

MODELING AND CONTROL OF WASTEWATER TREATMENT EFFICIENCY WITH MAMDANI FUZZY INFERENCE SYSTEM**Mammadazada K.***Azerbaijan State Oil and Industry University,
BA Programs, Employee on Educational Technologies
<http://orcid.org/0009-0007-7977-5122>***МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА МАМДАНИ****Маммедзаде К.***Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,
BA Programs, Сотрудник по Образовательным Технологиям,
<http://orcid.org/0009-0007-7977-5122>
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17121610>***Abstract**

Efficient wastewater treatment is essential for sustainable environmental management, yet conventional mathematical models often fail to capture the nonlinear and uncertain dynamics of biological processes. This study develops a Mamdani-type Fuzzy Inference System (FIS) to model and control wastewater treatment efficiency using operational data. Nearly 15,000 data samples, obtained from a mathematical process model, were analyzed to identify the main variables influencing treatment performance. The fuzzy logic framework incorporates linguistic rules and membership functions, enabling the system to manage uncertainty and approximate expert decision-making in real time. Simulation results demonstrate that the Mamdani FIS achieves accurate predictions of treatment efficiency and provides robust control of critical process parameters under fluctuating conditions. The model enhances dissolved oxygen regulation, improves pollutant removal, and stabilizes bioreactor operation, ultimately leading to higher energy efficiency and better effluent quality. Overall, the findings highlight the effectiveness of Mamdani fuzzy logic as a decision-support tool for intelligent and adaptive wastewater treatment management.

Аннотация

Эффективная очистка сточных вод является важнейшим фактором устойчивого экологического управления, при этом традиционные математические модели часто не способны отражать нелинейную и неопределённую динамику биологических процессов. В данном исследовании разработана система нечёткой логики типа Мамдани (FIS) для моделирования и управления эффективностью очистки сточных вод на основе эксплуатационных данных. Были прообработаны около 15 000 образцов данных, которые получены из математической модели процесса, с целью выявления основных переменных, которые влияют на эффективность очистки. Рамки нечёткой логики включают лингвистические правила и функции принадлежности, что позволяет системе управлять неопределённостью и приближать принятие решений эксперта в режиме реального времени. Результаты моделирования показывают, что FIS типа Мамдани обеспечивает точное прогнозирование эффективности очистки и надёжное управление критическими параметрами процесса при изменяющихся условиях. Модель улучшает регулирование растворённого кислорода, повышает удаление загрязняющих веществ и стабилизирует работу биореактора, что в конечном итоге способствует повышению энергоэффективности и улучшению качества сброса. Результаты подчеркивают эффективность нечёткой логики Мамдани в качестве инструмента поддержки принятия решений для интеллектуального и адаптивного управления очисткой сточных вод.

Keywords: Mamdani model, wastewater treatment, dissolved oxygen regulation, Fuzzy logic.**Ключевые слова:** Мамдани модель, очистка сточных вод, регулирование растворенного кислорода, Нечеткая логика.**ВВЕДЕНИЕ**

Очистка сточных вод является одной из важнейших задач современного экологического и ресурсного управления. Повышение эффективности очистки позволяет снизить воздействие на окружающую среду, а также способствует рациональному использованию энергии и ресурсов. Традиционные математические модели, которые используются для описания биологических процессов в биореакторах, часто сталкиваются с ограничениями при работе с нелинейными, динамическими и неопределёнными процессами, что снижает точность прогнозирования и управления.

В настоящее время подходы на основе нечёткой логики привлекают внимание исследователей благодаря своей способности моделировать сложные системы, где традиционные методы оказываются недостаточными и неточными. Системы нечёткой логики способны учитывать экспертные знания и неопределённость данных, которые обеспечивают гибкое и адаптивное управление процессами в реальном времени. Особенно важным является регулирование растворённого кислорода, поскольку этот параметр напрямую влияет на активность микробной флоры и эффективность удаления загрязняющих веществ.

Данное исследование направлено на разработку и применение системы нечеткой логики типа Мамдани для моделирования и управления эффективностью очистки сточных вод. Использование обширного набора эксплуатационных данных дает возможность выявить ключевые параметры, которые влияют на качество очистки, и реализовать интеллектуальную стратегию управления биореактором. Результаты работы показывают возможности повышения стабильности работы, энергоэффективности и качества сброса сточных вод при применении подхода на основе нечеткой логики. Применение нечеткой логики дает возможность создавать адаптивные стратегии управления, которые способны быстро реагировать на колебания параметров процесса и поддерживать оптимальные условия работы биореактора. Данное исследование демонстрирует практическую применимость Mamdani FIS для повышения эффективности очистки сточных вод и служит основой для дальнейшего внедрения интеллектуальных систем управления в отрасли водоочистки.

Цель

Целью данной работы является разработка и реализация нечеткой модели на основе Мамдани для построения цифрового двойника биореактора, используемый в процессе очистки сточных вод. Исследование направлено на оптимизацию регулирования важнейших параметров процесса, включая растворённый кислород, с целью повышения стабильности работы биореактора, эффективности

удаления загрязняющих веществ и энергоэффективности процесса. Данный цифровой двойник построен с целью повышения точности прогнозирования выходных параметров системы, при этом улучшая управления технологическим процессом и адаптивностью модели к изменяющимся условиям эксплуатации.

Начальные условия

В данной работе в качестве объекта моделирования рассматривается аэробный биореактор, используемый для очистки сточных вод. Модель разрабатывается на основе набора симуляционных данных, которые отражают функционирование установки в различных режимах работы. Для построения нечеткой модели Mamdani были определены шесть входных параметров, которые характеризуют важнейшие условия и процессы внутри биореактора. К выбранным входным параметрам относятся: расход приточной воды, возвратный поток ила, скорость оттока отходов, концентрация субстрата, концентрация кислорода в резервуаре реактора, концентрации биомассы. В качестве выходных параметров модели рассматриваются такие показатели которые отражают эффективность очистки и техническое состояние системы. К ним относятся степень удаления органических загрязнений, концентрация остаточного аммония, микробиологическая активность (или биомасса активного ила). Модель строится на основе одного из ниже представленного дифференциального уравнения.

$$\frac{dX_H}{dt} = \frac{q_F}{V} X_{HF} - \frac{q_{tz}}{V} X_H + \frac{(q_F + q_R)}{(q_F + q_R)} X_H - \frac{\mu_H}{Y_H} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_H (1 - f_P)^{b_H} X_H \quad (1)$$

Ниже представлена таблица с основными параметрами, которые описывают процесс биологической очистки.

Таблица 1. Основные параметры модели.

Параметр	Обозначение	Единицы	Значение
Концентрация органического субстрата (БПК)	S_S	мг/л	4.4
Концентрация растворённого кислорода, мг/л	S_O	мг/л	3.0
Концентрация гетеротрофной биомассы, мг/л	X_H	мг/л	5
Скорость потока	q_F	м³/сут	50
Скорость потока рециркуляции	q_R	м³/сут	50
Скорость оттока отходов	q_W	м³/сут	4.8
Объем резервуара аэрации	V	м³	12.5
Максимальная скорость биомассы	μ_H	1/сут	3.733
Коэффициент насыщения субстрата	K_S	мг/л	20
Коэффициент насыщения субстрата	K_{OH}	мг/л	0.2
Коэффициент производительности	Y_H		0.6
Скорость гетеротрофного разложения	b_H	л/сут	0.4
Концентрация насыщения кислорода	S_{osat}	мг/л	10

Это уравнение (1) представляет динамику концентрации кислорода необходимый для аэробного окисления органических веществ. Первое слагаемое в уравнения отражает приток кислорода с входной водой, второе слагаемое означает вынос кислорода с выходящей жидкостью. Третье слагаемое показывает потребление кислорода при росте биомассы. Последнее слагаемое отражает процесс

аэрации, то есть перенос кислорода из воздуха в жидкость. Работа биореактора очистки сточных вод является сложным объектом, который состоит из биохимических реакций и гидродинамики. На основе выше представленного дифференциального уравнения осуществляется взаимосвязь между параметрами. На основе уравнения можно выделить, что чем выше концентрация X_H тем интенсивнее

утилизация субстрата S_s . Таким образом, рост биомассы напрямую связан с доступным субстратом, но также опосредован через кислород. Для аэробного дыхания необходим растворенный кислород. Увеличение X_n и S_s приводит к ускорению биопроцесса, а это означает к ускоренному потреблению кислорода. Следовательно, отмечается связь между кислородом и биомассой существует обратная связь. То есть кислород активирует рост, но при этом сам потребляется в этом процессе. Представ-

ленное уравнение показывает биохимические процессы, при этом обеспечивая точное математическое описание работы биореактора.

Методы

С помощью среды Fuzzy Logic Designer MATLAB строится модель цифрового двойника для биореактора очистки сточных вод. В данном случае применяется структура бифаза правил Mamdani FIS. Основываясь на анализ взаимосвязей между входами и выходами и с учетом экспертных знаний о деятельности биореактора определено общее количество нечетких правил.

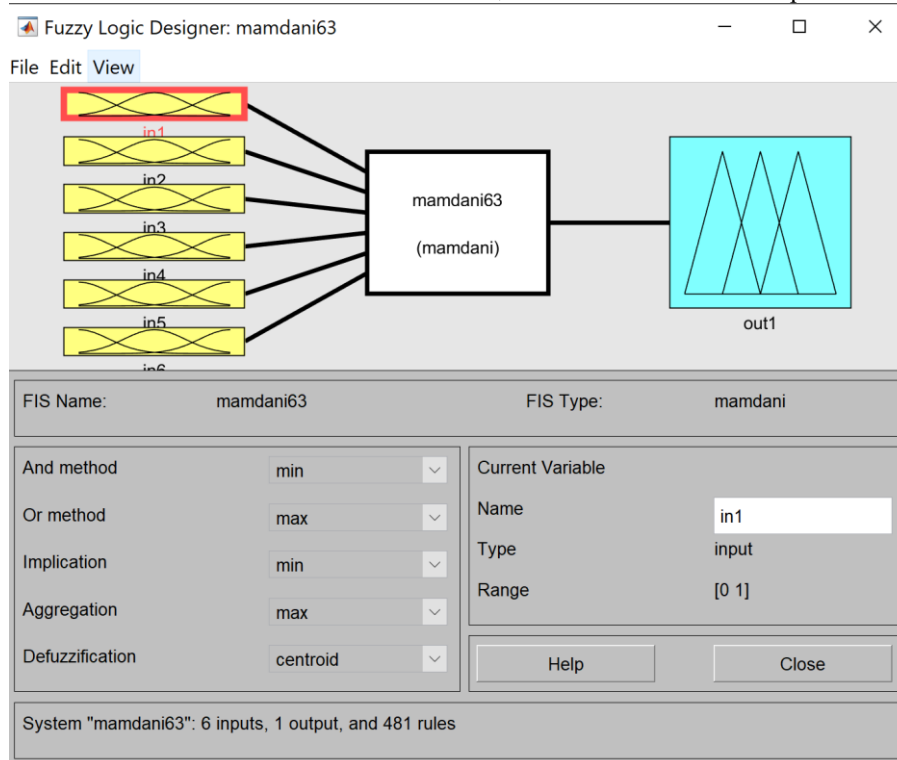


Рисунок 1. Структура нечеткой модели Мамдани для цифрового двойника биореактора

На рисунке 1 представлена архитектура нечеткой модели Мамдани, где показана зависимость dX_n/dt от двух ключевых входных переменных системы. Рисунок указывает на сложность динамики процесса и подчёркивает, что традиционные линейные модели были бы недостаточными для описания поведения системы. Использование нечеткой логики Мамдани позволяет гибко учитывать такие нелинейные взаимодействия. Данной работе применяется около 15000 данных из ANFIS. Шесть параметров являются входными переменными модели,

которые характеризуют важнейшие технологические характеристики процесса. Каждая входная переменная проходит через этап фаззификации, где значения переводятся в соответствующие нечеткие множества на основе предварительно заданных функций принадлежности. В завершение активируются нечеткие правила, которые формируются основываясь на знаниях об объекте и экспертной логике. Данная модель обеспечивает высокую точность, адаптивность и интерпретируемость, что делает её эффективным компонентом при построении цифрового двойника в области водоочистки.

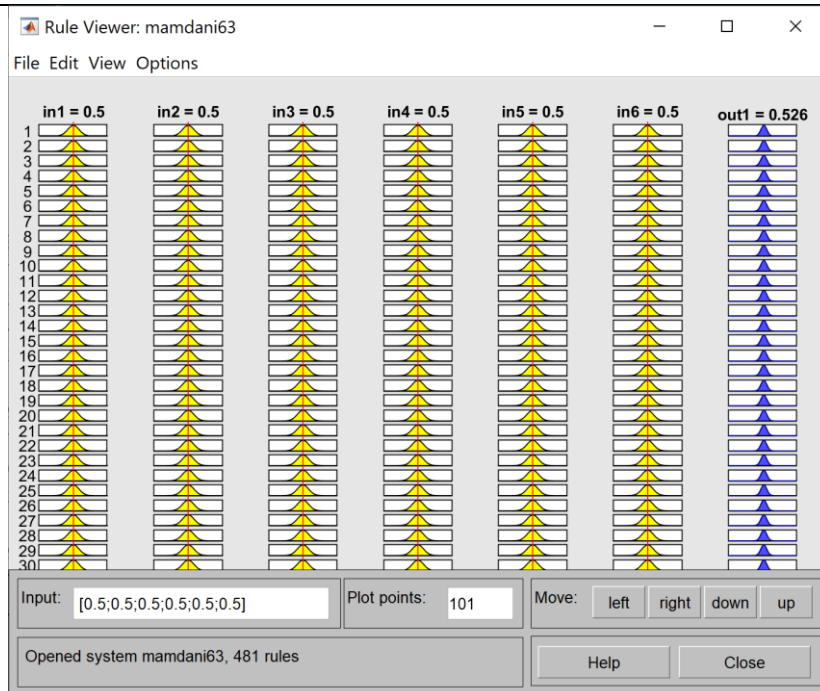


Рисунок 2. Правило (Rule Viewer) в модели Mamdani

На рисунке 2 представлен интерфейс визуализации правил Mamdani Fuzzy Inference System (FIS) с 481 правилом для моделирования процесса очистки сточных вод. На рисунке представлены шесть входных переменных (in1–in6), каждая из которых имеет начальное значение 0,5, и выходная переменная (out1), значение которой составляет

0,526. С помощью интерфейса возможно визуально оценить влияние каждого входного параметра на выход системы и служит инструментом анализа и отладки нечеткой модели Mamdani, обеспечивая понимание логики принятия решений в условиях неопределенности.

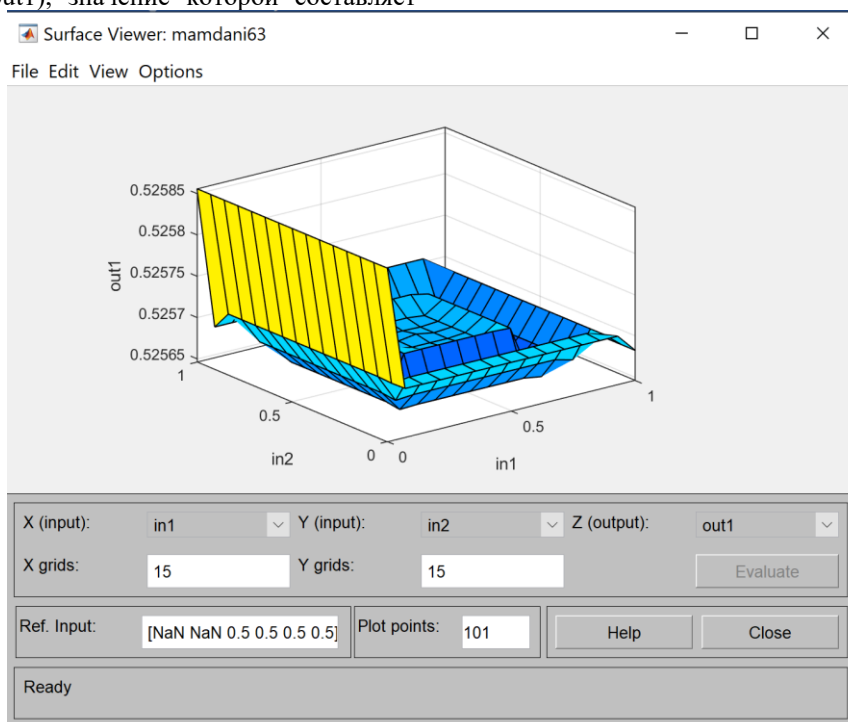


Рисунок 3. Поверхность вывода (Surface Viewer) модели Mamdani

На рисунке 3 показана трёхмерная поверхность, которая создана с помощью инструмента Surface Viewer в среде MATLAB Fuzzy Logic Designer, отражающая поведение нечеткой модели типа Мамдани. Данная визуализация показывает зависимость между двумя wybranymi входными

параметрами — in1 и in2 — влияют на значение одного из выходов системы — out 1. Ось X (in1) - первый вход модели, варьируется от 0 до 1. Ось Y (in2) - второй вход модели, также варьируется от 0 до 1. Ось Z (out1) – варьируется от 0.52565 до 0.52585. Главную визуализацию обеспечивает сетка. Линии

сетки четко выделяют изменение выходной величины при изменении входов. По рисунку 3 можно выделить. Что поверхность плоская что указывает на низкую чувствительность выходной переменной к изменением входов в указанном диапазоне. Небольшие колебания свидетельствует об минимальном изменении входного значения при комбинированном влиянии входов. Также можно выдуть. Что слегка возвышен краевые значения графика. Что свидетельствует о незначительном нелинейном эффекте на выходе. Для количественной оценки точности разработанной нечеткой модели Мамдани был использован показатель среднеквадратичной ошибки (RMSE, Root Mean Square Error), значение которой составило 0.466. Значение RMSE (Root Mean Square Error), равное 0.466, характеризует среднеквадратичное отклонение предсказанных моделью значений от фактических данных. Это свидетельствует, что в среднем ошибки предсказаний составляют около 0.466 единиц измерения рассматриваемого параметра. RMSE является одной из наиболее часто используемых метрик для оценки точности моделей, поскольку она чувствительна к крупным ошибкам: большие расхождения между предсказанным и фактическим значением вносят большой вклад в итоговую оценку. Таким образом, полученное значение демонстрирует удовлетворительную степень соответствия модели реальным данным, позволяя использовать её для прогнозирования и анализа процесса с учетом существующей погрешности.

Выводы

Разработка и реализация нечеткой модели Мамдани применяется для построения цифрового двойника биореактора, используемого в системах очистки сточных вод. Модель основана на шести ключевых входных параметрах, которые отражают технологические и физико-химические характеристики процесса, и формирует три выходных сигнала, представляющих важнейшие показатели эффективности работы биореактора. Использование инструментов MATLAB Fuzzy Logic Designer дает возможность визуализировать работу нечеткой системы, отладки правил вывода, степени принадлежности и окончательных результатов дефазификации. Данный результат подтверждает, что модель адекватно описывает процесс и может использоваться для предсказания выхода системы в заданных пределах. Анализ результатов подтверждает корректность логической структуры модели, согласованность динамических характеристик системы, а также высокую интерпретируемость и адаптивность при варьировании входных параметров. Построенная модель демонстрирует устойчивость и точность в прогнозировании функционирования биореактора, даже в определенных условиях нелинейности и неопределенности. Результаты свидетельствуют об эффективности и надежности примененного инструмента для построения цифрового двойника для биореактора.

В перспективе дальнейшее развитие модели может включать внедрение механизмов адаптивного обучения, интеграцию с нейросетевыми ком-

понентами, а также её использование в составе интеллектуальных систем управления в режиме реального времени.

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 // Информатика и управление. – 1965. – Т. 8. – С. 338–353.
2. Мамдани Э.Х., Ассилиан С. Эксперимент по лингвистическому синтезу с использованием нечеткого логического контроллера // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Т. 7, № 1. – С. 1–13.
3. Чен Г.Х., Ло И.М.К., Ван Цз. Современные достижения в области очистки сточных вод. – Спрингер, 2020. – 356 с.
4. Ван Л.С. Курс по нечетким системам и управлению. – Прентис Холл, 1997. – 452 с.
5. Олссон Г., Ньюэлл Б. Системы очистки сточных вод: моделирование, диагностика и управление. – Лондон: IWA Publishing, 1999. – 543 с.
6. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide. (2023). The MathWorks, Inc. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/>.
7. Саманта С., Бандопадхай С. Применение системы нечеткого вывода для оценки эффективности работы очистных сооружений // Expert Systems with Applications. – 2010. – Т. 37, № 7. – С. 4657–4666.
8. Рамасами Э.В., Аббаси С.А. Управление восходящим анаэробным реактором с помощью нечеткой логики // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2000. – Т. 2. – С. 172–177.
9. Чан Н.Б., Чен Х.В., Нин С.К. Идентификация качества речной воды с применением метода нечеткой синтетической оценки // Journal of Environmental Management. – 2001. – Т. 63, № 3. – С. 293–305.
10. Ди Белла Г., Торреграсса М., Вивiani Г. Нечеткое управление мембранным биореактором для очистки сточных вод // Journal of Water Process Engineering. – 2014. – Т. 2. – С. 39–45.
11. Чен Г.Х., Ло И.М.К., Ван Цз. Современные достижения в области очистки сточных вод. – Спрингер, 2020. – 356 с.
12. Агеев С.А., Лаптев А.В. Применение методов нечеткой логики для управления процессами очистки воды // Вестник МЭИ. – 2018. – № 3. – С. 55–62.
13. Ткаченко В.И., Козлов А.В. Применение нечетких нейронных сетей для прогнозирования показателей очистки сточных вод // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 45–52.
14. Klir G.J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. – Prentice Hall, 1995. – 574 p.

15. Антонов А.И., Кузнецов Д.В. Использование нечетких регуляторов в системах биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 5. – С. 34–40.
16. Лебедев С.М., Павлов Н.В. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод. – Москва: МГТУ им. Баумана, 2020. – 168 с.
17. Gupta M.M., Qi J. Theory of T-norms and fuzzy inference algorithms // Fuzzy Sets and Systems. – 1991. – Vol. 40(3). – P. 431–450.
18. Ковалев В.А., Саркисов А.А. Методы искусственного интеллекта в управлении очистными сооружениями // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 10. – С. 21–27.
19. Sun R., Chen Y. Application of fuzzy control in wastewater treatment processes // Environmental Technology. – 2015. – Vol. 36(14). – P. 1765–1773.
20. Юсупов Р.М., Кобринский А.Е. Нечеткие множества и интеллектуальные системы. – СПб.: Питер, 2014. – 304 с.

THE EFFECT OF SEVERE SMOG POLLUTION ON TURBULENCE

Mirjafarova M.*Expert of the Scientific and Educational Analytical Department
of the Azerbaijan State University of Oil and Industry
(Baku, Azerbaijan)***Abdullayeva M.***Ph.D. in Chemistry, Associate Professor of the Department of Petrochemical Technology and Industrial
Ecology of the Azerbaijan State University of Oil and Industry
(Baku, Azerbaijan)*<https://doi.org/10.5281/zenodo.17121612>**Abstract**

This study examines the complex interaction between anthropogenic air pollution and atmospheric turbulence. Particular attention is given to the critical role of turbulence in dispersing harmful substances within the atmospheric boundary layer. It is shown that pollutants such as soot not only deteriorate air quality but also suppress turbulent transport, thereby creating a positive feedback loop. This process leads to atmospheric stabilization and the accumulation of hazardous concentrations of fine particulate matter with diameters smaller than 2.5 μm , ultimately forming persistent smog. Conversely, reducing soot emissions can enhance turbulence and improve ventilation. The study summarizes field observations and modeling results that demonstrate the influence of the turbulent barrier effect and meteorological factors on pollutant transport. The findings provide a foundation for developing effective strategies to improve air quality and protect public health.

Keywords: air pollution, turbulence, soot, feedback, smog

Atmospheric pollution intensifies the greenhouse effect, contributes to the formation of acid rain, reduces air quality, and leads to the accumulation of toxic substances in soil and water, resulting in ecosystem degradation and biodiversity loss. Human interaction with the environment has long been the subject of research, as anthropogenic activities significantly affect both biotic and abiotic components of ecosystems. Pollution is defined as the release of harmful substances into the environment in concentrations exceeding natural levels, which leads to the degradation of air, water, and soil, as well as to climate change. Since the Industrial Revolution, mass production and the increase in emissions have become key drivers of environmental deterioration and a major threat to public health [1].

CO₂ emissions and soot exert opposite effects on turbulence and the height of the planetary boundary layer. With increasing CO₂ concentrations and decreasing aerosol emissions, the number of severe air pollution episodes is expected to decline, further confirming the health benefits of reducing black carbon emissions [2].

Theoretical models of the atmosphere have traditionally relied on radiative transfer and the characteristics of the underlying surface, where solar heating and anthropogenic emissions serve as primary energy sources. However, at the local scale, a significant factor is the kinetic energy of motor vehicles, which generates turbulence and influences the vertical distribution of pollutants in the lower troposphere. The authors of [3] developed a parameterization of vertical pollutant transport induced by traffic-related turbulence, drawing an analogy with subgrid approaches for industrial plume dispersion. Turbulence is a key factor contributing to ground-level pollution, while also being affected by it. Within the boundary layer—the lowest part of the atmosphere—turbulence mixes pollutants and can facilitate their removal (far-left panel).

At high concentrations of absorbing aerosols, such as soot, heating of the upper boundary layer stabilizes the air, reduces turbulence, and promotes the accumulation of pollutants closer to the surface (middle panel). Pollution studies have also revealed a weaker turbulence-enhancing effect associated with surface warming caused by greenhouse gases such as CO₂ (far-right panel). Under weak wind conditions, intermittent turbulence frequently develops in the atmospheric boundary layer, substantially limiting the vertical diffusion of pollutants and contributing to the formation of dense haze. Turbulence can vanish at specific altitudes, leading to the formation of a barrier layer that prevents the vertical transport of contaminants. Based on turbulence data across five layers and concentrations of fine particulate matter with diameters smaller than 2.5 μm at two levels, it has been demonstrated that the vertical turbulence barrier is directly linked to the accumulation and vertical distribution of particles [4–5].

Atmospheric turbulence and the properties of the planetary boundary layer play a crucial role in modulating near-surface concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}); however, the mechanisms of their influence remain insufficiently understood. Using meteorological observations, PM_{2.5} data, turbulence measurements, and high-resolution sounding, a regional transport episode was analyzed. During the growth stage, northerly winds (2–4 m/s) carried a polluted air mass, which was accompanied by an increase in PM_{2.5} concentrations. During the pollution period, a decline in turbulent kinetic energy and heat fluxes correlated with rising PM_{2.5} levels, with the nature of this relationship varying across different stages of the event: a negative correlation was observed during the initial and maintenance stages, while a positive correlation was found in the growth stage.

The absence of a pronounced inversion below 500 m and vertically uniform northerly winds facilitated the transboundary transport of pollutants, whereas wind