

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ УЧЕБНОГО КАБИНЕТА ПО УРОВНЮ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Ушаков А.С.

Омский государственный технический университет, Омск

Ключевые слова: учебные помещения, концентрация углекислого газа, автоматизированная система проветривания, управление воздухообменом, датчик CO₂, качество внутреннего воздуха, математическая модель, эффективность.

Аннотация. В статье рассматривается проблема поддержания нормативного качества воздуха в учебном кабинете при высокой заполняемости помещения и недостаточной эффективности традиционного ручного проветривания. Цель работы заключается в сравнительной оценке ручного и автоматизированного способа воздухообмена по уровню концентрации углекислого газа. В основу исследования положены данные о параметрах учебного помещения объемом 179,6 м³ и балансовая модель изменения концентрации CO₂, учитывающая выделение углекислого газа людьми, воздухообмен с наружной средой и управление работой вентилятора по сигналу датчика CO₂. Рассмотрены режимы ручного проветривания через окна, автоматизированного проветривания с одним вентилятором, а также вариант с двумя вентиляторами. Показано, что ручное проветривание не обеспечивает устойчивого поддержания качества воздуха, поскольку после кратковременного снижения концентрация CO₂ вновь быстро возрастает. Установлено, что автоматизированное управление воздухообменом позволяет удерживать концентрацию углекислого газа в более узком диапазоне и повышает эффективность вентиляции учебного помещения.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF AUTOMATED VENTILATION IN A CLASSROOM BASED ON CARBON DIOXIDE LEVELS

Ushakov A.S.

Omsk State Technical University, Omsk

Keywords: classroom, indoor air quality, carbon dioxide concentration, automated ventilation system, air exchange control, CO₂ sensor, mathematical model, ventilation efficiency.

Abstract. The article addresses the problem of maintaining standard indoor air quality in a classroom under conditions of high occupancy and insufficient efficiency of traditional manual ventilation. The aim of the study is a comparative assessment of manual and automated air exchange methods based on carbon dioxide concentration levels. The research is based on data describing a classroom with a volume of 179.6 m³ and on a balance model of CO₂ concentration dynamics that takes into account carbon dioxide emissions from occupants, air exchange with the outdoor environment, and fan control based on signals from a CO₂ sensor. The study considers manual window ventilation, automated ventilation using one fan, and a configuration with two fans. It is shown that manual ventilation does not ensure stable air quality maintenance, since after a short-term decrease, the CO₂ concentration rises rapidly again. It is established that automated control of air exchange makes it possible to maintain carbon dioxide concentration within a narrower range and improves the ventilation efficiency of the classroom.

Введение. Качество воздуха в учебных помещениях оказывает непосредственное влияние на самочувствие и работоспособность обучающихся. Одним из основных показателей эффективности воздухообмена является концентрация углекислого газа [1-3]. В кабинетах при большой загруженности и недостаточной вентиляции содержание CO₂ быстро возрастает [1, 2, 4].

В качестве основы исследования приняты результаты работы о периодическом проветривании учебного кабинета, где показано, что даже проветривание на переменах не обеспечивает устойчивого поддержания требуемого качества воздуха. Это позволяет сделать вывод о том, что ручное открывание окон является лишь частичной мерой, но не полноценным решением задачи [5, 6].

Научная новизна исследования заключается в построении и применении расчетной балансовой модели автоматизированного проветривания учебного кабинета по сигналу датчика CO_2 , позволяющей сопоставить эффективность ручного и автоматизированного воздухообмена для конкретных параметров помещения и оценить влияние производительности вентиляции на динамику концентрации углекислого газа.

I. Материалы и методы. В основу исследования положены данные, приведенные в работе Д.С. Симонова, А.Ю. Морозова, К.Д. Коноваловой, Е.Л. Миськовой «Влияние периодического проветривания в учебном кабинете на качество воздуха и микроклимат» [5]. Рассматриваемое в указанной работе помещение имеет площадь $55,6 \text{ м}^2$, высоту $3,23 \text{ м}$ и объем $179,6 \text{ м}^3$.

Указанные параметры используются в качестве расчетной базы для моделирования процессов накопления и удаления углекислого газа. В рамках исследования анализируются два принципиально разных подхода к организации воздухообмена [7]. Первый подход основан на ручном проветривании помещения через окна в течение перемен между занятиями. Второй подход предполагает автоматизированное проветривание с помощью вентилятора, установленного в отверстие диаметром 150 мм и включаемого только в те моменты, когда концентрация CO_2 превышает допустимое значение. Также был добавлен вариант второго подхода, который представляет собою два автоматизированных вентилятора с отверстиями диаметрами в 150 мм .

При построении модели были приняты следующие допущения. Воздух в помещении считается равномерно перемешанным. Концентрация углекислого газа в наружном воздухе принимается постоянной на расчетном интервале. Интенсивность выделения CO_2 людьми внутри кабинета также считается постоянной. Работа вентилятора рассматривается как управляемый источник воздухообмена с известной производительностью. Управление осуществляется по правилу: включение вентилятора происходит при достижении верхнего порога концентрации CO_2 , а отключение – при снижении концентрации до нижнего порога [8].

Такой подход позволяет получить простую, но наглядную модель, пригодную для оценки эффективности автоматизированного проветривания.

Процесс изменения концентрации углекислого газа в помещении описывается уравнением материального баланса:

$$V \frac{dC}{dt} = G_{\text{CO}_2} + L(C_{\text{out}} - C), \quad (1)$$

где V – объем помещения, м^3 , C – текущая концентрация CO_2 в помещении, ppm , t – время, ч, G_{CO_2} – суммарная интенсивность выделения CO_2 людьми в

помещении, ppm, L – расход вентиляционного воздуха, м³/ч, C_{out} – концентрация CO₂ в наружном воздухе, ppm.

Данное выражение показывает, что изменение концентрации CO₂ определяется, с одной стороны, его поступлением от людей, находящихся в помещении, а с другой – удалением загрязненного воздуха и замещением его наружным воздухом [5, 7].

В случае, когда организованный воздухообмен отсутствует или пренебрежимо мал, то есть $L \approx 0$, уравнение принимает более простой вид, а концентрация углекислого газа возрастает практически линейно:

$$C(t) = C_0 + \frac{G_{CO_2}}{V}t, \quad (2)$$

где $C(t)$ – концентрация CO₂ в момент времени (t), ppm; C_0 – начальная концентрация CO₂, V – объем помещения, м³, t – время, ч.

Если воздухообмен постоянен и управляем, решение уравнения баланса принимает следующий вид [5, 7]:

$$C(t) = C_{out} + \frac{G_{CO_2}}{L} + \left(C_0 - C_{out} - \frac{G_{CO_2}}{L} \right) e^{-Lt/V}, \quad (3)$$

где $C(t)$ – концентрация CO₂ в помещении в момент времени (t), $e^{-Lt/V}$ – экспоненциальный множитель, характеризующий скорость снижения отклонения концентрации от установившегося значения.

Из этого выражения следует, что при наличии регулярного воздухообмена концентрация CO₂ не растет бесконтрольно, а стремится к стационарному уровню. Этот уровень определяется формулой:

$$C_{ss} = C_{out} + \frac{G_{CO_2}}{L}, \quad (4)$$

где C_{ss} – установившаяся концентрация CO₂, ppm.

Следовательно, задача проектирования сводится к выбору такого расхода воздуха [10], при котором установившаяся концентрация не будет превышать рекомендуемого значения. Для помещений общественных зданий, как правило, принимают 2-й класс качества внутреннего воздуха, при котором превышение концентрации диоксида углерода в помещении над наружным воздухом не должно превышать порядка 400-600 см³/м³ (что соответствует ориентировочному диапазону 800-1000 ppm при типичной наружной концентрации около 400 ppm). Для помещений с менее строгими требованиями допускается 3-й класс качества воздуха с превышением порядка 600-1000 см³/м³ (примерно 1000-1400 ppm), что соответствует верхней границе допустимых значений содержания CO₂ в обслуживаемой зоне [3,9,11].

Для автоматизированного проветривания в работе предлагается использовать вентилятор, устанавливаемый в круглое отверстие диаметром 150 мм. Площадь проходного сечения определяется по формуле [12]

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5)$$

где d – диаметр отверстия, м.

При $d = 0,15$ м получаем:

$$A = \frac{\pi \cdot 0,15^2}{4} = 0,0177^2, \quad (6)$$

т.е. $0,177^2$ – площадь отверстия под вентилятор диаметром 150 мм.

Оценка расхода воздуха через такое отверстие может быть выполнена по зависимости [10, 12]:

$$L_f = 3600 \cdot A \cdot v, \quad (7)$$

где L_f – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; v – средняя скорость воздушного потока, $\text{м}/\text{с}$.

Результаты расчета сведены в (табл. 1), где показана зависимость расхода воздуха от средней скорости потока через рассматриваемое сечение. Даже такой сравнительно простой и недорогой вариант способен заметно ограничить рост концентрации CO_2 .

Табл. 1. Результаты расчёта воздухообмена для помещения $179,6 \text{ м}^3$

Скорость потока, $\text{м}/\text{с}$	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$	Воздухообмен, $1/\text{ч}$
2	127	0,7
3	191	1,1
4	255	1,4

Для исключения постоянной работы вентилятора и одновременного обеспечения требуемого качества воздуха предлагается применять двухпороговый алгоритм управления. Его математическая запись может быть представлена следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} 1, C(t) \geq Con, \\ 0, C(t) \leq Coff, \end{cases} \quad (8)$$

где $u(t)$ – управляющий сигнал; $u = 1$ – вентилятор включен; $u = 0$ – вентилятор выключен; Con – верхний порог включения, ppm; $Coff$ – нижний порог отключения, ppm.

Такое управление означает, что система не работает непрерывно, а включается только тогда, когда качество воздуха действительно ухудшается. Благодаря этому сокращаются энергетические затраты и снижаются теплотери по сравнению с режимом постоянной вентиляции.

II. Результаты и обсуждение. Результаты расчёта показали (табл. 2), что во всех рассмотренных сценариях концентрация углекислого газа в учебном кабинете возрастает по мере увеличения времени пребывания людей в помещении, однако характер этого роста существенно зависит от режима воздухообмена.

Наихудшие значения получены в сценарии, при котором организованное проветривание отсутствует. В этом случае концентрация CO_2 возрастает практически непрерывно в течение всего учебного дня и к его окончанию достигает $12526,1 \text{ ppm}$. Такой результат свидетельствует о крайне неблагоприятном состоянии воздушной среды и подтверждает, что отсутствие управляемого воздухообмена в учебном помещении недопустимо.

Наихудшие значения получены в сценарии, при котором организованное проветривание отсутствует. В этом случае концентрация CO_2 возрастает практически непрерывно в течение всего учебного дня и к его окончанию достигает $12526,1 \text{ ppm}$. Такой результат свидетельствует о крайне

неблагоприятном состоянии воздушной среды и подтверждает, что отсутствие управляемого воздухообмена в учебном помещении недопустимо [3, 9].

Табл. 2 Расчётные значения CO_2 в течении учебного дня

Время, мин	Без вентиляции, ppm	Периодическая вентиляция открытием окон, ppm	1 вентилятор 150 мм, ppm	2 вентилятора 150 мм, ppm
0	800,0	800,0	800,0	800,0
15	1451,4	1451,4	1235,2	1078,4
30	2102,9	2102,9	1540,6	1213,1
45	2754,3	2754,3	1754,9	1278,3
60	3405,8	1430,4	1905,5	1309,9
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
225	10571,7	5210,2	2252,5	1339,4
240	11223,2	2094,3	2254,6	1339,4
255	11874,6	2745,7	2256,1	1339,4
270	12526,1	3397,2	2256,6	1339,4

Режим периодического открывания окон 3 раза в день по 15 минут обеспечивает снижение концентрации CO_2 после каждого проветривания, однако этот эффект носит кратковременный характер. После закрытия окна содержание углекислого газа вновь быстро возрастает, поскольку его выделение обучающимися и преподавателем продолжается непрерывно. В результате к концу учебного дня расчётная концентрация составляет 3397,2 ppm, а максимальные значения в отдельные периоды превышают 5000 ppm. Это показывает, что редкое ручное проветривание хотя и лучше полного отсутствия воздухообмена, но не позволяет поддерживать качество воздуха на приемлемом уровне [5, 6].

Использование одной из систем автоматизированного воздухообмена (далее – САВ) с вентилятором диаметром 150 мм даёт более устойчивый результат по сравнению с оконным проветриванием. В этом случае рост концентрации CO_2 замедляется, а к концу учебного дня она достигает 2256,6 ppm. Следовательно, даже одна САВ обеспечивает более эффективное удаление загрязнённого воздуха, чем эпизодическое открывание окон. Тем не менее этого расхода воздуха недостаточно для удержания концентрации CO_2 вблизи рекомендуемых значений, особенно при полной заполняемости кабинета [2, 4].

Наиболее благоприятные результаты получены при установке двух САВ с вентилятором диаметром 150 мм в разных частях класса. В этом случае концентрация CO_2 возрастает значительно медленнее и к концу учебного дня стабилизируется на уровне около 1339,4 ppm. По сравнению с одной САВ наблюдается существенное снижение расчётных значений, а по сравнению с режимом оконного проветривания эффект оказывается ещё более выраженным. Это объясняется увеличением суммарного расхода воздуха и более равномерным воздухообменом в объёме помещения [7].

Полученные результаты на рисунке 1 позволяют сделать практический вывод. Основной недостаток ручного открывания окон состоит не только в малой

продолжительности проветривания, но и в его нерегулярности и отсутствии автоматического управления. Поскольку накопление CO_2 происходит непрерывно, эффективным может считаться только такой режим, который обеспечивает достаточно частый и предсказуемый воздухообмен. Именно поэтому САВ показывают лучшие результаты, чем оконное проветривание.

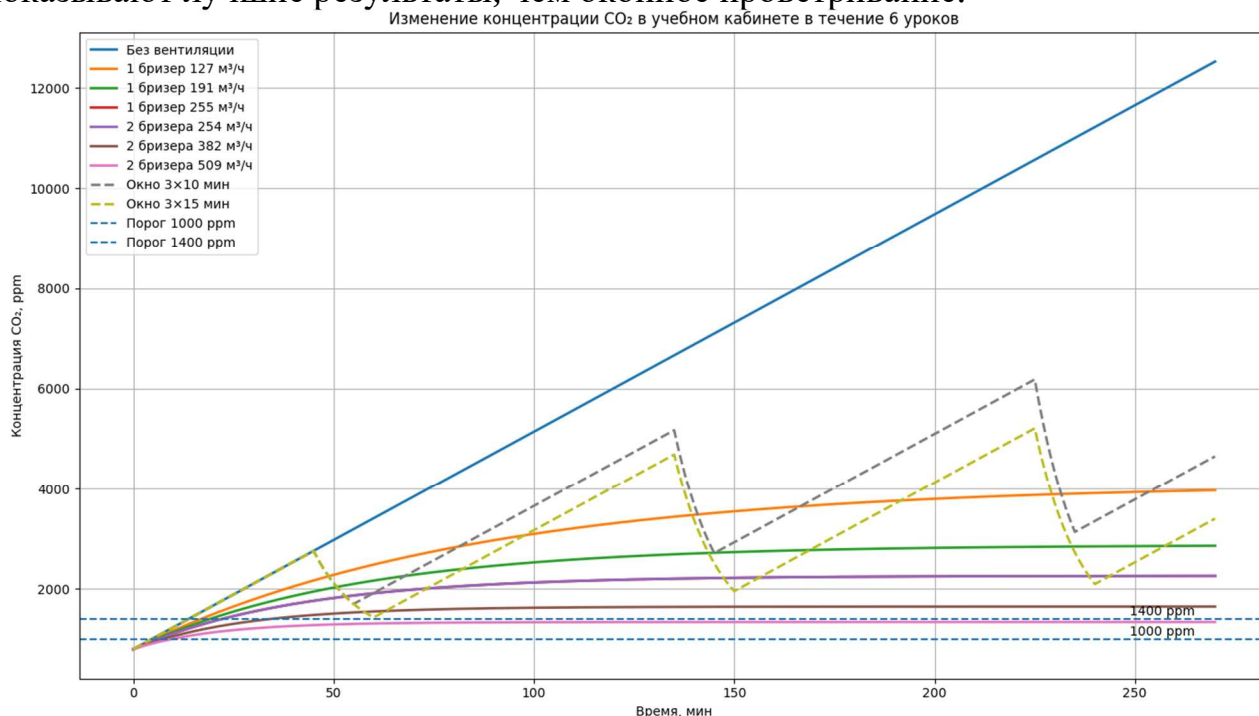


Рис. 1. Изменение концентрации CO_2 в учебном кабинете в течении 6 уроков

В целом расчёт подтверждает, что простое периодическое открывание окон не может рассматриваться как полноценный способ обеспечения качества воздуха в учебном кабинете. Более рациональным решением является применение механических устройств подачи или удаления воздуха, причём наилучший эффект достигается при увеличении их суммарной производительности. Для рассматриваемого кабинета наиболее эффективным из исследованных вариантов оказался режим с двумя САВ по 150 мм, однако и он не во всех случаях обеспечивает достижение уровня 1000 ppm, что указывает на необходимость дальнейшего подбора производительности системы вентиляции.

Заключение. Проведенный анализ показал, что периодическое ручное проветривание учебного кабинета путем открывания окон не обеспечивает устойчивого поддержания нормативного качества воздуха. Несмотря на кратковременное снижение концентрации CO_2 после проветривания, в дальнейшем она вновь быстро возрастает, поскольку сам процесс воздухообмена не автоматизирован и осуществляется нерегулярно.

На основе балансовой модели установлено, что при регулярном управляемом воздухообмене концентрация углекислого газа может поддерживаться в существенно более узком диапазоне, чем при ручном проветривании. Автоматическое включение вентилятора по сигналу датчика CO_2 позволяет перейти от эпизодического проветривания к управлению качеством воздуха по фактическому состоянию воздуха.

Показано, что вентилятор, установленный в отверстие диаметром 150 мм, способен обеспечивать расход воздуха, достаточный для заметного ограничения роста концентрации CO_2 в учебном помещении объемом 179,6 м³. При этом режим эксплуатации может быть организован таким образом, чтобы вентилятор работал не постоянно, а только при выходе параметров воздуха за допустимые пределы.

Следовательно, автоматизированное проветривание по сигналу датчика CO_2 следует рассматривать как более эффективную и технически реализуемую альтернативу традиционному ручному открыванию окон в учебных помещениях, не оборудованных полноценной приточно-вытяжной вентиляцией.

Список литературы

1. Исаева Г.Ш., Зиятдинов В.Б., Габидуллина С.Н. Гигиенический и микробиологический мониторинг воздушной среды в начальной школе // *Здравоохранение Российской Федерации*. – 2016. – Т. 60, №2. – С. 83-88. – doi.org/10.18821/0044-197X-2016-60-2-83-88.
2. Горбаткова Е.Ю., Ахмадуллина Х.М., Ахмадуллин У.З., Зулькарнаев Т.Р., Хуснутдинова З.А., Мануйлова Г.Р. Гигиеническая оценка состава воздушной среды студенческих аудиторий // *Гигиена и санитария*. – 2022. – Т. 101, №4. – С. 453-458. – doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-4-453-458.
3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и безвредности для человека факторов среды обитания.
4. Кропис Ю.Н., Сулин А.Б. Анализ влияния заполняемости помещения людьми на уровень концентрации углекислого газа // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы X Международной научно-технической конференции*. – СПб.: НИУ ИТМО, 2021. – С. 72-76.
5. Симонов Д.С., Морозов А.Ю., Коновалова К.Д., Миськова Е.Л. Влияние периодического проветривания в учебном кабинете на качество воздуха и микроклимат // *Архитектура, строительство, транспорт*. – 2025. – Т. 5, №1. – С. 39-51. – doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51.
6. Беседин С.Н. Прогноз углекислого газа в учебных помещениях и разработка организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба здоровью обучающихся // *Грани познания*. – 2020. – №2(67). – С. 3-8.
7. Симонов Д.С., Морозов А.Ю., Жилина Т.С. Воздухообмен и воздухораспределение в учебных кабинетах образовательных организаций // *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. – 2024. – №7. – С. 62-65.
8. Драпалюк Д.А. Автоматизация и регулирование систем обеспечения микроклимата зданий и сооружений. Отопление. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 64 с.
9. Новикова И.И., Сорокина А.В., Лобкис М.А., Зубцовская Н.А., Семенихина М.В., Щевелева В.А., Назимкин Н.И. Углекислый газ: проблемы нормирования, контроля и профилактики неблагоприятного воздействия в образовательных организациях // *Российский вестник гигиены*. – 2023. – №4. – С. 18-28. – doi.org/10.24075/rbh.2023.081.
10. Савельев Ю.Л. Основы проектирования систем общеобменной вентиляции учебных кабинетов и классов образовательных организаций // *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. – 2016. – №9. – С. 56-67.
11. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
12. Кокорин О.Я. Системы и оборудование для создания микроклимата помещений. – М.: ИНФРА-М, 2026. – 218 с.

Сведения об авторе:

Ушаков Алексей Сергеевич – аспирант.