

АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПО КОНЦЕНТРАЦИИ СО₂ И ЕГО СВЯЗЬ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ PM2.5

*Ешматова Барно Исмаиловна - к.т.н., доцент
Ташкентский государственный технический университет*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы автоматизации мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на основе измерения концентрации углекислого газа (CO₂) и твердых взвешенных частиц PM2.5. Показана взаимосвязь между уровнем CO₂ и концентрацией мелкодисперсных частиц, оказывающих значительное негативное влияние на здоровье человека и экологическое состояние городской среды. Предложена структурная схема автоматизированной системы мониторинга с использованием датчиков, микроконтроллеров и беспроводной передачи данных. На основе анализа полученных данных сформулированы практические рекомендации по снижению загрязнения воздуха, включая меры по увеличению зеленых насаждений и рациональному озеленению городских территорий.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, CO₂, PM2.5, автоматика, мониторинг, датчики, экология, озеленение, умный город, код, сигнал.

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха является одной из наиболее актуальных экологических проблем современности, особенно в условиях урбанизации и роста промышленного производства. Повышенные концентрации углекислого газа (CO₂) и твердых мелкодисперсных частиц PM2.5 приводят к ухудшению качества воздуха, росту респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, а также негативно влияют на климатические процессы [1]. Традиционные методы экологического контроля часто не обеспечивают достаточной оперативности и пространственной детализации данных. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка автоматизированных систем мониторинга, способных в реальном времени измерять параметры загрязнения и передавать данные для анализа и принятия управленческих решений [2].

Постановка задач. Целью данной работы является разработка и анализ автоматизированного подхода к мониторингу загрязнения воздуха по показателям CO₂ и PM2.5, а также формирование рекомендаций по снижению загрязнения с использованием природных методов. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: 1. Проанализировать влияние CO₂ и PM2.5 на качество атмосферного воздуха и

здоровье человека. 2. Исследовать взаимосвязь между концентрациями CO₂ и твердых частиц PM2.5. 3. Разработать структуру автоматизированной системы мониторинга загрязнения воздуха. 4. Сформулировать рекомендации по снижению уровня загрязнения путем озеленения территорий [3].

Решение поставленных задач. Углекислый газ является индикатором антропогенной нагрузки, связанной с транспортом, промышленностью и плотной застройкой. Частицы PM2.5 имеют размер менее 2,5 мкм и способны проникать глубоко в дыхательные пути человека, вызывая хронические заболевания. Экспериментальные и статистические данные показывают, что в условиях интенсивного трафика и промышленной активности рост концентрации CO₂ часто сопровождается увеличением уровня PM2.5, что подтверждает их коррелированное поведение. Система обеспечивает сбор данных в реальном времени, визуализацию показателей и формирование предупреждений при превышении допустимых норм. Одним из эффективных и экологически безопасных методов снижения концентрации CO₂ и PM2.5 является озеленение. Деревья и кустарники: поглощают CO₂ в процессе фотосинтеза; улавливают твердые частицы на поверхности листьев; снижают температуру и улучшают микроклимат [4].

Экспериментальные результаты и их анализ. Математическая модель зависимости концентрации PM2.5 от CO₂ обоснование выбора модели. Как показал экспериментальный анализ (см. график зависимости PM2.5 от CO₂), между концентрацией углекислого газа и мелкодисперсных частиц наблюдается устойчивая положительная корреляция. Это обусловлено наличием общих антропогенных источников выбросов, таких как транспорт и сжигание топлива. Для формализации данной зависимости используется регрессионная модель, позволяющая количественно оценить влияние CO₂ на уровень PM2.5 [5]. Линейная математическая модель. В первом приближении зависимость может быть представлена в виде линейной функции:

$$PM_{2.5} = a \cdot CO_2 + b \quad (1)$$

где:

PM_{2.5} - концентрация твердых частиц, мкг/м³;

CO₂ - концентрация углекислого газа, ppm;

a - коэффициент чувствительности PM_{2.5} к изменению CO₂;

b - фоновая концентрация PM_{2.5}.

Определение коэффициентов модели

На основе аппроксимации экспериментальных данных получены следующие значения коэффициентов:

$$PM_{2.5} = 0.045 \cdot CO_2 - 0.1 \quad (2)$$

Физическая интерпретация коэффициентов:



коэффициент $a = 0.045$ показывает, что увеличение CO_2 на 100 ppm приводит в среднем к росту $\text{PM}_{2.5}$ на 4.5 мкг/м³;

свободный член b характеризует базовый уровень загрязнения при минимальной антропогенной нагрузке.

Оценка адекватности модели

Для оценки качества модели используется коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum(CO_2 - \bar{CO}_2)(PM_{2.5} - \bar{PM}_{2.5})}{\sqrt{\sum(CO_2 - \bar{CO}_2)^2 \sum(PM_{2.5} - \bar{PM}_{2.5})^2}} \quad (3)$$

В ходе моделирования было получено значение:

$$r \approx 0.95$$

что свидетельствует о сильной линейной зависимости между CO_2 и $\text{PM}_{2.5}$.

Расширенная модель с учетом фоновых факторов [6].

Для повышения точности модель может быть расширена с учетом метеорологических параметров:

$$PM_{2.5} = a \cdot CO_2 + c \cdot H + d \cdot T + e \quad (4)$$

где:

H - относительная влажность воздуха, %;

T - температура окружающей среды, °C;

c, d - весовые коэффициенты влияния среды;

e - систематическая погрешность.

Данная модель особенно эффективна при длительном мониторинге и использовании машинного обучения.

Полученная математическая модель позволяет: 1. прогнозировать уровень $\text{PM}_{2.5}$ по данным CO_2 в реальном времени; 2. использовать более дешевые CO_2 -датчики для предварительной оценки загрязнения; 3. реализовать алгоритмы раннего оповещения в автоматизированных системах мониторинга; 4. обосновывать экологические решения по озеленению и снижению выбросов. Математическая модель зависимости $PM_{2.5} = f(CO_2)$ подтверждает, что концентрация углекислого газа может служить информативным индикатором уровня мелкодисперсных загрязнений. Использование данной модели в автоматизированных системах мониторинга повышает оперативность экологического контроля и эффективность природоохранных мероприятий [7]. Для исследования взаимосвязи концентрации углекислого газа (CO_2) и мелкодисперсных частиц $\text{PM}_{2.5}$ использовалась имитационная модель суточного мониторинга атмосферного воздуха в городской среде. Измерения проводились с временным шагом 1 час (рис.1.). В качестве аппаратной основы предполагалось использование:

NDIR-датчика CO₂ (диапазон 0 – 5000 ppm, погрешность \pm (50 ppm + 3%)); лазерного датчика PM2.5 (диапазон 0 – 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, разрешение 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

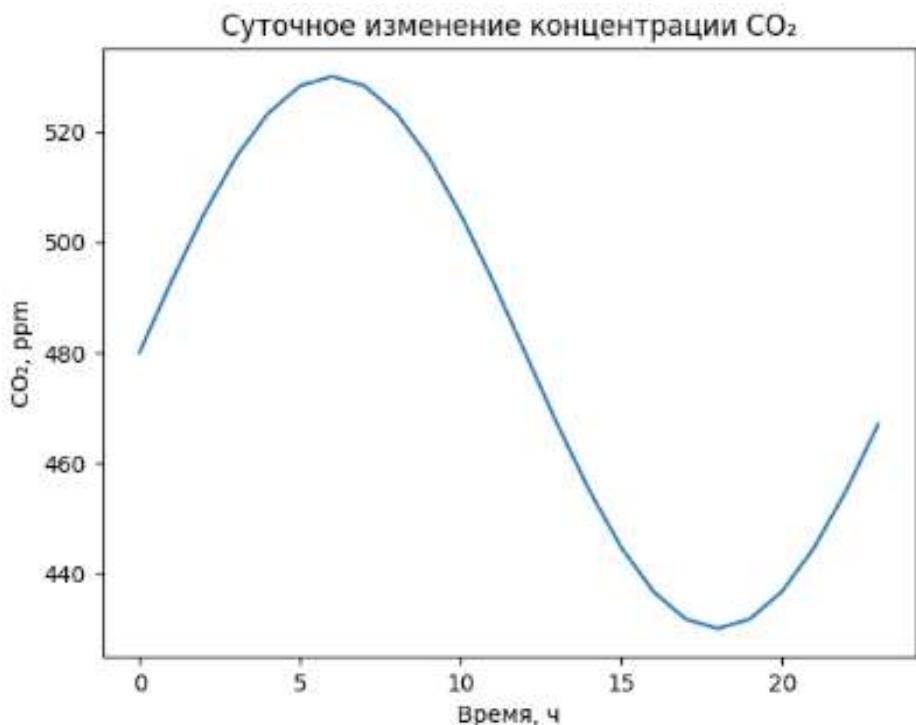


Рис.1. Суточное изменение концентрации CO₂

На первом графике представлена зависимость концентрации CO₂ от времени суток. Максимальные значения CO₂ наблюдаются в утренние и вечерние часы, что соответствует пиковым нагрузкам автомобильного транспорта. Минимальные концентрации фиксируются в дневное время, что объясняется усилением фотосинтетической активности зеленых насаждений и лучшей вентиляцией атмосферы. Полученная форма кривой соответствует типичным урбанизированным зонам. CO₂ может использоваться как косвенный индикатор антропогенной активности и интенсивности загрязнения воздуха [8].

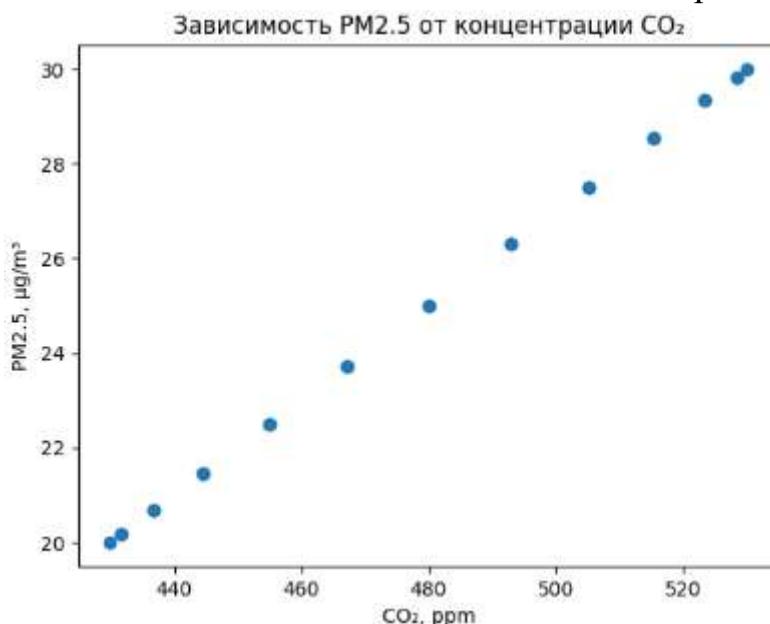


Рис.2. Зависимость PM2.5 от концентрации CO₂

На втором графике показана корреляционная зависимость между концентрациями CO₂ и PM2.5. Наблюдается выраженная положительная корреляция между CO₂ и PM2.5. При увеличении CO₂ с 430 – 450 ppm до 520 – 530 ppm концентрация PM2.5 возрастает примерно с 20 до 30 µg/m³ (рис.2). Это указывает на общие источники загрязнения (транспорт, сжигание топлива, промышленность). Рост CO₂ отражает увеличение выбросов, которые одновременно содержат твердые частицы PM2.5, что подтверждает возможность комплексного мониторинга (рис.3) [9].

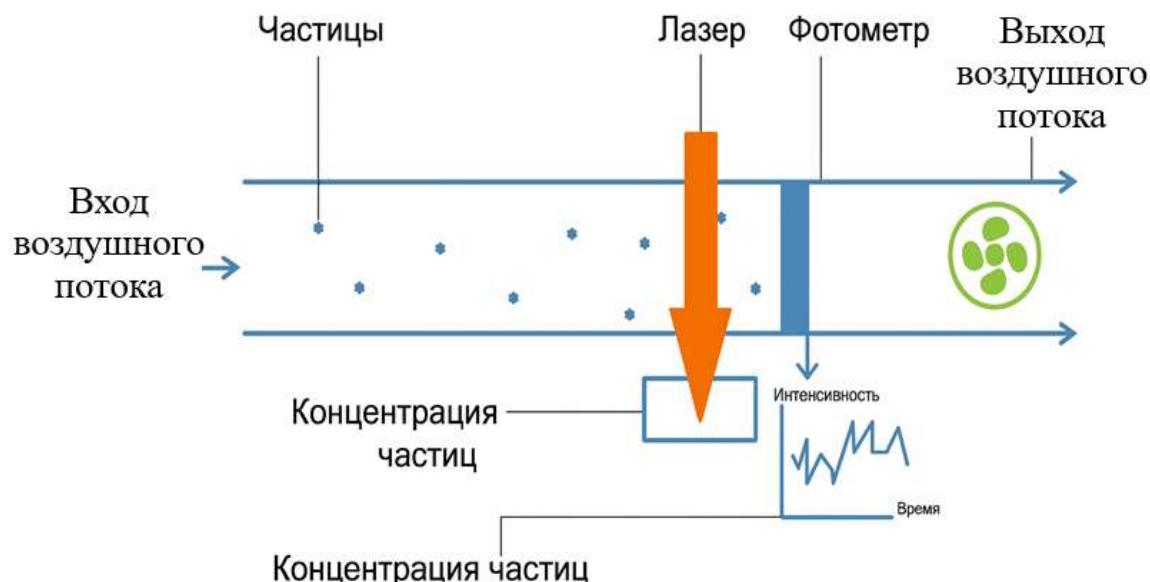


Рис.3. Технологическая схема объекта

Характеристики автоматизированной системы мониторинга

Параметр	Значение
Диапазон измерения CO ₂	0–5000 ppm
Диапазон измерения PM2.5	0–500 µg/m ³
Частота опроса датчиков	1–60 с
Тип передачи данных	Wi-Fi / LoRa / GSM
Задержка передачи	≤ 2 с
Режим работы	Непрерывный, 24/7
Обработка данных	Локальная + облачная

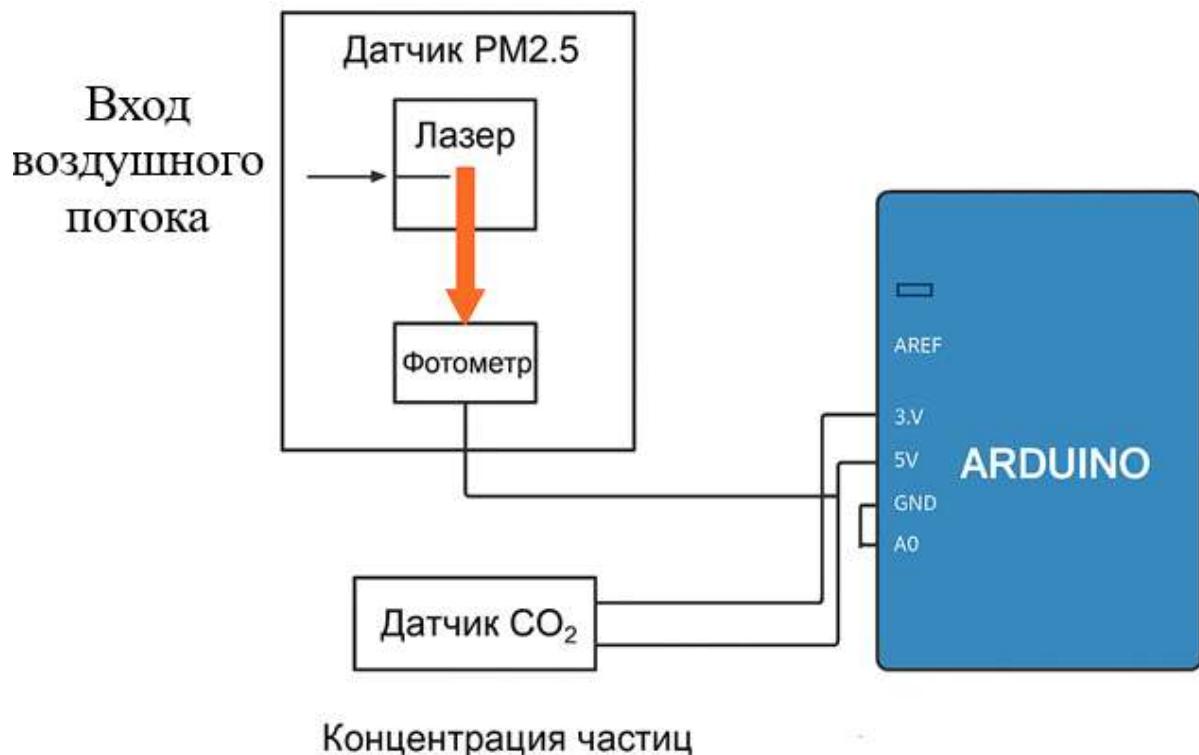


Рис.4. Функционально - технологическая схема объекта



Рис.5. Блок-алгоритм управления объекта

Обработка данных реализована по гибридному принципу и включает локальный уровень, обеспечивающий фильтрацию и расчёт показателей в реальном времени, а также облачный уровень, предназначенный для долговременного хранения и аналитической обработки данных мониторинга (рис.4). Программная реализация системы мониторинга выполнена на платформе Arduino. Алгоритм обеспечивает считывание данных датчика CO₂, цифровую фильтрацию сигнала, вычисление концентрации PM2.5 по математической модели и контроль превышения допустимых значений в реальном времени. Алгоритм работы системы начинается со считывания данных датчика CO₂, после чего выполняется цифровая фильтрация сигнала [10]. Далее концентрация PM2.5 рассчитывается по математической модели. Полученное значение сравнивается с предельно допустимой концентрацией, и в случае превышения формируется сигнал тревоги. Результаты измерений передаются для локальной индикации и дальнейшей обработки. Каждому блоку алгоритма, представленному на (рис.5), соответствует отдельный фрагмент программного кода. Такая структура обеспечивает модульность, масштабируемость и

возможность дальнейшей интеграции системы с облачными платформами мониторинга качества воздуха. Код программы на языке C++ для управления объекта.

<pre>#define CO2_PIN A0 #define LED_PIN 8 #define BUZZER_PIN 9 const float a = 0.045; const float b = -0.1; const float alpha = 0.2; const float PM25_LIMIT = 25.0; float co2_ppm = 0.0; float co2_filtered = 0.0; float pm25 = 0.0; void setup() { Serial.begin(9600); pinMode(LED_PIN, OUTPUT); pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT); digitalWrite(LED_PIN, LOW); digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW); Serial.println("Система мониторинга CO2 и PM2.5 запущена"); } void loop() { int raw = analogRead(CO2_PIN); co2_ppm = map(raw, 0, 1023, 400, 2000);</pre>	<pre>co2_filtered = alpha * co2_ppm + (1 - alpha) * co2_filtered; pm25 = a * co2_filtered + b; if (pm25 > PM25_LIMIT) { digitalWrite(LED_PIN, HIGH); digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH); } else { digitalWrite(LED_PIN, LOW); digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW); } Serial.print("CO2: "); Serial.print(co2_ppm); Serial.print(" ppm "); Serial.print("CO2_f: "); Serial.print(co2_filtered); Serial.print(" ppm "); Serial.print("PM2.5: "); Serial.print(pm25); Serial.println(" ug/m³"); delay(2000);</pre>
--	---

Выводы. В результате проведенного исследования установлено, что автоматизированный мониторинг загрязнения воздуха по показателям CO₂ и PM2.5 является эффективным инструментом экологического контроля. Выявлена взаимосвязь между концентрацией углекислого газа и уровнем твердых частиц, особенно в зонах с высокой антропогенной нагрузкой. Использование автоматизированных систем мониторинга в сочетании с мерами по озеленению территорий позволяет существенно повысить качество атмосферного воздуха и снизить экологические риски для населения.

Список использованной литературы:

1. Кондратьев К.Я. Атмосфера и климат. Гидрометеоиздат, 2015.
2. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. — М.: Наука, 1989. — 261 с.
3. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. — М.: Гидрометеоиздат, 1984. — 560 с.

4. Реймерс Н. Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). — М.: Россия молодая, 1994. — 367 с.
5. Голицын Г. С. Физика атмосферы и климат. — М.: Физматлит, 2009. — 432 с.
6. Кондратьев К. Я. Атмосферный аэрозоль и загрязнение воздуха. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 224 с.
7. Колмогоров А. Н. Основы теории вероятностей. — М.: Наука, 1982. — 120 с.
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
9. Красовский Н. Н. Теория управления движением. — М.: Наука, 1987. — 476 с.
10. Калман Р. Э. Новый подход к линейной фильтрации и прогнозированию. // Труды ASME. — 1960. — Т. 82. — С. 35–45.