого регулятора обеспечивается более плавный выход системы на заданное значение концентрации кислорода без существенного перерегулирования. Время установления уменьшается приблизительно до 8–10 минут, что свидетельствует о повышении динамической устойчивости системы управления.

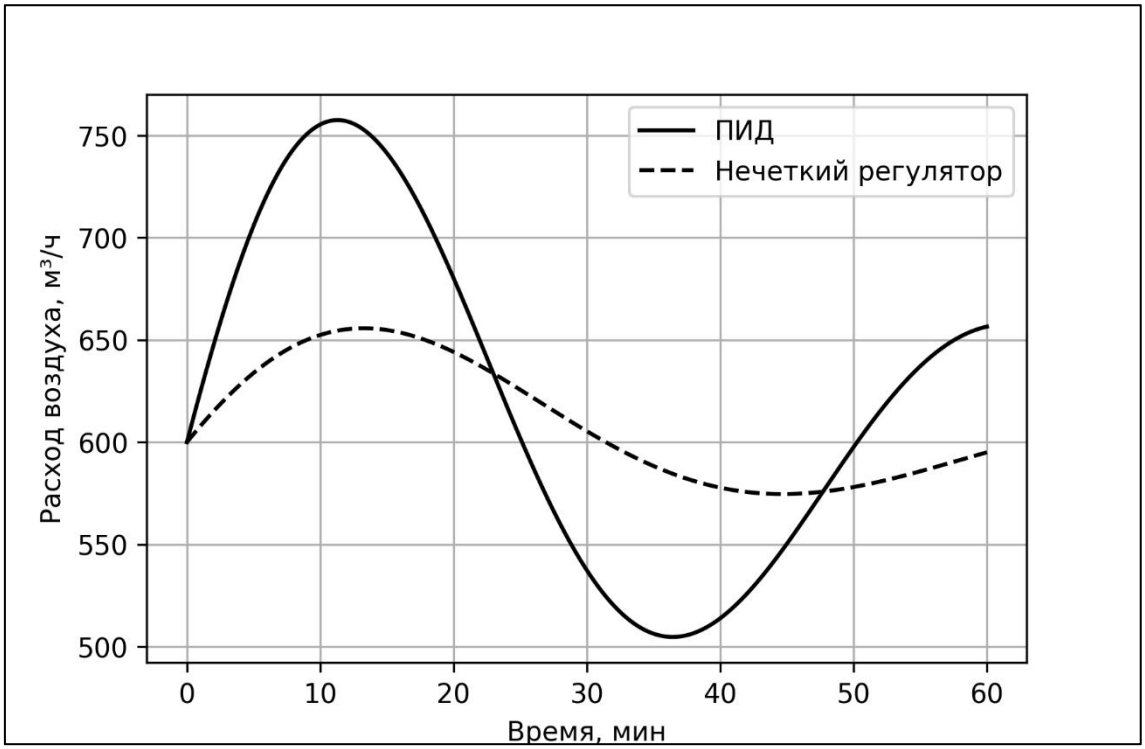

Рис.4. Изменение расхода подаваемого воздуха

На рисунке 4 показано изменение управляющего сигнала — расхода подаваемого воздуха компрессорной системой. ПИД-регулятор формирует значительные колебания управляющего воздействия, что приводит к частым изменениям режима работы воздуходувок. Такие колебания вызывают дополнительный износ оборудования и увеличение энергозатрат. Разработанная система нечеткого управления обеспечивает более сглаженное изменение расхода воздуха благодаря учету текущего состояния технологического процесса и экспертных правил управления. Это позволяет повысить эксплуатационную надежность компрессорного оборудования.

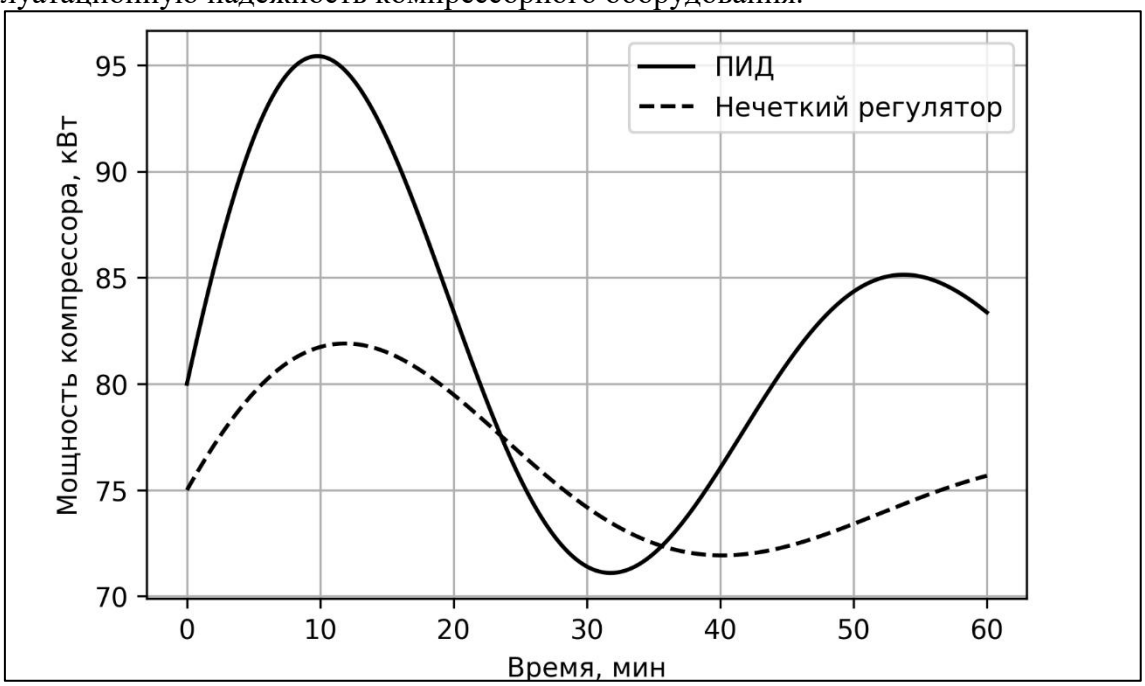

Рис.5. Потребляемая мощность компрессора

На рисунке 5 представлено изменение потребляемой мощности компрессорной установки при различных алгоритмах управления. Использование ПИД-регулятора

приводит к периодическим скачкам мощности вследствие нестабильности управляющего воздействия. В отличие от этого, нечеткая система управления поддерживает более равномерный режим работы компрессора. Результаты моделирования показывают снижение средней потребляемой мощности на 15–20%, что подтверждает энергетическую эффективность применения нечеткой логики в системах управления процессом аэрации сточных вод.

Заключение

Как видно из вышеописанных, концентрация растворенного кислорода в аэротенках зависит от множества факторов, включая интенсивность аэрации, температуру, органическую нагрузку и физико-химические параметры. Математические модели, такие как уравнения массопереноса, позволяют описать эти зависимости, но их использование ограничено сложностью и неопределенностью. Преимуществами являются: устойчивость к неопределенности и изменчивости параметров, простота реализации правил на основе экспертных знаний, снижение энергозатрат за счет адаптивного управления. Применение нечеткой логики предоставляет эффективный инструмент для управления аэрацией в условиях изменчивости параметров, обеспечивая баланс между качеством очистки и энергозатратами. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию нечетких систем с машинным обучением для повышения точности управления.

Анализ полученных результатов показывает, что применение нечеткой системы управления обеспечивает более быстрое достижение заданной концентрации растворенного кислорода без значительного перерегулирования. Колебания управляющего воздействия уменьшаются, что приводит к снижению энергопотребления компрессорного оборудования.

Список литературы

1. Бельчинская Л.И., Козлов М.Н., Кузнецова Т.Ф. Биологическая очистка сточных вод: факторы влияния и оптимизация процесса // Водоочистка. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
2. Иванов А.В., Петрова Е.Н. Влияние температуры на эффективность биологической очистки сточных вод // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 4. – С. 12–18.
3. Соколов Д.М., Маркова О.П. Органическая нагрузка и ее влияние на процессы аэрации сточных вод // Вестник МГСУ. – 2019. – № 6. – С. 78–85.
4. Пономарев В.Г., Смирнова Т.А. Роль pH в биологических процессах очистки сточных вод // Химия и технология воды. – 2022. – Т. 44, № 2. – С. 101–110.
5. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control. – Research Triangle Park, NC: ISA, 2006. – 460 p.
6. Zadeh L.A. Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes. – New York: Academic Press, 1975. – 496 p.
7. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992. – 449 p.
8. Mamdani E.H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–13.