

УДК 54.08

В.А. Хорев, terphi1984@gmail.com

А.С. Джураева, aseldzhuraeva@gmail.com

Кыргызско-Германский Университет Прикладной Информатики

СПОСОБ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОЗДУХЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА SENSIRION SCD40 И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА WEMOS D3 UNO

В данной статье был рассмотрен современный метод анализа уровня CO_2 в воздухе с помощью датчика Sensirion SCD40 и микроконтроллера WeMos D3 Uno. Были рассмотрены характеристики датчика, характеристики микроконтроллера, схема сборки и пример использования. Также были рассмотрены несколько способов размещения датчиков в помещении. Проанализировав все существующие методы, автор составил математическую модель для вычисления концентрации CO_2 в любой точке помещения с использованием метода билинейной интерполяции.

Ключевые слова: датчик, микроконтроллер, углекислый газ, CO_2 , воздух

Введение

Общеизвестно, что в современном мире стремительно возрастает роль технологии «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT), благодаря которой миллиарды устройств, датчиков и систем соединены в единую сеть, обеспечивая непрерывный обмен информацией и позволяя осуществлять мониторинг и управление различными процессами в реальном времени. «Интернет вещей» позволяет устройствам связи, вычислений, хранения, датчиков и дисплеев обмениваться информацией в одном и том же представлении, а компоненты системы могут динамически собираться в соответствии с потребностями задачи, а не ограничиваться рамками коробки [1].

Одной из наиболее актуальных задач является использование датчиков IoT для сбора данных и измерения параметров окружающей среды. На сегодняшний день интернет вещей глубоко проник во все сферы деятельности: добывающая, обрабатывающая, пищевая промышленность, логистика, финансовый сектор, страхование, энергетика, строительство, транспорт и ЖКХ [2]. Однако, несмотря на широкий спектр доступных технологий сбора данных, остается задача их эффективной обработки, позволяющей в реальном времени принимать обоснованные решения.

Актуальность задач обработки и прогнозирования параметров качества воздуха подтверждается исследованиями, посвященными моделированию индекса качества воздуха в условиях городской застройки и ограниченной сети измерений, в том числе для г. Бишкек [3].

Считается, что важнейшим параметром окружающей среды является концентрация диоксида углерода, также известного, как диоксид углерода или углекислый газ.

Избыточный уровень CO_2 приводит к ухудшению самочувствия, снижению концентрации и производительности людей. Исследование, проведенное в 1964 году, приходит к выводу, что кратковременно вдыхание здоровыми людьми двуокиси углерода в концентрациях 0,5% и 0,1% вызывает отчетливые сдвиги в функции внешнего дыхания, кровообращения и электрической активности головного мозга, а концентрация CO_2 в воздухе жилых и общественных зданий не должна превышать 0,1% [4].

Исследования показывают, что углекислый газ, накапливаемый в помещениях жилых и административных зданий, может оказывать существенное влияние на качество воздуха, приводить к серьезным, а в некоторых случаях опасным последствиям для людей [5].

Неблагоприятные параметры воздуха внутри помещения повышают смертность стариков, увеличивают риски прохождения беременности, снижают производительность труда, усиливают утомляемость, провоцирует активизацию хронических заболеваний [6].

Наиболее строгий контроль за концентрацией углекислого газа должен осуществляться в учебных учреждениях. Санитарные правила и нормативы Кыргызской Республики

накладывают ограничения: «Средняя концентрация диоксида углерода в учебном помещении не должна превышать 1500 частиц на миллион (ppm)» [7].

Изучение и моделирование зависимости концентрации CO_2 в учебных аудиториях позволит подсветить проблему влияния диоксида углерода на самочувствие студентов и проконтролировать соблюдение санитарных нормативов.

Выбор способа анализа и сохранения данных о содержании CO_2

Существуют достаточно много видов анализа данных о содержании диоксида углерода. Перечислим основные виды анализа:

– **Масс-спектрометрия.** Проба анализируемого вещества (газа) подается в вакуумную камеру. Сразу за входным отверстием поступающий газ ионизируется пучком электронов, идущих с анода ионизатора. Далее ионизированный газ проходит через мощное постоянное магнитное поле, которое отклоняет траектории движения ионизированных частиц газа. Ионы с более высоким отношением массы к заряду отклоняются на меньший угол вследствие своей большей инертности. В итоге газ разделяется на потоки по химическому составу [8]. В настоящее время представлены портативные статические масс-спектрометры, предназначенные для диагностики нарушений в работе органов дыхания [9].

– **Рамановская спектрометрия.** Принцип действия датчика основан на явлении рамановского сдвига. Идея метода — при переходе молекул из инициированного лазером возбужденного состояния в низкоэнергетическое они излучают световую энергию специфического спектра. Пробы газа поступают в измерительную камеру, в которой облучаются аргоновым лазером. В результате облучения молекулы газа переходят в возбужденное состояние. Обратный переход сопровождается излучением более низкой энергии и большей длины волны. В спектре вторичного излучения присутствуют длины волн, отсутствующие в первичном спектре. Величина рамановского сдвига для каждого газа сугубо специфична [8].

– **Инфракрасный фотоакустический анализ.** Принцип работы основан на звуковом сопровождении перехода молекул газа в возбужденное состояние под действием инфракрасного излучения. Переход в возбужденное состояние молекул каждого из газов осуществляется на строго определенной длине волны инфракрасного излучения [8]. Фотоакустические датчики служат достоверным источником информации об углекислом газе в окружающем воздухе [10].

– **Ультразвуковой скоростной анализ.** Основан на измерении скорости ультразвука при прохождении его через углекислый газ. В качестве источников и приемников сигнала обычно используются пьезоизлучатели. Падение скорости ультразвука пропорционально концентрации [8].

– **Ультразвуковой абсорбционный анализ.** Данный метод основан на поглощении ассиметричными молекулами ультразвука определенной длины волны. В качестве источников и приемников сигнала тоже используются пьезоизлучатели. Амплитуда прошедшего через газ сигнала обратно пропорциональна концентрации [8].

– **Инфракрасный оптический анализ.** Принцип работы основан на том, что у важнейших компонентов воздушной среды — азота, кислорода и инертных газов, а также водорода инфракрасный (ИК) спектр поглощения полностью отсутствует. В то же время интенсивное поглощение ИК-излучения — наиболее характерное свойство линейной и симметричной молекулы CO_2 [11]. Амплитуда прошедшего через газ сигнала обратно пропорциональна концентрации. В качестве источников инфракрасного излучения используются либо светодиоды, либо твердотельные лазеры [8].

После анализа всех альтернатив для анализа содержания был выбран фотоакустический анализ. Его достоинства: высокая точность и стабильность работы [8], а также широкий ассортимент фотоакустических датчиков в продаже.

Для сбора данных был выбран фотоакустический датчик CO_2 Sensirion SDC40. Этот датчик обеспечивает высокую точность и стабильность измерений, относительно невысокое

энергопотребление и компактные размеры. Этот датчик позволяет измерять уровень CO₂ в интервале от 400 до 2000 PPM, а погрешность датчика составляет 50 PPM + 5% от измеренного значения [13].

Изображение датчика приведено на рисунке 1.

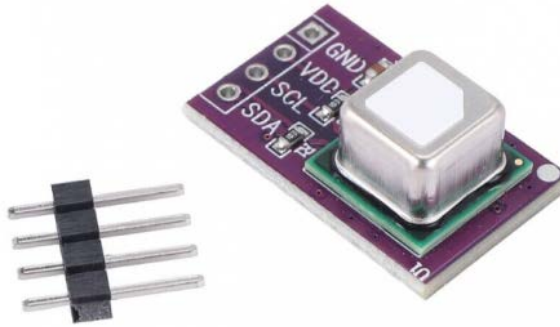


Рисунок 1 – Изображение датчика SCD40

Для передачи собранных данных был выбран канал Wi-Fi как наиболее доступный и легко реализуемый. Более того, исследования показывают, что для современных сетей стандарта Wi-Fi 802.11n существует значительно больше механизмов компенсации проблем многолучевого распространения сигнала [12]. Поэтому в качестве основы для прибора была выбрана плата WeMos D1 UNO R3 Wi-Fi.

Это высокотехнологичная плата, предназначенная для разработки проектов с использованием Wi-Fi. Она основана на современном высокопроизводительном чипе ESP8266, обеспечивающем стабильную и быструю беспроводную связь. Плата совместима с Arduino UNO R3, что упрощает интеграцию и программирование.

Изображение платы приведено на рисунке 2.

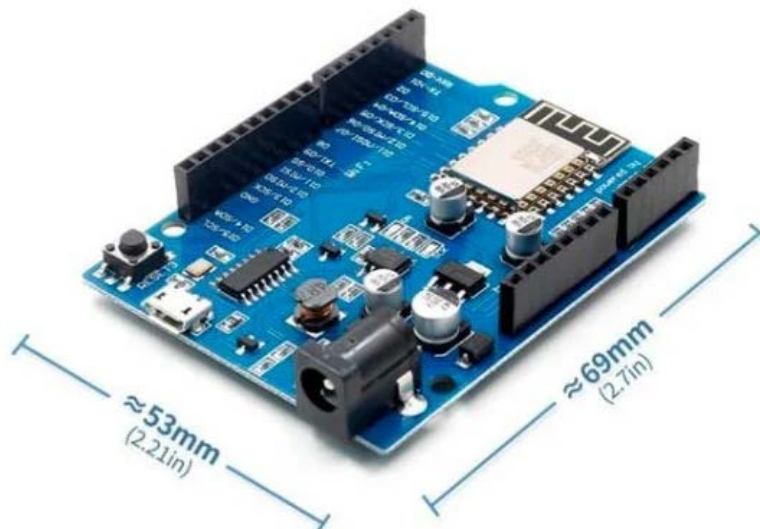


Рисунок 2 – Изображение WeMos D3 Uno

Поскольку для питания платы требуется источник питания не менее 5 вольт [14], то для питания платы был выбран стандартный блок питания на 8 вольт, который подключается к розетке.

Микроконтроллер ESP8266, на основе которого создана плата WeMos D3 Uno, поддерживает последовательную асимметричную шину I2C [15], которая является наиболее удобным способом подключения к датчику CO₂ Sensirion SDC40. Схема подключения WeMos D3 Uno к Sensirion SDC40 по шине I2C приведена на рисунке 3.

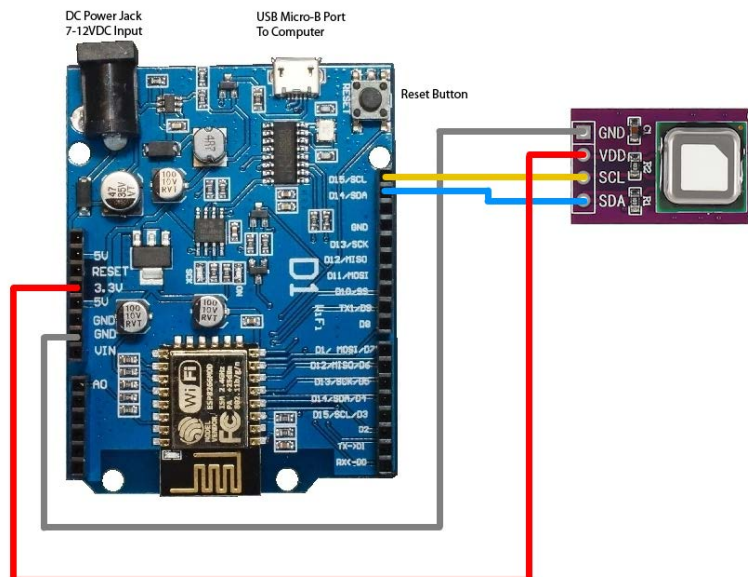


Рисунок 3 – Схема подключения

Для взаимодействия с датчиком была написана программа-скетч на языке программирования C++. Эта программа собирает текущие показания данных по CO₂, влажности воздуха и температуры с интервалом в 10 минут и отправляет эти данные по протоколу HTTP на удаленный сервер, используя сеть Wi-Fi.

Фотография полностью собранного датчика изображена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Фотография собранного датчика

Математическая модель оценки качества воздуха

Оценим способы измерения уровня углекислого газа в помещении. Для простоты представим, что помещение, в котором будут производиться измерения, представляет из себя прямоугольник на двухмерной поверхности с осями XY. В таком случае уровень CO₂ представляет из себя поле $V(x, y)$. Задача заключается в том, чтобы с наибольшей точностью вычислить уровень CO₂ в любой точке этого поля.

Существуют много различных топологий расположений датчиков, однако наиболее предпочтительной является смешанная топология. В сети, построенной по смешанной топологии, каждый датчик связывается со своим ближайшим соседом. В этом смысле работа схожа на работу в сети точка-точка. Такая сеть позволяет покрывать большие территории, а при выходе координатора его функции может выполнять другой датчик. Такая взаимозаменяемость обеспечивает высокую надёжность работы сети и способность к самовосстановлению [16].

Построим смешанную топологию, используя 4 датчика. Для простоты расчетов пример, что четыре датчика размещаются по углам прямоугольного помещения (например V_{11} , V_{12} , V_{21} , и V_{22}), схема расположения датчиков изображена на рисунке 5.

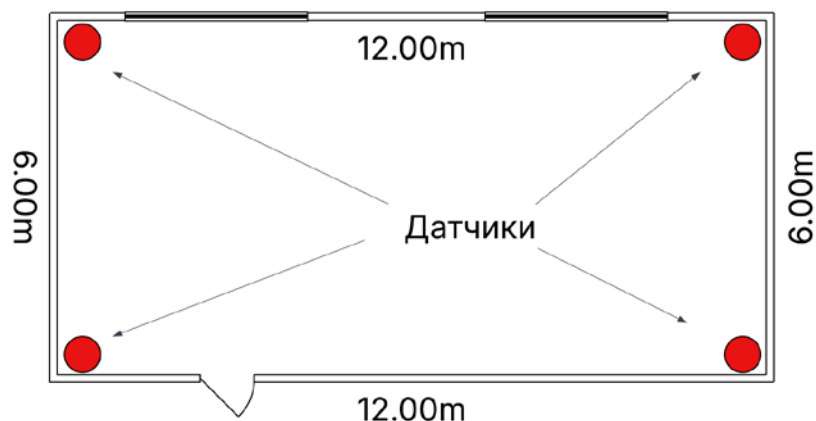


Рисунок 5 – схема расположения датчиков в углах помещения

Изображение конфигурации в виде поля $V(x, y)$ приведено на рисунке 6.

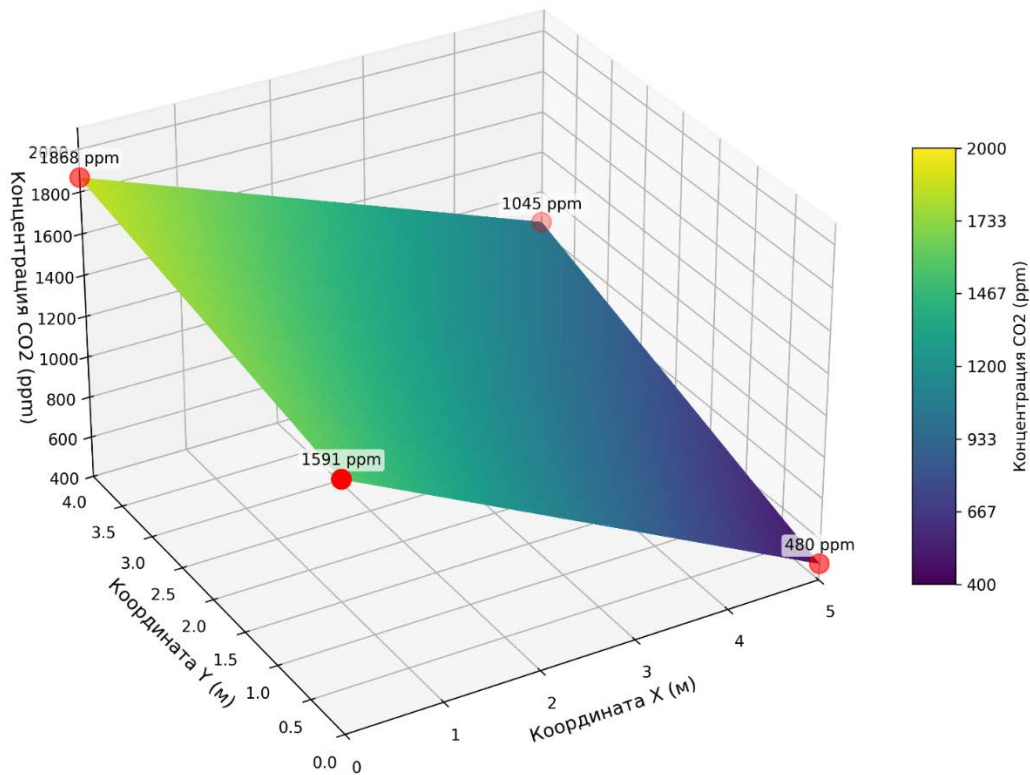


Рисунок 6 – изображение поля

Для точного восстановления поля CO₂ по измерениям с четырех угловых датчиков применяется билинейная интерполяция. Этот метод предполагает, что распределение градиентов внутри прямоугольной области относительно равномерно, что является приемлемым приближением для аудиторий с базовой вентиляцией.

Построим билинейную интерполяционную поверхность, задаваемую на множестве из четырех точек. Такая поверхность определяется так [17]:

$$V(x, y) = V_{11}(1 - \Delta x)(1 - \Delta y) + V_{21}\Delta x(1 - \Delta y) + V_{12}(1 - \Delta x)\Delta y + V_{22}\Delta x\Delta y. \quad (1)$$

Пусть углы комнаты имеют координаты:

$Q_{11} = (x_1, y_1)$ с концентрацией V_{11}

$Q_{21} = (x_2, y_1)$ с концентрацией V_{21}

$Q_{12} = (x_1, y_2)$ с концентрацией V_{12}

$Q_{22} = (x_2, y_2)$ с концентрацией V_{22} .

Концентрация CO₂ $V(x, y)$ в произвольной точке $P = (x, y)$ определяется по формуле:

$$V(x, y) = V_{11}f_{11}(x, y) + V_{21}f_{21}(x, y) + V_{12}f_{12}(x, y) + V_{22}f_{22}(x, y), \quad (2)$$

где $f_{ij}(x, y)$ – базисные функции, зависящие от нормированных расстояний.

Введем нормированные координаты (безразмерные веса):

$$\Delta x = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \Delta y = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \quad (3)$$

Тогда базисные функции принимают вид:

$$f_{11} = (1 - \Delta x)(1 - \Delta y) \quad (4)$$

$$f_{21} = \Delta x(1 - \Delta y) \quad (5)$$

$$f_{12} = (1 - \Delta x)\Delta y \quad (6)$$

$$f_{22} = \Delta x\Delta y. \quad (7)$$

Подставим базисные функции в общее уравнение для концентрации $V(x, y)$:

$$V(x, y) = V_{11}(1 - \Delta x)(1 - \Delta y) + V_{21}\Delta x(1 - \Delta y) + V_{12}(1 - \Delta x)\Delta y + V_{22}\Delta x\Delta y. \quad (8)$$

Таким образом, билинейная интерполяция представляет собой взвешенное среднее измеренных значений CO_2 в углах. Вес, присвоенный каждому угловому значению, V_{ij} , обратно пропорционален расстоянию до него от целевой точки $P(x, y)$.

Итоговую математическую модель можно выразить в матричной форме. Пусть $A = x_2 - x_1$ и $B = y_2 - y_1$ — это размеры помещения. Тогда концентрация $V(x, y)$ может быть выражена через матричное произведение:

$$V(x, y) = \frac{1}{AB} (x_2 - x \quad x - x_1) \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_2 - y \\ y - y_1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где:

- Первый вектор-строка представляет собой веса по оси x .
- Матрица V содержит измеренные угловые значения CO_2 .
- Вектор-столбец содержит веса по оси y .

Рассчитаем погрешность концентрации CO_2 с учетом того, что погрешность датчика составляет $50 \text{ PPM} + 5\%$ от измеренного значения [13]. В математической модели интерполированное значение V является линейной комбинацией независимых измерений V_{ij} с коэффициентами f_{ij} :

$$V = \sum V_{ij} f_{ij}. \quad (10)$$

Согласно закону распространения неопределенности для некоррелированных величин, общая дисперсия σ_V^2 равна сумме дисперсий, умноженных на квадрат частных производных [18] (или в данном случае на квадрат весовых коэффициентов):

$$\sigma_V^2 = \sum_{ij} \left(\frac{\partial V}{\partial V_{ij}} \right)^2 \sigma_{V_{ij}}^2. \quad (11)$$

Поскольку $\frac{\partial V}{\partial V_{ij}} = f_{ij}$ (базисная функция), то формула для дисперсии интерполированного значения принимает следующий вид:

$$\sigma_V^2 = f_{11}^2 \sigma_{V_{11}}^2 + f_{21}^2 \sigma_{V_{21}}^2 + f_{12}^2 \sigma_{V_{12}}^2 + f_{22}^2 \sigma_{V_{22}}^2, \quad (12)$$

где $\sigma_{V_{ij}}$ — это абсолютная погрешность измерения в углу (i, j) .

В центре комнаты, где все весовые коэффициенты f_{ij} примерно равны 0,25, дисперсия будет наименьшей, что указывает на максимальную точность интерполяции в центре и предсказуемое увеличение погрешности при приближении к границам из-за уменьшения количества влияющих точек.

Математическая модель расчета безопасного времени нахождения в помещении

Для расчета безопасного времени нахождения в помещении перепишем формулу (9), добавив зависимость от времени t . Концентрация CO_2 в любой точке (x, y) в момент времени t определяется матричной формой билинейной интерполяции, где измеренные угловые значения V_{ij} теперь являются функциями времени $V_{ij}(t)$:

$$V(x, y, t) = \frac{1}{AB} (x_2 - x \quad x - x_1) \begin{pmatrix} V_{11}(t) & V_{12}(t) \\ V_{21}(t) & V_{22}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_2 - y \\ y - y_1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Имея в распоряжении показания датчиков, поступающие с интервалом в 5 секунд, мы можем использовать метод скользящих средних для вычисления тренда (скорости изменения). Выбор этого метода обоснован тем, что скользящие средние широко используются как простые методы прогнозирования временных рядов [19].

Пусть $V_{ij}[k]$ это измерение в углу (i, j) в момент времени t_k . Размер окна (количество измерений) обозначим как W . Тогда скользящая средняя скорость роста в углу (i, j) за последние W измерений вычисляется по формуле:

$$\left(\frac{dV_{ij}}{dt} \right)_{MA} = \frac{1}{W} \sum_{k=1}^{W-1} \frac{V_{ij}[t_k] - V_{ij}[t_{k-1}]}{\Delta t_{\text{изм}}}. \quad (14)$$

Теперь мы можем объединить пространственную и временную модели для расчета времени, необходимого для достижения порогового значения V_{MAX} в любой точке (x, y) .

Сначала нужно вычислить интерполированную скорость роста $\left(\frac{dV_{ij}}{dt} \right)_{MA}(x, y)$ для целевой точки (x, y) , используя ту же формулу (14), но с данными скоростями роста:

$$\left(\frac{dV}{dt} \right)_{MA}(x, y) = \frac{1}{AB} (x_2 - x \quad x - x_1) \begin{pmatrix} \frac{dV_{11}}{dt} & \frac{dV_{12}}{dt} \\ \frac{dV_{21}}{dt} & \frac{dV_{22}}{dt} \end{pmatrix}_{MA} \begin{pmatrix} y_2 - y \\ y - y_1 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где матрица в центре $\begin{pmatrix} \frac{dV_{ij}}{dt} \end{pmatrix}$ содержит значения, вычисленные по формуле (14).

Зная скорость роста концентрации, мы можем рассчитать время, которое потребуется чтобы разница между пороговым значением V_{MAX} и текущим значением $V(x, y)$ была преодолена со скоростью $\left(\frac{dV}{dt} \right)_{MA}(x, y)$. Назовем этот временной интервал как **временной коэффициент безопасности**.

Временной коэффициент безопасности вычисляется по формуле:

$$\Delta t(x, y) = \frac{V_{MAX} - V(x, y)}{\left(\frac{dV}{dt} \right)_{MA}(x, y)}. \quad (16)$$

В качестве коэффициента V_{MAX} рекомендуется брать одно из следующих значений:

- $V_{MAX} = 1500$ ppm, как максимально разрешенный санитарными правилами и нормами Кыргызской Республики [2].
- $V_{MAX} = 1000$ ppm как пороговое значение, вызывавшее изменение ритма дыхания у испытуемых [4].

Если при расчете $\left(\frac{dV}{dt} \right)_{MA}(x, y) \leq 0$, то это означает, что концентрация CO_2 стабильна либо снижается. В этом случае $\Delta t(x, y) \rightarrow \infty$, или, иными словами, временной коэффициент безопасности стремится к бесконечности. С практической точки зрения это означает, что нахождение в помещении безопасно независимо от времени.

Если при расчете $\left(\frac{dV}{dt}\right)_{MA}(x, y) > 0$, то это означает, что концентрация CO_2 увеличивается. В этом случае временный коэффициент безопасности показывает, через какое время нахождения в помещении концентрация CO_2 достигнет критического уровня и будет влиять на самочувствие находящихся в помещении людей.

Если при расчете $V(x, y) \geq V_{MAX}$, то это означает, что концентрация CO_2 уже достигла порогового значения. При этом расчет $\Delta t(x, y)$ уже не имеет смысла, и можно принять что $\Delta t(x, y) = 0$.

Вычисленное значение временного коэффициента безопасности следует учитывать, например при планировании длительности занятий в учебной аудитории, а также для выбора способа рассадки студентов в помещении.

Расчет временного коэффициента безопасности

Проведем расчет для типовой аудитории 6 на 12 метров. Рассчитаем данные CO_2 в центре аудитории. Таким образом, $x_1=0$; $x_2=6$; $y_1=0$; $y_2=12$; $A = x_2 - x_1 = 6$; $B = y_2 - y_1 = 12$.

Данные о показаниях CO_2 приведены в таблице 1. Выберем $V_{MAX} = 1500$ ppm, а размер окна W выбрано, как равное 4. Интервал измерения $\Delta t_{изм}$ равен 10 минутам или 600 секунд.

Таблица 1 – измерение уровня CO_2

Концентрация CO_2	$t=t_0$	$t=t_1$	$t=t_2$	$t=t_3$
V_{11}	950 ppm	1050 ppm	1150 ppm	1250 ppm
V_{21}	1300 ppm	1400 ppm	1480 ppm	1540 ppm
V_{12}	1100 ppm	1050 ppm	1100 ppm	1050 ppm
V_{22}	1120 ppm	1180 ppm	1220 ppm	1280 ppm

Для начала рассчитаем по формуле (9) последнее значение коэффициента CO_2 в центре комнаты, в точке $x=3$, $y=6$:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{6 \cdot 12} (6 - 3 \quad 3 - 0) \begin{pmatrix} 1250 & 1050 \\ 1540 & 1280 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 12 - 6 \\ 6 - 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{72} (3 \quad 3) \begin{pmatrix} 1250 & 1050 \\ 1540 & 1280 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{72} (3 \cdot 1250 + 3 \cdot 1540 \quad 3 \cdot 1050 + 3 \cdot 1280) \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = \frac{1}{72} (8370 \quad 6990) \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{72} (8370 \cdot 6 + 6990 \cdot 6) = \frac{92160}{72} = 1280 \text{ ppm}.
 \end{aligned}$$

Теперь воспользуемся формулой (14) для расчета скользящей средней скорости роста коэффициента CO_2 в каждой из четырех углов:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{dV_{11}}{dt}\right)_{MA} &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^3 \frac{V_{11}[t_k] - V_{11}[t_{k-1}]}{600} = \frac{(1050 - 950) + (1150 - 1050) + (1250 - 1050)}{4 \cdot 600} = \\
 &= \frac{100+100+100}{2400} = \frac{300}{2400} = 0,125 \text{ ppm/c}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{dV_{21}}{dt}\right)_{MA} &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^3 \frac{V_{21}[t_k] - V_{21}[t_{k-1}]}{600} = \frac{(1400 - 1300) + (1480 - 1400) + (1540 - 1480)}{4 \cdot 600} = \\
 &= \frac{100+80+60}{2400} = \frac{240}{2400} = 0,1 \text{ ppm/c}
 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dV_{12}}{dt}\right)_{MA} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^3 \frac{V_{12}[t_k] - V_{12}[t_{k-1}]}{600} = \frac{(1050 - 1100) + (1100 - 1050) + (1050 - 1100)}{4 \cdot 600} =$$

$$= \frac{(-50)+50+(-50)}{2400} = \frac{-50}{2400} = -0,020833 \text{ ppm/c}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dV_{22}}{dt}\right)_{MA} &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^3 \frac{V_{22}[t_k] - V_{22}[t_{k-1}]}{600} = \frac{(1180 - 1120) + (1220 - 1180) + (1280 - 1220)}{4 \cdot 600} = \\ &= \frac{60+40+60}{2400} = \frac{160}{2400} = 0,06667 \text{ ppm/c} . \end{aligned}$$

Вычислив скользящую среднюю скорость роста коэффициента CO_2 в каждой из четырех углов, воспользуемся формулой (15) для того, чтобы вычислить интерполированную скорость роста в центре комнаты:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dV}{dt}\right)_{MA} &= \frac{1}{6 \cdot 12} (6 - 3 \quad 3 - 0) \begin{pmatrix} 0,125 & -0,020833 \\ 0,1 & 0,06667 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 12 - 6 \\ 6 - 0 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{72} (3 \quad 3) \begin{pmatrix} 0,125 & -0,020833 \\ 0,1 & 0,06667 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{72} (3 \cdot 0,125 + 3 \cdot 0,1 \quad 3 \cdot (-0,020833) + 3 \cdot 0,06667) \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{72} (0,675 \quad 0,137511) \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = \frac{6 \cdot 0,675 + 6 \cdot 0,137511}{72} = \frac{6 \cdot 0,812511}{72} = 0,06770925 \text{ ppm/c} . \end{aligned}$$

Зная интерполированную скорость роста коэффициента CO_2 в точке $x=3$, $y=6$, вычислим временной коэффициент безопасности по формуле (16):

$$\Delta t(x, y) = \frac{1500 - 1280}{0,06770925} = 3249 \text{ с} .$$

Таким образом, согласно расчетам, временной коэффициент безопасности составляет 3249 секунд или примерно 54 минуты.

Заключение

В ходе выполненной работы была поставлена цель – найти способ измерить концентрацию CO_2 в помещении, используя IoT-датчики, и создать математическую модель, позволяющую вычислить концентрацию CO_2 в любом месте внутри этого помещения. Для достижения этой цели был разработан и реализован комплексный подход, включающий в себя выбор способа измерения, выбор инструментов измерения, а также использование математического аппарата.

Для исследования был собран прибор на основе платы WeMos D1 UNO R3 Wi-Fi и фотоакустического датчика CO_2 Sensirion SDC40. Для этого прибора была написана программа-скетч на языке C++.

Для достижения оптимального баланса между качеством измерений и количеством используемых датчиков была выбрана топология, при которой четыре датчика располагаются в четырех углах аудитории прямоугольной формы. Каждый из четырех датчиков снимает показания и сохраняет их в базу данных, передавая информацию по Wi-Fi и протоколу HTTP.

Для вычисления концентрации CO_2 в любом другом месте внутри помещения была создана математическая модель, основанная на методе билинейной интерполяции. Для данной математической модели была также приведена оценка ее погрешности.

Математическая модель для расчета концентрации CO_2 была использована для расчета **временного коэффициента безопасности** – величины, характеризующей интервал времени, спустя который нахождение в помещении будет влиять на самочувствие находящихся в помещении людей. Для расчета временного коэффициента безопасности был применен

метод экстраполяции – метод скользящего окна. Оценивая показания CO₂, передаваемые датчиками, система рассчитывает скорость повышения уровня CO₂. Временный коэффициент безопасности определяется как время, в течение которого уровень CO₂ достигнет порогового значения с учетом вычисленной скорости.

В качестве примера был приведен расчет временного коэффициента безопасности для учебной аудитории размером 6 на 12 метров. Основываясь на данных показаниях CO₂, значение временного коэффициента безопасности было примерно равно 54 минуты.

Рекомендации по применению результатов:

– На основании расчетов можно разработать систему сигнализации, позволяющую отправить уведомления в специальные службы о скорости роста показаний CO₂ и оставшемся времени до достижения критического порога.

– На основе выявленных закономерностей можно разработать систему автоматической регулировки вентиляции, которая будет повышать интенсивность воздухообмена во время занятий, снижая концентрацию CO₂ и улучшая самочувствие людей.

– Исторические данные о концентрации CO₂ за достаточно большой период времени в совокупности с расписанием могут быть использованы для оптимизации использования аудиторного фонда, планирования графиков уборки, санитарной обработки, а также для оценки качества вентиляционных систем.

Подводя итог, проведенное исследование продемонстрировало важность применения технологий IoT и математического аппарата для вычисления параметров внутренней среды и поддержки принятия решений. Выполненная работа заложила основу для дальнейшего развития систем мониторинга и интеллектуального управления помещениями, что соответствует актуальным трендам цифровизации, энергоэффективности и повышения комфорта в зданиях.

Литература

1. Гершенфельд, Н. The Internet of Things / Н. Гершенфельд, Р. Крикорян, Д. Коэн // Scientific American. – 2004. – Oct. – (Дата обращения: 20.10.2025).
2. Умное будущее [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. – 2017. – 29 марта. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3256300> (дата обращения: 20.10.2025).
3. Лыченко Н. М., Великанова Л. И. Результаты моделирования среднесрочного прогноза индекса качества воздуха г. Бишкек // Проблемы автоматизации и управления. – 2023. – № 1(46). – С. 74–82.
4. О. В. Елисеева К. ОБОСНОВАНИЮ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В ВОЗДУХЕ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИИ // Гигиена и санитария. — 1964. — №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-obosnovaniyu-predelno-dopustimoy-kontsentratsii-dvuokisi-ugleroda-v-vozdruhe-zhilyh-i-obshchestvennyh-zdaniy> (дата обращения: 08.10.2025).
5. Малышев Владлен Платонович, Виноградов Олег Владимирович, Родионов Игорь Александрович. Факторы снижения качества воздуха в общественных и жилых помещениях // Проблемы анализа риска. — 2023. — №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/factory-snizheniya-kachestva-vozdruha-v-obshchestvennyh-i-zhilyh-pomescheniyah> (дата обращения: 08.10.2025).
6. Рогозин Д.М. Социальное движение за здоровые здания. [Рец. на кн.] Allen J.G., Macomber J.D. Healthy buildings: How Indoor Spaces Drive Performance and Productivity. Cambridge, MS: Harvard University Press, 2020 // Социологический журнал. — 2020. — Т. 26. — № 2. С. 183–191. DOI: 10.19181/socjour.2020.26.2.7273
7. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы [Электронный ресурс]: в редакции постановления правительства КР от 17 июня 2019 года № 295 // Централизованный

банк данных правовой информации Кыргызской Республики. – Режим доступа: <https://cbd.minjust.gov.kg/11948/edition/954726/ru>. – Загл. с экрана.

8. Терехов В. А. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИНЦИПОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В КАПНОГРАФИИ // Ползуновский вестник. — 2013. — №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-harakteristika-printsipov-izmereniya-kontsentratsii-uglekislogo-gaza-v-kapnografii> (дата обращения: 08.10.2025)

9. Козленок Андрей Валерьевич, Березина Аэлита Валерьевна, Коган Виктор Тувийевич, Лебедев Дмитрий Сергеевич, Григорьев Евгений Борисович, Красичков Александр Сергеевич. Портативный масс-спектрометр для диагностики состояния здоровья человека // Биотехносфера. — 2015. — №5 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/portativnyy-mass-spektrometr-dlya-diagnostiki-sostoyaniya-zdorovya-cheloveka> (дата обращения: 21.10.2025).

10. Гарягдыев Гуванч Чарыевич. ВАЖНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИОТ (INTERNET OF THINGS) В БОРЬБЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА // Наука, техника и образование. — 2023. — №2 (90). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vazhnost-izucheniya-tehnologii-iot-internet-of-things-v-borbe-s-izmeneniem-klimata> (дата обращения: 21.10.2025).

11. М. Т. Дмитриев, В. И. Киприн. ИНФРАКРАСНО-ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В ВОЗДУХЕ // Гигиена и санитария. — 1976. — №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/infrakrasno-fotometricheskoe-avtomaticheskoe-opredelenie-dvuokisi-ugleroda-v-vozdue> (дата обращения: 08.10.2025).

12. Дядюнов Александр Николаевич, Кадырбаева Анастасия Рустемовна. Особенности моделей каналов связи беспроводной локальной сети // Universum: технические науки. — 2016. — №2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-modeley-kanalov-svyazi-besprovodnoy-lokalnoy-seti> (дата обращения: 21.10.2025).

13. Sensirion SCD40 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/67FE0194/CD_DS_SCD4x_Datasheet_D1.pdf. – Загл. с экрана.

14. Wemos Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим Доступа: https://www.wemos.cc/en/latest/_static/files/sch_d1_mini_v4.0.0.pdf. – Загл. с экрана.

15. ESP8266 Technical Reference [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://documentation.espressif.com/esp8266-technical_reference_en.pdf. – Загл. с экрана.

16. Быбка А. И., Зеленин А. Н. Инженерные аспекты беспроводных телекоммуникационных технологий // ВЕЖПТ. — 2008. — №2 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenernye-aspekty-besprovodnyh-telekommunikatsionnyh-tehnologiy> (дата обращения: 21.10.2025).

17. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений/Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.

18. Аркашов Н.С. Теория вероятностей и случайные процессы: учеб. пособие / Н.С. Аркашов, А.П. Ковалевский. — 2-е изд. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. — 238 с.

19. Hyndman, R. Moving Averages [Электронный ресурс]. 2010. URL: <https://robjhyndman.com/papers/movingaverage.pdf> (дата обращения: 22.10.2025).