

INTELLIGENT CONTROL METHODS FOR BIOREACTORS: APPLICATION OF FUZZY LOGIC RULES IN WASTEWATER TREATMENT**Mammadazada K.**

*Azerbaijan State Oil and Industry University,
BA Programs, Employee on Educational Technologies
<http://orcid.org/0009-0007-7977-5122>*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОРЕАКТОРАМИ: ПРИМЕНЕНИЕ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД**Мамедзаде К.**

*Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,
BA Programs, Сотрудник по Образовательным Технологям,
<http://orcid.org/0009-0007-7977-5122>
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17352741>*

Abstract

This paper examines the application of fuzzy logic rules as an intelligent control approach to enhance the efficiency of bioreactors used in wastewater treatment. The bioreactors under consideration are employed for wastewater purification. Traditional control approaches often face challenges due to the nonlinear, dynamic, and uncertain nature of biological processes. In comparison with conventional strategies, fuzzy logic provides a flexible and robust framework for modeling such systems, while allowing the integration of expert knowledge and linguistic rules. In this study, a fuzzy rule-based control system was developed to regulate key operational parameters of a wastewater bioreactor. Simulation results demonstrate that the fuzzy logic-based controller improves system stability, reduces deviations from optimal operating conditions, and enhances treatment efficiency compared to traditional methods. The findings confirm that fuzzy logic-based control strategies represent a reliable and adaptive tool for optimizing processes in bioreactors within modern wastewater treatment systems. Furthermore, the proposed approach shows strong potential for real-time applications, particularly in environments where precise mathematical models are difficult to obtain. The integration of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) may further strengthen the accuracy of predictions and adaptability to changing conditions. These results highlight the importance of intelligent control techniques in advancing sustainable wastewater management and open pathways for future experimental validation and large-scale implementation.

Аннотация

В данной статье рассматривается применение правил нечеткой логики как интеллектуального подхода к управлению для повышения эффективности работы биореакторов, используемых в очистке сточных вод. Рассматриваемые биореакторы применяются для очистки сточных вод. Традиционные подходы к управлению часто сталкиваются с трудностями, обусловленными нелинейным, динамичным и неопределённым характером биологических процессов. По сравнению с традиционными стратегиями нечеткая логика обеспечивает гибкий и устойчивый подход к моделированию таких систем, позволяя при этом интегрировать экспертные знания и лингвистические правила. В рамках данного исследования была разработана система управления на основе нечетких правил для регулирования ключевых эксплуатационных параметров биореактора сточных вод. Результаты моделирования показывают, что контроллер, построенный на основе нечеткой логики, повышает стабильность системы, снижает отклонения от оптимальных условий работы и улучшает эффективность очистки по сравнению с традиционными методами. Полученные результаты подтверждают, что стратегии управления на основе нечеткой логики являются надежным и адаптивным инструментом для оптимизации процессов в биореакторах современных систем очистки сточных вод. Более того, предложенный подход демонстрирует высокий потенциал для применения в режиме реального времени, особенно в условиях, где затруднено построение точных математических моделей. Интеграция адаптивных нейро-нечетких систем вывода (ANFIS) может дополнительно повысить точность прогнозов и адаптивность к изменяющимся условиям. Данные результаты подчёркивают значимость интеллектуальных методов управления в развитии устойчивых технологий очистки сточных вод и открывают перспективы для будущей экспериментальной валидации и промышленного внедрения в широком масштабе.

Keywords: ANFIS, Fuzzy Logic, wastewater treatment, bioreactor.**Ключевые слова:** ANFIS, нечеткая логика, очистка сточных вод, биореактор.**ВВЕДЕНИЕ**

Очистка сточных вод становится всё более актуальной задачей в контексте мировой экологической устойчивости и защиты человеческого здоро-

вья. С ростом темпов индустриализации и урбанизации объём и сложность сточных вод постоянно увеличиваются, что предъявляет дополнительные требования к очистным сооружениям. Традиционные стратегии очистки, являются эффективны в

определённых условиях, часто сталкиваются с проблемами изменчивости и неопределённости характеристик поступающих стоков, а также с нелинейной динамикой, присущей биологическим процессам. Эти проблемы приводят к необходимости разработки и внедрения усовершенствованных стратегий управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать как стабильность процессов, так и высокую эффективность очистки.

Биореакторы занимают ключевое место в системах очистки сточных вод, так как они отвечают за биологическое разложение органических загрязнителей и питательных веществ. Однако их эффективность в значительной степени зависит от колебаний эксплуатационных параметров, таких как уровень pH, концентрация растворённого кислорода, температура и нагрузка по питательным веществам. Традиционные методы управления зачастую не обладают достаточной гибкостью для работы в условиях нелинейности и неопределённости. В результате исследований всё чаще сосредотачивается на применении интеллектуальных методов управления, включающих нечеткую логику, искусственные нейронные сети (ИНС) и гибридные подходы, которые позволяют преодолеть указанные ограничения.

Среди таких методов особый интерес представляют адаптивные нейро-нечеткие системы вывода (ANFIS). Данный метод сочетает интерпретируемость нечеткой логики с обучающимися и адаптивными возможностями нейронных сетей. Модели ANFIS способны выявлять сложные нелинейные зависимости в данных о процессе, одновременно используя экспертные знания в виде нечетких правил. Это делает их особенно перспективными для задач очистки сточных вод, где поведение системы сложно описать с помощью традиционных математических моделей. Ряд современных исследований подтвердил эффективность ANFIS в повышении точности прогнозирования, оптимизации управления и увеличении устойчивости очистных систем.

В настоящем исследовании разработана и оценена модель управления биореактором очистки сточных вод на основе ANFIS. Модель обучалась и проверялась с использованием выборки, включающей 987 экспериментальных наблюдений, что обеспечивает надёжную основу для анализа и оценки эффективности. Интеграция правил нечеткой логики с адаптивным обучением позволяет предложенной системе регулировать ключевые эксплуата-

ционные параметры, повышать стабильность работы и улучшать общую эффективность очистки по сравнению с традиционными методами управления.

Цель

Целью данного исследования является разработка и реализация нечеткой модели для построения цифрового двойника биореактора, который применяется в процессе очистки сточных вод. Примененный цифровой двойник построен с целью повышения точности прогнозирования выходных параметров системы, при этом улучшая управления технологическим процессом и адаптивностью модели к изменяющимся условиям эксплуатации. Для достижения поставленной цели в работе разработана система управления биореактором на основе правил нечеткой логики с использованием экспертных знаний и лингвистических правил. Построить и обучить ANFIS-модель на основе 987 экспериментальных данных для прогнозирования и регулирования ключевых эксплуатационных параметров биореактора.

Начальные условия

В данной статье в качестве объекта моделирования рассматривается биореактор, который предназначен для очистки сточных вод. Модель разрабатывается на основе набора экспериментальных и симуляционных данных, отражающих функционирование установки в различных режимах работы. Для построения и обучения адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS) были заданы исходные параметры такие как выборка из 987 наблюдений, которые включают значения шести входных параметров, характеризующих работу биореактора очистки сточных вод. Входные параметры - показатели, влияющие на эффективность очистки. Ниже представлена таблица со входными показателями. К ним относятся скорость потока воздуха, скорость потока рециркуляции, скорость потока и скорость оттока отходов. А выходной параметр – это показатель качества очистки сточных вод. Функции принадлежности (MFs) для каждого из 6 входных параметров задано по одной функции принадлежности, что обеспечивает интерпретируемость и минимизацию переобучения на раннем этапе. А для в качестве метода обучения выбран гибридный алгоритм (Hybrid), сочетающий градиентный спуск и метод наименьших квадратов, что позволяет одновременно корректировать параметры функций принадлежности и выходные коэффициенты.

Ниже представлена таблица 1, где указаны начальные условия.

Таблица 1.

Начальные условия ANFIS-модели для биореактора очистки сточных вод	
Параметр	Значение / Описание
Количество входных параметров	6
Количество выходных параметров	1
Функции принадлежности (MFs)	По 1 MF для каждого входа (гауссовы/треугольные, задаются автоматически в MATLAB)
Общее количество данных	987 наблюдений
Разделение данных	Обучающие (Training), тестовые (Testing), проверочные (Checking)
Метод оптимизации	Hybrid (градиентный спуск + метод наименьших квадратов)
Количество эпох обучения	3
Критерий остановки	Error Tolerance = 0.0 (обучение до конца эпох)
Среда моделирования	MATLAB ANFIS Editor
Выходные результаты	Графики обучения (Training Data), снижение ошибки, улучшение стабильности модели

Представленные в таблице параметры определяют исходные условия для построения и обучения ANFIS-модели биореактора очистки сточных вод. Выбор шести входных переменных и одного выходного показателя отражает ключевые факторы, влияющие на эффективность процесса очистки. Использование гибридного метода оптимизации в сочетании с ограниченным числом эпох позволяет избежать переобучения и обеспечить базовую устойчивость модели. Такое задание начальных условий создаёт основу для дальнейшей адаптации системы и последующего повышения точности прогнозирования при увеличении количества обучающих итераций.

Методы

В данной работе для управления биореактором и оптимизации процессов очистки сточных вод использовалась методология, основанная на нечеткой логике и адаптивной сети типа ANFIS (Adaptive

Neuro-Fuzzy Inference System). Основные этапы исследования включали сбор данных. Далее производилась предобработка данных, для обеспечения корректной работы ANFIS данные были нормализованы и очищены от выбросов. На основе обучающих данных была создана адаптивная нечеткая система, объединяющая преимущества нейронных сетей и правил нечеткой логики. Модель позволяет прогнозировать оптимальные значения управляющих воздействий на биореактор в зависимости от текущих условий процесса. Модель ANFIS обучалась на 70% данных и тестировалась на оставшихся 30%. В процессе обучения оптимизировались параметры функций принадлежности и весовые коэффициенты сети для минимизации ошибки предсказания. После верификации модель была применена для реального управления биореактором. Результаты сравнивались с традиционными методами управления для оценки эффективности предлагаемого подхода.



Рисунок 1. Структура модели ANFIS для управления биореактором.

Рисунок 1 представляет структуру модели ANFIS, которая использовалась для управления биореактором. Входной слой включает основные параметры процесса, такие как скорость потока воздуха, скорость потока рециркуляции, скорость потока и скорость оттока отходов формирует нечеткие множества для каждого входного параметра, позволяя системе работать с неопределенностью и вариативностью данных. Использование ANFIS дает возможность объединить гибкость нечеткой логики с обучающими возможностями нейронных

сетей, что делает управление биореактором более точным и адаптивным к изменяющимся условиям.

В данной работе Testing Error = 0,06 означает среднеквадратичную ошибку модели ANFIS на тестовой выборке, т.е. насколько прогнозируемые выходные значения модели отклоняются от реальных измерений. Значение 0,06 указывает на достаточно точное соответствие модели данным тестовой выборки, что подтверждает корректность настройки ANFIS.

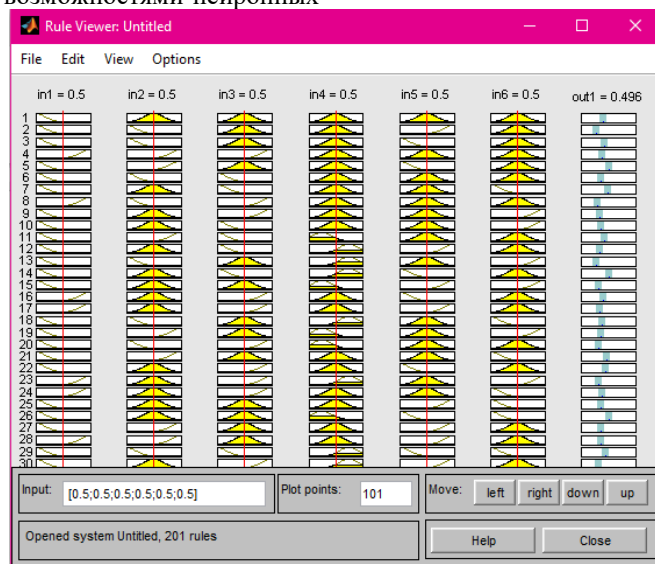


Рисунок 2. Правило (Rule Viewer) визуализация логического вывода для шести входов и трёх выходов

На данном рисунке 2 показан интерфейс окна Rule Viewer среды MATLAB Fuzzy Logic Designer, который отображает работу нечеткой модели в ре-

жиме визуализации вывода. Этот инструмент позволяет оценить, как текущие значения входных параметров влияют на активность нечетких правил и на формирование выходных сигналов модели.

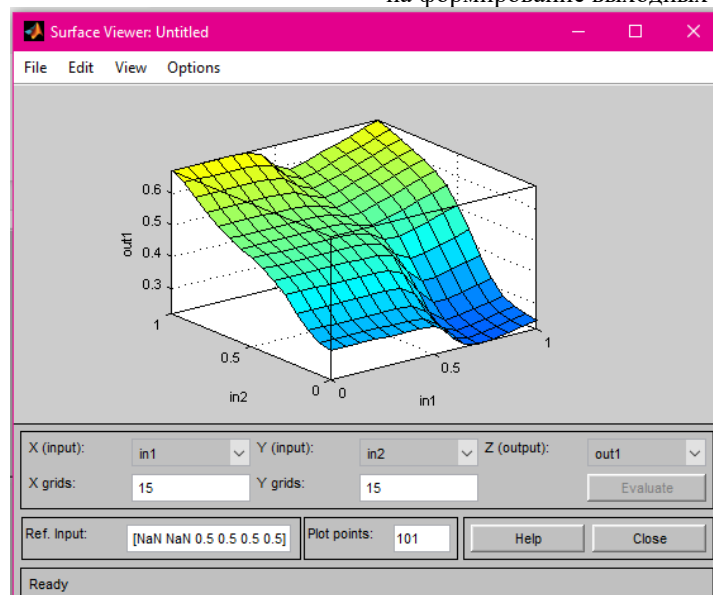


Рисунок 3. Поверхность вывода (Surface Viewer) визуализация зависимости выходного параметра от входных переменных.

На рисунке 3 показана трёхмерная поверхность, которая создана с помощью инструмента Surface Viewer в среде MATLAB Fuzzy Logic Designer, отражающая поведение нечеткой модели типа Sugeno. Данная визуализация служит для анализа того, как изменения двух выбранных входных

параметров — in1 и in2 — влияют на значение одного из выходов системы — out1.

Для количественной оценки точности разработанной нечеткой модели был применен показатель среднеквадратичной ошибки (RMSE, Root Mean Square Error). Значение которой составило 0.06. Это

значение указывает на высокую точность модели при аппроксимации выходных данных биореактора. Для моделирования биологических и экологических процессов, где допустимыми считаются ошибки в диапазоне 0.1–0.2, полученный результат $RMSE = 0.06$ свидетельствует о высокой согласованности между предсказанными моделью и фактическими значениями. Низкое значение $RMSE$ демонстрирует хорошее соответствие между моделью и реальным (или симуляционным) поведением системы, минимальное влияние шумов и нелинейностей на точность прогнозов, эффективность выбранной архитектуры модели и применённых правил нечеткой логики. Следовательно, значение $RMSE = 0.06$ подтверждает высокую надёжность и пригодность нечеткой модели для построения цифрового двойника биореактора и её потенциальное применение в системах мониторинга и управления очистными сооружениями.

Выводы

В данной статье рассмотрены интеллектуальные методы управления биореакторами с использованием правил нечеткой логики и их применение в процессах очистки сточных вод. Проведённый анализ показал, что использование нечеткой логики позволяет учитывать неопределённость и изменчивость параметров биореакторов, что делает управление более адаптивным и эффективным по сравнению с традиционными методами. Использование инструментов MATLAB Fuzzy Logic Designer позволило визуализировать работу нечеткой системы, отладки правил вывода, степени принадлежности и окончательных результатов дефазификации. Анализ полученных результатов показало согласованность поведения системы, а также высокую интерпретируемость и гибкость при изменении входных условий. Разработанная модель продемонстрировала хорошие показатели точности и устойчивости при прогнозировании отклика биореактора даже в условиях неопределённости и нелинейности, что характерно для реальных биологических процессов. Таким образом, предложенный подход может эффективно использоваться при создании цифровых двойников в водоочистных установках и в других инженерных задачах, где важны адаптивность, прозрачность и способность к обобщению.

Разработанная модель управления на основе нечетких правил обеспечивает поддержание оптимальных условий работы биореактора, минимизацию колебаний концентрации загрязняющих веществ и повышение стабильности очистного процесса. Результаты моделирования и анализа показали, что интеллектуальное управление позволяет снизить вероятность превышения допустимых норм по содержанию загрязнителей и повысить общую производительность очистных сооружений.

Таким образом, применение нечеткой логики в управлении биореакторами открывает перспективы для повышения эффективности очистки сточных вод, сокращения энергетических затрат и улучше-

ния экологических показателей, что является актуальной задачей в условиях современного промышленного и городского хозяйства.

В дальнейшем изучение модель может быть дополнена элементами адаптивного обучения, интеграцией с нейросетевыми компонентами и включена в состав интеллектуальных систем управления для реального времени, что откроет новые возможности для автоматизации и оптимизации биотехнологических процессов.

Declarations

The manuscript has not been submitted to any other journal or conference.

Study Limitations

There are no limitations that could affect the results of the study.

Список литературы:

1. Заде Л. А. Нечеткие множества // Информационные и управляющие системы. – 1965. – № 8. – С. 28–44.
2. Журавлев В.И., Петров А.С. Интеллектуальные системы управления биореакторами // Вестник химической промышленности. – 2020. – № 6. – С. 45–52.
3. Верма Р., Кумар А. Применение нечеткой логики в очистке сточных вод: тенденции и перспективы // Environmental Technology & Innovation. – 2022. – Т. 27. – 102431.
4. Ахмад М., Хан С. Интеллектуальное управление процессом активного ила с использованием подхода нечеткой логики // Journal of Water Process Engineering. – 2021. – Т. 40. – 101876.
5. Бухвалов А.А., Васильев В.А. Применение нечеткой логики в задачах управления биотехнологическими процессами // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 7. – С. 62–66.
6. Иванов С.В., Кузнецова Е.Н. Интеллектуальные методы управления и оптимизация процессов очистки сточных вод // Вестник водных технологий. – 2022. – № 2. – С. 22–31.
7. Рани С., Трипати Р. Стратегии управления очистными сооружениями на основе нейро-нечеткой логики: обзор // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Т. 295. – 126421.
8. Ван Л.Х. Курс по нечетким системам и управлению. – Prentice Hall, 1997.
9. Чжоу Х., Ли Й. Моделирование и имитация процессов очистки сточных вод на основе нечеткой логики // Environmental Engineering Research. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 1–8.
10. Георге Г., Никулеску А. Методы мягких вычислений, применяемые к моделированию и управлению очистными сооружениями // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2018. – Т. 15, № 12. – С. 2629–2640.
11. Руководство пользователя MATLAB Fuzzy Logic Toolbox™. – 2023. The MathWorks, Inc. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/>.