

УДК: 004.021

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПО КОНЦЕНТРАЦИИ CO<sub>2</sub> 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 (CO<sub>2</sub>) и твердых взвешенных частиц PM2.5. Показана взаимосвязь между уровнем CO<sub>2</sub> 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, CO<sub>2</sub>, 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 (CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> и PM2.5 на качество атмосферного воздуха и

здоровье человека. 2. Исследовать взаимосвязь между концентрациями CO<sub>2</sub> и твердых частиц PM<sub>2.5</sub>. 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 PM<sub>2.5</sub> 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 CO<sub>2</sub> часто сопровождается увеличением уровня PM<sub>2.5</sub>, 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 CO<sub>2</sub> и PM<sub>2.5</sub> является озеленение. Деревья и кустарники: поглощают CO<sub>2</sub> в процессе фотосинтеза; улавливают твердые частицы на поверхности листьев; снижают температуру и улучшают микроклимат [4].

**Экспериментальные результаты и их анализ.** Математическая модель зависимости концентрации PM<sub>2.5</sub> от CO<sub>2</sub> обоснование выбора модели. Как показал экспериментальный анализ (см. график зависимости PM<sub>2.5</sub> от CO<sub>2</sub>), 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 CO<sub>2</sub> на уровень PM<sub>2.5</sub> [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<sub>2.5</sub> - концентрация твердых частиц, мкг/м<sup>3</sup>;

CO<sub>2</sub> - концентрация углекислого газа, ppm;

a - коэффициент чувствительности PM<sub>2.5</sub> к изменению CO<sub>2</sub>;

b - фоновая концентрация PM<sub>2.5</sub>.

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  $PM_{2.5}$  на  $4.5 \text{ мкг/м}^3$ ;

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

Оценка адекватности модели

Для оценки качества модели используется коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum(CO_2 - \overline{CO_2})(PM_{2.5} - \overline{PM_{2.5}})}{\sqrt{\sum(CO_2 - \overline{CO_2})^2 \sum(PM_{2.5} - \overline{PM_{2.5}})^2}} \quad (3)$$

В ходе моделирования было получено значение:

$$r \approx 0.95$$

что свидетельствует о сильной линейной зависимости между  $CO_2$  и  $PM_{2.5}$ .

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  $PM_{2.5}$  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  $PM_{2.5}$  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 CO<sub>2</sub> (диапазон 0 – 5000 ppm, погрешность  $\pm (50 \text{ ppm} + 3\%)$ ); лазерного датчика PM2.5 (диапазон 0 – 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , разрешение 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

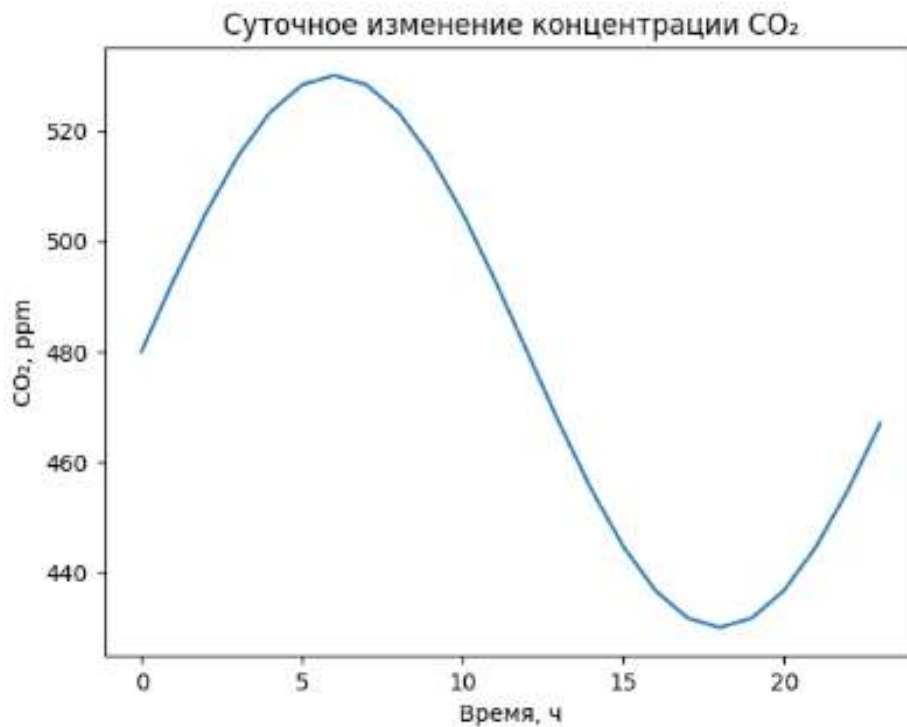


Рис.1. Суточное изменение концентрации CO<sub>2</sub>

На первом графике представлена зависимость концентрации CO<sub>2</sub> от времени суток. Максимальные значения CO<sub>2</sub> 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. CO<sub>2</sub> может использоваться как косвенный индикатор антропогенной активности и интенсивности загрязнения воздуха [8].

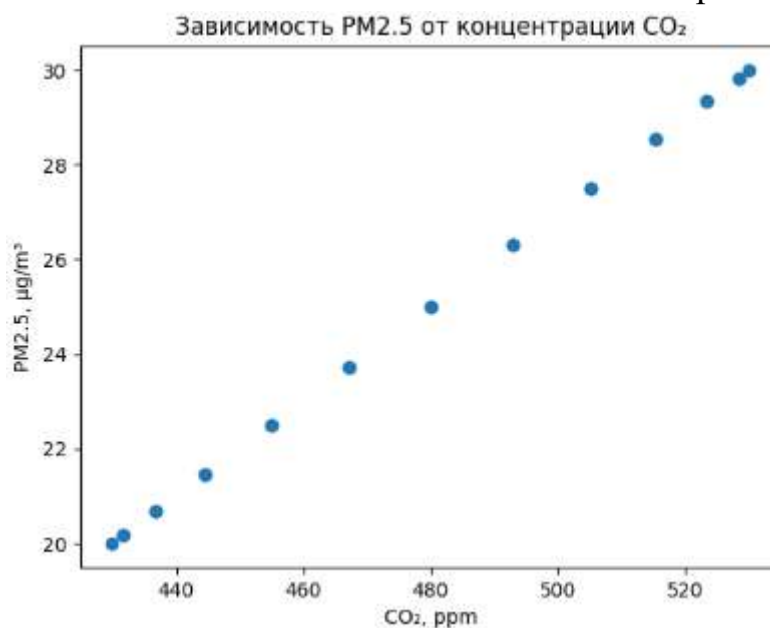


Рис.2. Зависимость PM2.5 от концентрации CO<sub>2</sub>

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

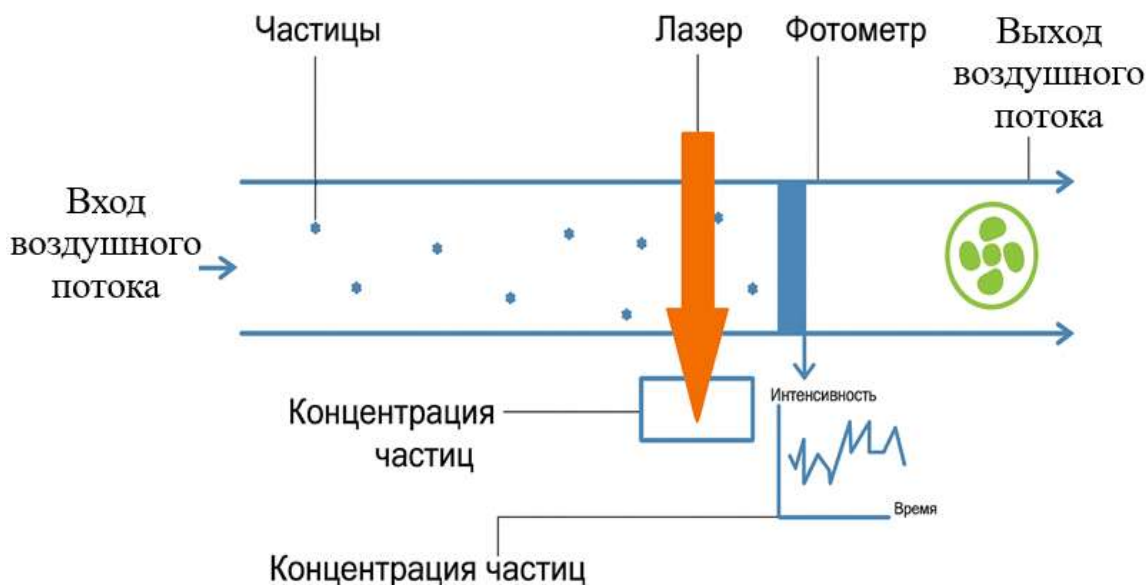


Рис.3. Технологическая схема объекта

#### Характеристики автоматизированной системы мониторинга

| Параметр                           | Значение                |
|------------------------------------|-------------------------|
| Диапазон измерения CO <sub>2</sub> | 0–5000 ppm              |
| Диапазон измерения PM2.5           | 0–500 µg/m <sup>3</sup> |
| 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    |

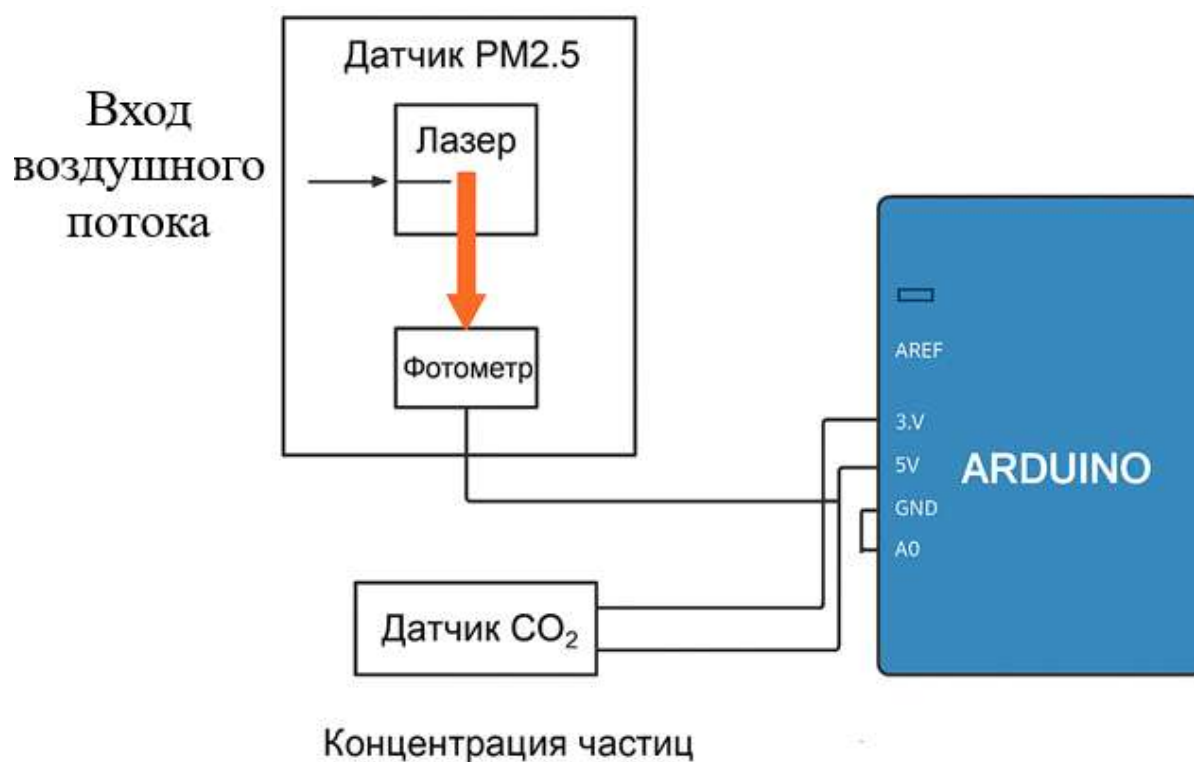


Рис.4. Функционально - технологическая схема объекта



Рис.5. Блок-алгоритм управления объекта

Обработка данных реализована по гибриднему принципу и включает локальный уровень, обеспечивающий фильтрацию и расчёт показателей в реальном времени, а также облачный уровень, предназначенный для длительного хранения и аналитической обработки данных мониторинга (рис.4). Программная реализация системы мониторинга выполнена на платформе Arduino. Алгоритм обеспечивает считывание данных датчика CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>, 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 &gt; 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 CO<sub>2</sub> 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. Гидрометеиздат, 2015.
2. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. — М.: Наука, 1989. — 261 с.
3. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. — М.: Гидрометеиздат, 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.: Гидрометеиздат, 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.