

Научная статья / Original research article

УДК 697.92:727

<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51>

EDN: PIWUKL

2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение
и освещение (технические науки)



Влияние периодического проветривания в учебном кабинете на качество воздуха и микроклимат

Д. С. Симонов ✉, А. Ю. Морозов, К. Д. Коновалова, Е. Л. Миськова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

✉ d.simonov@urfu.ru



Аннотация. Качество воздуха и параметры микроклимата в учебных кабинетах влияют на здоровье и успеваемость обучающихся. Определить расчетом уменьшение концентрации углекислого газа при периодическом проветривании весьма затруднительно. Проведено экспериментальное исследование для оценки влияния проветривания в холодный период года на качество воздуха и параметры микроклимата. Объект исследования – учебный кабинет площадью 55.6 м². В первый день исследования проветривание проводилось перед началом занятий и во время перерывов. Во второй и третий дни режим проветривания определялся обучающимися и преподавателями. Измерение концентрации углекислого газа, температуры и относительной влажности воздуха производилось измерителем качества воздуха, установленным в центре помещения на высоте 1.5 м. В первый день требуемое качество воздуха было зафиксировано на протяжении 16 % учебного времени, допустимое и низкое на протяжении 47 и 37 % соответственно. При этом максимальная концентрация углекислого газа составила 2 639 ppm, и наблюдался неустойчивый тепловой режим с максимальным увеличением температуры на 4.7 °C за 45 мин занятия. Без контроля за режимом проветривания и при закрытой двери в кабинет во время занятий продолжительность учебного времени при низком качестве воздуха увеличилась в 2.2 раза, а максимальная концентрация углекислого газа была выше в 1.3 раза.

Ключевые слова: вентиляция, качество воздуха, микроклимат, относительная влажность, температура, углекислый газ, учебный кабинет

Для цитирования: 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;5(1):39–51. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51> EDN: PIWUKL

Effect of periodic ventilation in a classroom on air quality and microclimate

Denis S. Simonov ✉, Anton Yu. Morozov, Kristina D. Konovalova, Elizaveta L. Miskova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19 Mira St.,
Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

✉ d.simonov@urfu.ru



Abstract. Air quality and microclimate parameters in classrooms impact student health and academic performance. Calculate the precise reduction in carbon dioxide concentration achieved through periodic ventilation is challenging. Therefore, an experimental study was conducted to evaluate the effect of ventilation on air quality and microclimate parameters during the cold season. The research object was a classroom with

an area of 55.6 m². On the first day of the study, ventilation was implemented before the start of classes and during breaks. On the second and third days, the ventilation schedule was determined by the students and lecturers. Carbon dioxide concentration, air temperature and relative humidity were measured using an air quality meter positioned in the center of the room at a height of 1.5 meters. On the first day, the air quality met the required standard for 16% of the teaching time, while it was acceptable and low for 47 and 37% of the time, respectively. The maximum carbon dioxide concentration reached 2639 ppm, and an unstable thermal environment was observed, with a maximum temperature increase of 4.7 °C over a 45-minute class period. Without control over the ventilation schedule and with the classroom door closed during classes, the duration of study time with poor air quality increased by 2.2 times, and the maximum carbon dioxide concentration was 1.3 times higher.

Keywords: ventilation, air quality, microclimate, relative humidity, temperature, carbon dioxide, classroom

For citation: Simonov D. S., Morozov A. Yu., Konovalova K. D., Miskova E. L. Effect of periodic ventilation in a classroom on air quality and microclimate. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):39–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51>



1. Введение / Introduction

Качество внутреннего воздуха и параметры микроклимата являются одними из основных показателей, определяющими состояние внутренней среды в помещениях, в том числе в учебных кабинетах образовательных организаций. В работе [1] было отмечено, что исследования отечественных ученых преимущественно посвящены вопросам из области вентиляции зданий промышленного назначения, однако в последнее время вопросы организации воздухообмена в зданиях общественного назначения привлекают все большее внимание как в России [1–4], так и в других странах [5]. Отдельно стоит отметить мировую тенденцию к увеличению числа исследований воздушной среды помещений образовательных организаций [5, 6].

Обзор [7] показал, что неудовлетворительное качество внутреннего воздуха в учебных кабинетах может оказывать отрицательное влияние на успеваемость обучающихся, а также приводить к увеличению числа пропущенных по болезни занятий. Во время исследований в кабинетах школ различных стран было установлено, что в ряде случаев фактические уровни концентрации углекислого газа (далее CO₂) превышают рекомендуемые как при естественной [8, 9], так и при механической вентиляции [9, 10]. При этом отдельно можно выделить вопросы равномерности распределения концентрации CO₂ по объему помещения и размещения средств измерения [11].

Дополнительно к неудовлетворительному качеству воздуха в учебных кабинетах могут устанавливаться высокие температуры, в том числе и в холодный период года в регионах с низкими расчетными температурами наружного воздуха [6, 12].

При исследовании теплового комфорта детей в начальных школах Великобритании [13] установлено, что дети перегреваются быстрее взрослых и комфортная температура в отопительный период для детей ниже, чем для взрослых на 2.9 °C. Анализируя связь между температурой в учебных кабинетах и успеваемостью учащихся в школах, авторы работы [14] сделали вывод, что при снижении температуры воздуха в учебном кабинете с 30 до 20 °C можно ожидать повышения эффективности занятий на 20 %. Недавние исследования [15], проведенные в восьми учебных кабинетах двух новых начальных школ Великобритании, показали, что в большей части кабинетов наблюдалось превышение требуемой температуры внутреннего воздуха на протяжении более 40 % учебного времени.

Таким образом, даже в развитых странах качество воздуха и микроклимат в учебных кабинетах часто бывают неудовлетворительными. Стоит отметить, что часть фонда зданий образовательных организаций как в России, так и в других странах не оборудована системами приточно-вытяжной механической вентиляции.

Исследования и разработка мероприятий по обеспечению требуемых параметров микроклимата и качества воздуха в учебных кабинетах являются актуальной задачей, особенно с учетом социально-экономического аспекта [16].

Цель настоящего исследования – оценить влияние периодического естественного проветривания на качество воздуха и параметры микроклимата в учебном кабинете здания образовательной организации высшего образования.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Для учебных кабинетов характерна нестационарность процессов. В зависимости от способа организации воздухообмена концентрация CO_2 в течение учебного дня изменяется по различным закономерностям.

При наличии в помещении постоянного воздухообмена, людей (источника выделений CO_2) и применении допущения о равномерном распределении CO_2 по объему помещения уравнение газового баланса в дифференциальной форме имеет вид [17]:

$$M_{\text{CO}_2} dt + L_{\text{in}} C_{\text{in}} dt - L_i C dt - V dC = 0, \quad (1)$$

где M_{CO_2} – интенсивность поступления CO_2 , единиц массы в 1 ч;

L_{in} – расход приточного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C_{in} – концентрация CO_2 в приточном воздухе, единиц массы в 1 м^3 воздуха;

L_i – расход удаляемого воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C – концентрация CO_2 в помещении, единиц массы в 1 м^3 воздуха;

V – объем помещения, м^3 .

При равенстве расходов приточного и удаляемого воздуха уравнение (1) преобразуется к виду [17]:

$$\frac{L}{V} t = -\ln \frac{\frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - C}{\frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - C_0}, \quad (2)$$

где L – величина воздухообмена, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C_0 – начальная концентрация CO_2 в помещении, единиц массы в 1 м^3 воздуха;

t – время, ч.

Из формулы (2) можно получить зависимость для расчета изменения концентрации CO_2 [17]:

$$C = \frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - C_0 \right) e^{-t \frac{L}{V}}. \quad (3)$$

В случае отсутствия воздухообмена в учебном кабинете во время проведения занятий (например, системы вентиляции не предусмотрены или выключены) уравнение (1) примет следующий вид [17]:

$$M_{\text{CO}_2} dt - V dC = 0. \quad (4)$$

Для такого режима изменение концентрации CO_2 можно определить по зависимости [17]:

$$C = C_0 + \frac{M_{\text{CO}_2}}{V} t. \quad (5)$$

Периодическое проветривание учебного кабинета за счет открытия окон осуществляется при отсутствии обучающихся (единственного источника выделений CO_2) и тогда изменение концентрации CO_2 описывается зависимостью:

$$C = C_{in} + (C_0 - C_{in})e^{-\frac{L}{V}}. \quad (6)$$

А величину воздухообмена при проветривании можно определить из уравнения:

$$L = \frac{V}{t} \ln \frac{C_0 - C_{in}}{C - C_{in}}. \quad (7)$$

Таким образом, при стратегии вентиляции, основанной на применении периодического проветривания во время перерывов и отсутствии организованного воздухообмена во время занятий (полагая незначительность величины расхода приточного воздуха, поступающего за счет инфильтрации через ограждающие конструкции), изменение концентрации CO_2 в течение учебного дня описывается формулами (5) и (6).

Однако если увеличение концентрации CO_2 во время занятия можно определить расчетом, то рассчитать снижение концентрации во время проветривания на перерыве весьма затруднительно: величина воздухообмена при естественном проветривании зависит от большого количества изменяющихся параметров (например, от температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра, внутренних аэродинамических связей в здании и др.).

Для оценки изменения концентрации CO_2 , температуры и относительной влажности внутреннего воздуха при периодическом проветривании было проведено экспериментальное исследование.

Исследование проводилось в учебном кабинете здания института строительства и архитектуры Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в городе Екатеринбурге. Площадь помещения 55.6 м², высота 3.23 м, объем 179.6 м³. Кабинет расположен на четвертом (верхнем) этаже здания, имеет одну наружную стену с тремя окнами, ориентированными на запад. Под окнами установлены приборы отопления с термостатическими клапанами и термостатическими элементами. Учебный кабинет предназначен для проведения лекционных и практических занятий, оснащен компьютером с двумя мониторами, экраном и другими мультимедийными средствами. Выбор данного учебного кабинета обусловлен тем, что в 2023–2024 гг. в нем была смонтирована система приточно-вытяжной механической общеобменной вентиляции и запланированы исследования в области обеспечения качества воздуха и параметров микроклимата при различных способах организации воздухообмена (в настоящем исследовании система не использовалась). Общий вид учебного кабинета приведен на рис. 1.

Для проведения исследования был выбран холодный период года, так как в городе Екатеринбурге именно на это время приходится большая часть учебного года. Также при низких температурах наружного воздуха можно ожидать большей величины воздухообмена.



Рис. 1. Учебный кабинет (фото авторов)
Fig. 1. Classroom (authors' photo)

Измерение концентрации CO_2 , температуры и относительной влажности воздуха производилось измерителем качества воздуха ИКВ-8 П (O_2 , CO_2) (производитель – АО «Эксис», Россия), установленным в центре помещения на высоте 1.5 м. Измеритель качества воздуха имеет свидетельство об утверждении типа средств измерений и зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации под номером 84997-22. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности: при измерении температуры ± 0.2 °С, при измерении относительной влажности ± 2 %, при измерении концен-

трации $CO_2 \pm(30 + 0.03 C_{\text{вх}})$ ppm ($C_{\text{вх}}$ – объемная доля CO_2 на входе измерителя, ppm). Время прогрева измерителя не более 300 сек. Запись измерений производилась во внутреннюю память средства измерения с интервалом в 60 сек. Измерения выполнялись однократно, что обусловлено невозможностью их повторения при нестационарных процессах. Согласно рекомендациям по метрологии Р 50.2.038-2004¹, при однократных измерениях полагают, что распределение вероятностей возможных значений величины не противоречит нормальному распределению, а при определении доверительных границ или расширенной неопределенности до уровня доверия P результата измерения принимают вероятность равную 0.95.

Различия в изменении измеряемых параметров во время перемен при разных режимах проветривания были проверены на значимость с помощью U -критерия Манна-Уитни.

Исследование проводилось во время занятий (таблица 1) бакалавров 4 года обучения (возраст 20–23 года) на протяжении трех дней: 4 декабря 2024 г. (далее – первый день), 11 декабря 2024 г. (далее – второй день), 18 декабря 2024 г. (далее – третий день).

В первый день исследования проветривание учебного кабинета осуществлялось перед занятиями и во время перерывов за счет открытия откидывающихся створок двух окон (для интенсификации воздухообмена) при закрытой двери и отсутствии людей. Продолжительность определялась на основании требований СанПин 1.2.3685-21². Измеритель качества воздуха был включен с 9:00 до 16:00 ч. С 9:35 до 10:00 ч было проведено проветривание перед занятиями. Во время малых перерывов (5–15 мин по расписанию) проветривание длилось не более 5 мин, а на большом перерыве – 32 мин (с 13:27 до 13:59), что на 7 мин больше установленного СанПин 1.2.3685-21. После каждого проветривания до начала занятий дверь и окна в кабинете были закрыты, люди отсутствовали. Перерывы продолжительностью 5 мин были увеличены для прогрева помещения после проветривания.

Таблица 1. Расписание занятий
Table 1. Class schedule

Занятие	Время занятия, ч	Перерыв, мин	Количество обучающихся на занятии, чел.			Площадь кабинета на 1 обучающегося, м ² /чел.		
			Первый день	Второй день	Третий день	Первый день	Второй день	Третий день
№ 1	10:15–11:00	5	9	21	10	6.2	2.6	5.6
№ 2	11:05–11:45	15	10	до 21	11	5.6	–	5.1
№ 3	12:00–12:45	5	14	14	17	4.0	4.0	3.3
№ 4	12:50–13:30	45	15	до 14	21	3.7	–	2.6
№ 5	14:15–15:00	5	22	15	13	2.5	3.7	4.3
№ 6	15:05–15:45	–	22	15	13	2.5	3.7	4.3

¹ Р 50.2.028-2004 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений = State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct single measurements. Estimation of errors and uncertainty of measurements result: внесены Управлением метрологии Госстандарта России: утверждены и введены в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 октября 2004 г. № 43-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037562> (дата обращения: 28.12.2024).

² СанПин 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010> (дата обращения: 28.12.2024).

Таблица 2. Классификация качества воздуха
Table 2. Air quality classification

Качество воздуха в помещении	Содержание CO ₂ , ppm
Высокое	800 и менее
Среднее	800–1 000
Допустимое	1 000–1 400
Низкое	1 400 и более

Таблица 3. Оптимальные и допустимые нормы температуры и относительной влажности
Table 3. Optimal and permissible temperature and relative humidity standards

Тип помещения	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %
	оптимальная / допустимая	оптимальная / допустимая
Учебный кабинет	19–21 / 18–23	45–30 / не более 60

Во второй и третий дни исследования режим проветривания и нахождения людей в помещении не регламентировался (обучающиеся и преподаватели самостоятельно определяли необходимость и технологию проветривания). Измеритель качества воздуха включался за 15–30 мин до начала занятий и выключался непосредственно после их завершения. При этом во второй день на занятиях № 2 и № 4 дверь в учебный кабинет была открыта, обучающиеся свободно перемещались по помещению и могли его покинуть. На большом перерыве дверь была закрыта и люди в помещении отсутствовали.

При обработке результатов исследования классификация качества воздуха (таблица 2) в помещении выполнена согласно ГОСТ 30494-2011³ на основании содержания CO₂ сверх его содержания в наружном воздухе. При этом за уровень CO₂ в наружном воздухе принята среднегодовая концентрация для большого города, приведенная в ГОСТ 30494-2011.

Допустимые и оптимальные нормы температуры и относительной влажности внутреннего воздуха в холодный период года (таблица 3) приняты согласно ГОСТ 30494-2011 для помещений второй категории (помещения, в которых люди заняты умственным трудом и учебой).

Температура наружного воздуха, скорость и направление ветра в дни исследования (таблица 4) взяты по данным ФГБУ «Гидрометцентр России»⁴.

Таблица 4. Параметры наружного воздуха
Table 4. Outdoor air parameters

День исследования	Температура наружного воздуха, °С	Средняя скорость, м/с, и направление ветра
Первый	–2.5	4 (запад.)
Второй	–5.7	4 (запад.)
Третий	–7.6	2 (юго-вост.)

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты измерений в первый день исследования представлены на рис. 2 (концентрация CO₂) и рис. 3 (температура и относительная влажность).

Из графика изменения концентрации CO₂ в первый день видно, что после проветривания на момент начала занятий концентрация составила 490 ppm и на протяжении первых 25 мин занятия № 1 в учебном кабинете было зафиксировано высокое и среднее качество воздуха (при удельной площади помещения на 1 обучающегося 5.6 м²/чел). Однако в связи с непродолжительностью проветривания во время малых перерывов к концу занятий № 3 и № 4 качество воздуха было низким. На

³ ГОСТ 30494-2011 Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. Протокол № 39 от 8 декабря 2011 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 28.12.2024).

⁴ Архив фактической погоды ФГБУ «Гидрометцентр России». URL: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda> (дата обращения: 25.12.2024).

занятиях № 5 и № 6 присутствовало большее количество людей (удельная площадь помещения на 1 обучающегося 2.5 м²/чел), и через 22 мин после начала занятия № 5 и до конца занятия № 6 качество воздуха было низким при максимальной концентрации CO₂ 2 639 ppm.

График на рис. 3 показывает, что периодическое проветривание приводит к колебаниям температуры и относительной влажности воздуха в учебном кабинете. Несмотря на наличие устройств для регулирования теплоотдачи отопительных приборов, в начале первого дня в помещении установилась температура 22.7 °С (верхняя граница интервала допустимых температур), которая в результате проветривания уменьшилась до 17.3 °С, а к моменту начала занятия № 1 увеличилась до 20.3 °С. До большого перерыва во время каждого из занятий за счет поступления теплоты от системы отопления, людей, освещения и оборудования температура воздуха увеличивалась на 2.5–3.8 °С, а при проветривании уменьшалась на 2.4–3.6 °С. Максимальное изменение температуры наблюдалось во время занятия № 5 и составило 4.7 °С за 45 мин. Максимальная температура 25.3 °С была зафиксирована в конце занятия № 6. Аналогичным образом изменялась и относительная влажность: уменьшалась при проветривании и увеличивалась во время занятий за счет поступлений влаги от людей, при этом всегда оставаясь в интервале допустимых или оптимальных величин.

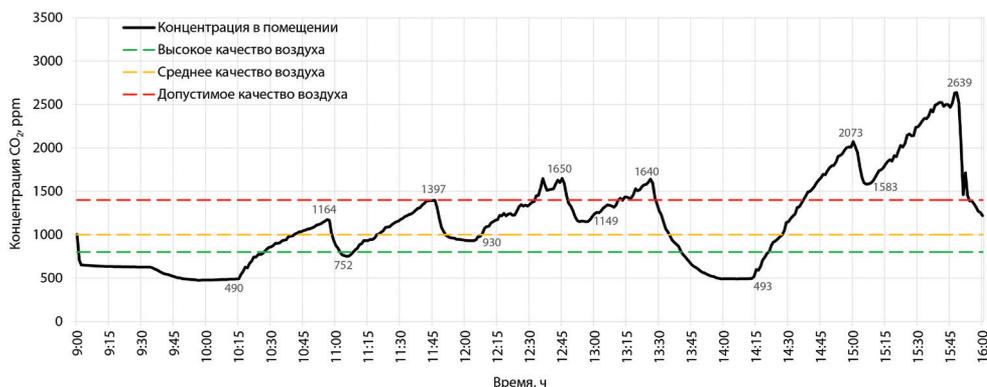


Рис. 2. Концентрация CO₂ в учебном кабинете (первый день)
(график построен авторами)

Fig. 2. Classroom CO₂ concentration on Day 1 (graph by the authors)

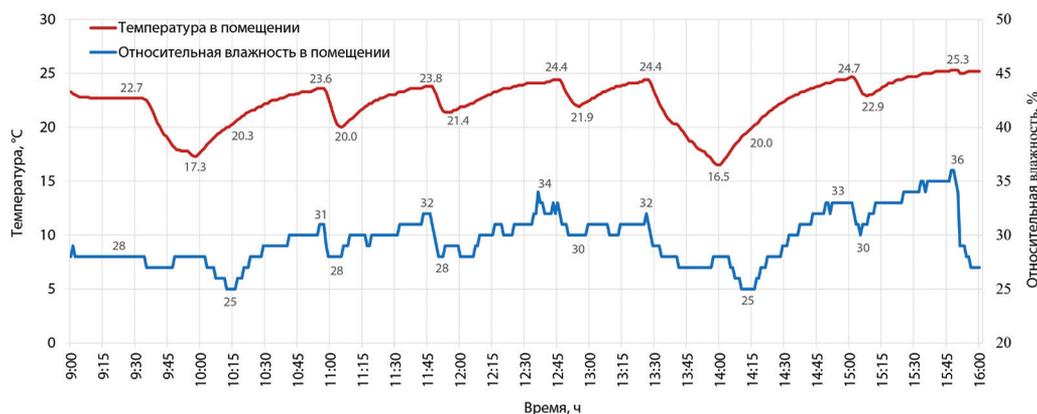


Рис. 3. Температура и относительная влажность
в учебном кабинете (первый день) (график построен авторами)

Fig. 3. Classroom temperature and relative humidity on Day 1 (graph by the authors)

Во второй день исследования концентрация CO_2 (рис. 4) уже через 3 мин после начала занятий превысила величину, соответствующую высокому качеству воздуха, а через 8 мин соответствующую среднему. В течение большей части учебного дня концентрация CO_2 отвечала допустимому и низкому качеству воздуха. Увеличение концентрации в 13:00 ч можно объяснить непродолжительным нахождением обучающихся непосредственно у средства измерения. Во время занятий № 2 и № 4 наблюдалось изменение концентрации CO_2 за счет воздухообмена через открытую дверь. Однако при такой схеме проветривания можно говорить только об уменьшении концентрации, но не об общем улучшении качества воздуха. Объясняется это тем, что воздух, поступающий в учебный кабинет из коридора, может содержать различные загрязняющие вещества (например, от отделочных материалов, людей).

Анализ теплового баланса [12] показал, что за счет поступлений теплоты от внутренних источников в учебных кабинетах могут устанавливаться высокие температуры воздуха в холодный период года. По графику изменения температуры (рис. 5) видно, что за время занятия № 1 температура внутреннего воздуха увеличилась на $2.5\text{ }^\circ\text{C}$ до $24.4\text{ }^\circ\text{C}$ и до конца учебного дня была выше допустимой (температура $23\text{ }^\circ\text{C}$ была зафиксирована только во время большого перерыва). Относительная влажность на протяжении дня находилась в допустимом или оптимальном диапазонах, уменьшаясь при открытой двери и увеличиваясь при закрытой.

Во второй день окно открывалось только один раз в 15:05 на непродолжительный период.

На протяжении третьего дня обучающиеся и преподаватели ни разу не проветривали помещение (окна оставались закрытыми, дверь открывалась только во время перерывов). Концентрация CO_2 (рис. 6) через 16 мин после начала занятий превысила величину, соответствующую высокому качеству воздуха, а через 55 мин соответствующую допустимому, и до конца учебного дня качество воздуха оставалось на низком уровне. Максимальная концентрация $3\ 314\text{ ppm}$ была зафиксирована в конце занятия № 4.

Во второй и третий дни исследования классификация качества воздуха по концентрации CO_2 должна приниматься с ограничениями по причине того, что перед началом занятий проветривание наружным воздухом не проводилось и в помещении могли накопиться загрязняющие вещества (например, от строительных материалов, мебели и людей, которые находились в помещении в предшествующий день).

Температура внутреннего воздуха (рис. 7) через 28 мин после начала занятий увеличилась до $23\text{ }^\circ\text{C}$ и в дальнейшем была выше допустимых величин. Относительная влажность (рис. 7) на протяжении большей части учебного дня находилась в оптимальном диапазоне. Однако увеличение относительной влажности только за счет поступлений влаги от людей также говорит об увеличении содержания и других выделяемых людьми загрязнителей (например, запахов или вирусов).

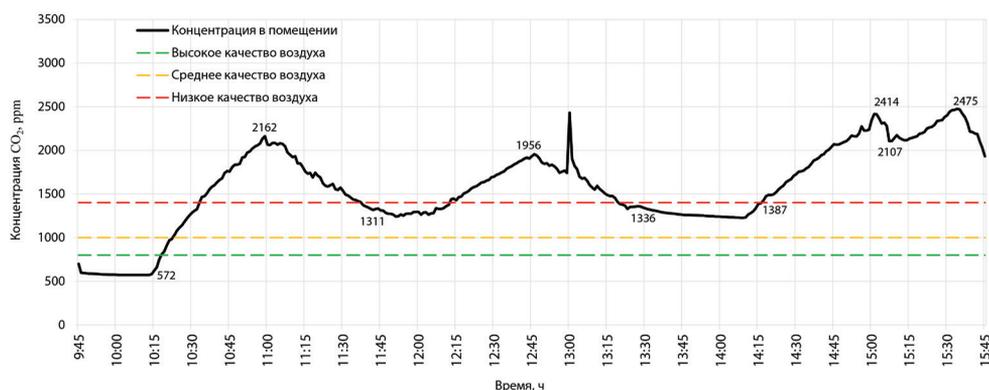


Рис. 4. Концентрация CO_2 в учебном кабинете (второй день) (график построен авторами)
Fig. 4. Classroom CO_2 concentration on Day 2 (graph by the authors)



Рис. 5. Температура и относительная влажность в учебном кабинете (второй день) (график построен авторами)
Fig. 5. Classroom temperature and relative humidity on Day 2 (graph by the authors)

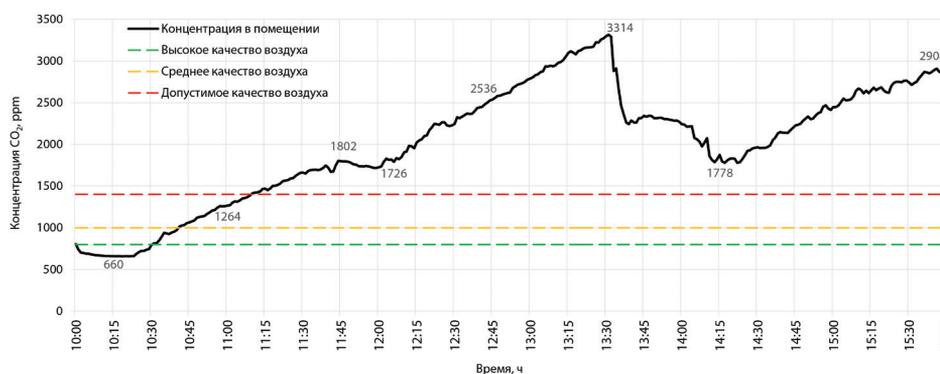


Рис. 6. Концентрация CO₂ в учебном кабинете (третий день) (график построен авторами)
Fig. 6. Classroom CO₂ concentration on Day 3 (graph by the authors)



Рис. 7. Температура и относительная влажность в учебном кабинете (третий день) (график построен авторами)
Fig. 7. Classroom temperature and relative humidity on Day 3 (graph by the authors)

Полученные в результате исследования данные о неудовлетворительном микроклимате и качестве воздуха в учебной аудитории согласуются с результатами других исследований. Исследование [18], проведенное на базе четырех организаций высшего профессионального образования в

городе Уфе, показало низкое качество воздуха в каждом третьем учебном кабинете. В работе [19] приведены данные о высоких температурах воздуха и низкой относительной влажности в помещении школы, а также об увеличении общего микробного числа при недостаточном проветривании.

Погрешность измерений приведена в таблице 5.

Таблица 5. Погрешность измерений
Table 5. Measurement error

Параметр	Диапазон относительной погрешности результатов измерений, %	Наименьший результат измерений	Наибольший результат измерений
Концентрация CO ₂	от 3.9 до 9.2	(490 ± 45) ppm; P = 0.95	(3 314 ± 129) ppm; P = 0.95
Температура	от 0.8 до 1.2	(16.5 ± 0.2) °C; P = 0.95	(25.9 ± 0.2) °C; P = 0.95
Относительная влажность	от 4.8 до 9.1	(22 ± 2) %; P = 0.95	(42 ± 2) %; P = 0.95

Сравнительный анализ изменений концентрации CO₂, температуры и относительной влажности за время малых перерывов при проветривании наружным воздухом (первый день) и без проветривания (третий день) с использованием *U*-критерия Манна-Уитни показал статистическую значимость различий (при $p \leq 0.01$).

К ограничениям исследования можно отнести то, что эффективность естественного проветривания может варьироваться. Однако концентрации CO₂ в учебном кабинете, зафиксированные в первый день исследования во время проветривания перед началом занятия и на большом перерыве, были близки к среднегодовой концентрации в наружном воздухе большого города, приведенной в ГОСТ 30494-2011.

В дальнейшем авторами запланированы исследования в области обеспечения качества воздуха в учебных кабинетах с применением систем механической приточно-вытяжной вентиляции при различных величинах воздухообменов и схемах воздухораспределения.

4. Заключение / Conclusions

1. При периодическом проветривании наружным воздухом требуемое качество воздуха (высокое или среднее, согласно ГОСТ 30494-2011) было зафиксировано на протяжении 16 % учебного времени, допустимое и низкое качество на протяжении 47 и 37 % соответственно. Максимальная концентрация CO₂ составила 2 639 ppm. Несмотря на предшествующие длительные проветривания, в течение занятий № 1 и № 5 концентрация CO₂ превысила 1000 ppm, что свидетельствует о невозможности обеспечения требуемого качества воздуха при текущей заполняемости учебного кабинета только за счет проветривания во время перерывов. Был зафиксирован неустойчивый тепловой режим с максимальным увеличением температуры на 4.7 °C за 45 мин занятия.
2. Без контроля за режимом проветривания и при закрытой двери в кабинет во время занятий требуемое качество воздуха было зафиксировано на протяжении 10 % учебного времени, допустимое и низкое качество на протяжении 9 и 81 % соответственно. Максимальная концентрация CO₂ составила 3 314 ppm. Таким образом, в режиме без проветривания продолжительность учебного времени при низком качестве воздуха была больше в 2.2 раза, а максимальная концентрация CO₂ была выше в 1.3 раза. Стоит отметить, что обучающиеся и преподаватели занимали пассивную позицию относительно текущего качества воздуха, и окна в течение дня не открывались.
3. Во все дни исследования перед началом занятий были зафиксированы температуры внутреннего воздуха в диапазоне 21.9–22.7 °C, что выше оптимальных величин. При этом температура воздуха была выше допустимых значений на протяжении 95 % учебного времени во второй день исследования и 93 % в третий день.

4. Относительная влажность во время исследования составляла 22–42 %, что соответствует допустимому диапазону.
5. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения качества воздуха и микроклимата при эксплуатации зданий образовательных организаций, не оборудованных системами приточно-вытяжной механической общеобменной вентиляции. Можно рекомендовать:
 - продолжительность проветриваний согласно требованиям СанПин 1.2.3685-21 с контролем за температурой воздуха (исследование показало, что температура воздуха после проветривания может быть ниже допустимой и перед входом обучающихся в кабинет необходимо обеспечить прогрев помещения);
 - проветривание помещений перед занятиями для удаления загрязняющих выделений, накопившихся в помещении в ночное время;
 - организацию дополнительных перерывов между занятиями в кабинете для проведения интенсивного проветривания (исследование показало, что продолжительности проветривания на малых перерывах может быть недостаточно);
 - установку в кабинетах средств измерения для объективного контроля за концентрацией CO₂ и температурой воздуха во время занятий и при проветривании;
 - проведение работ по повышению осведомленности обучающихся и преподавателей в части влияния состояния внутренней среды на здоровье и успеваемость;
 - контроль за настройками термостатических элементов приборов отопления для поддержания температуры воздуха в пределах нормируемого диапазона и сокращения расхода теплоты на отопление.

Требуются дальнейшие исследования качества воздуха и параметров микроклимата в учебных кабинетах при различных способах организации и величинах воздухообмена.



Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Author contributions. All authors contributed equally to preparing the publication.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Денисихина Д. М. Численное исследование закономерностей распределения CO₂ в общественных зданиях. *Инновации и инвестиции*. 2023;(5):368–372. URL: <https://www.innovazia.ru/archive/39071/>.
2. Мансуров Р. Ш., Мухин А. И., Костин В. И., Омельченко Д. А., Гавриленко В. А., Соколов Ю. Г. Воздушный режим помещений небольшого объема общественных зданий при нестационарном характере работы. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023;(9):46–57. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-46-57>
3. Уляшева В. М., Иванова Ю. В., Аншукова Е. А. Численное моделирование микроклимата в торговых помещениях. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(9):64–67. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=9&year=2024>.
4. Дацюк Т. А., Примитлин А. М., Таурит В. Р., Иванова Ю. В. Численное моделирование вентиляции спанцентра. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(10):50–52. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.
5. Sadrizadeh S., Yao R., Yuan F., Awbi H., Bahnfleth W., Bi Ya. et al. Indoor air quality and health in schools: a critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908>
6. Wargocki P., Wyon D. P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013;59:581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
7. Симонов Д. С., Морозов А. Ю., Коновалова К. Д., Миськова Е. Л. Обзор результатов исследований влияния качества воздуха на обучение и посещаемость. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(10):54–56. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.

8. Andamon M. M., Rajagopalan P., Woo J. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements. *Building and Environment*. 2023;237:110313. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110313>
9. Cabovská B., Bekö G., Teli D., Ekberg L., Dalenbäck Ja. O., Wargocki P. et al. Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022;226:109744. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109744>
10. Ding E., Zhang D., Hamida A., García-Sánchez C., Jonker L., De Boer A. R. et al. Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023;229(4):109922. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109922>
11. Zhang D., Ding E., Bluysen P. M. Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring. *Indoor and Built Environment*. 2022;31(4):1107–1126. <https://doi.org/10.1177/1420326X211058743>
12. Симонов Д. С., Морозов А. Ю., Жилина Т. С. Воздухообмен и воздухораспределение в учебных кабинетах образовательных организаций. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(7):62–65. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=7&year=2024>.
13. Korsavi S. S., Montazami A. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy and Buildings*. 2020;214:109857. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109857>
14. Wargocki P., Porras-Salazar J. A., Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019;157:197–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>
15. Mohamed S., Rodrigues L., Omer S., Calautit J. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. *Energy and Buildings*. 2021;250:111291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111291>
16. Wargocki P., Foldbjerg P., Eriksen K. E., Videbæk L. E. Socio-economic consequences of improved indoor air quality in Danish primary schools. In: *Indoor Air 2014. The 13th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate. Hong Kong, July 7 to 12, 2014. Vol. 5*. 2014. P. 953–958.
17. Каменев П. Н., Тертичник Е. И. *Вентиляция*. Москва: АСВ; 2008. 624 с. URL: <https://djvu.online/file/SYF0pFbiklm8F?ysclid=m88oek1oz901811982>
18. 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;101(4):453–458. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-4-453-458>
19. Исаева Г. Ш., Зиятдинов В. Б., Габидуллина С. Н. Гигиенический и микробиологический мониторинг воздушной среды в начальной школе. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2016;60(2):83–88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25717378>.

References

1. Denisikhina D. M. Numerical simulation of CO₂ distribution in public buildings. *Innovation & Investment*. 2023;(5):368–372. (In Russ.) URL: <https://www.innovazia.ru/archive/39071/>.
2. Mansurov R. Sh., Mukhin A. I., Kostin V. I., Omelchenko D. A., Gavrilenko V. A., Sokolov Yu. G. The air regime of the premises of a small volume of public buildings with a non-stationary nature of work. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023;(9):46–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-46-57>
3. Ulyasheva V. M., Ivanova Yu. V., Anshukova E.A. Numerical simulation of the microclimate in commercial premises. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(9):64–67. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=9&year=2024>.
4. Datsyuk T. A., Gritlitin A. M., Taurit V. R., Ivanova Yu. V. Numerical simulation of spa ventilation. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(10):50–52. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.
5. Sadrizadeh S., Yao R., Yuan F., Awbi H., Bahnfleth W., Bi Ya. et al. Indoor air quality and health in schools: a critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908>
6. Wargocki P., Wyon D. P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013;59:581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
7. Simonov D. S., Morozov A. Yu., Konovalova K. D., Miskova E. L. Review of research findings on the impact of air quality on learning and attendance. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(10):54–56. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.
8. Andamon M. M., Rajagopalan P., Woo J. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements. *Building and Environment*. 2023;237:110313. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110313>
9. Cabovská B., Bekö G., Teli D., Ekberg L., Dalenbäck Ja. O., Wargocki P. et al. Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022;226:109744. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109744>

10. Ding E., Zhang D., Hamida A., García-Sánchez C., Jonker L., De Boer A. R. et al. Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023;229(4):109922. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109922>
11. Zhang D., Ding E., Bluysen P. M. Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring. *Indoor and Built Environment*. 2022;31(4):1107–1126. <https://doi.org/10.1177/1420326X211058743>
12. Simonov D. S., Morozov A. Yu., Zhilina T. S. Air exchange and air distribution in classrooms. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(7):62–65. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=7&year=2024>.
13. Korsavi S. S., Montazami A. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy and Buildings*. 2020;214:109857. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109857>
14. Wargocki P., Porras-Salazar J. A., Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019;157:197–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>
15. Mohamed S., Rodrigues L., Omer S., Calautit J. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. *Energy and Buildings*. 2021;250:111291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111291>
16. Wargocki P., Foldbjerg P., Eriksen K. E., Videbæk L. E. Socio-economic consequences of improved indoor air quality in Danish primary schools. In: *Indoor Air 2014. The 13th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate. Hong Kong, July 7 to 12, 2014. Vol. 5*. 2014. P. 953–958.
17. Kamenev P. N., Tertichnik E. I. *Ventilation*. Moscow: ASV; 2008. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/SYF0pFbiklm8F?ysclid=m88oek1oz901811982>
18. Gorbatkova E. Yu., Akhmadullina Kh. M., Ahmadullin U. Z., Zulkarnaev T. R., Husnutdinova Z. A., Manuilova G. R. Hygienic assessment of the air environment of student classrooms. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(4):453–458. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-4-453-458>
19. Isaeva G. Sh., Ziatdinov V. B., Gabidullina S. N. The hygienic and microbiological monitoring of air in grade school. *Health Care of the Russian Federation*. 2016;60(2):83–88. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25717378>.



Информация об авторах

Симонов Денис Сергеевич, аспирант, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, d.simonov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2434-5866>

Морозов Антон Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, anton.morozov@urfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9772-6726>

Коновалова Кристина Дмитриевна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, grinovich.msi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0466-3794>

Миськова Elizaveta Леонидовна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, lizaveta_mel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6957-4157>

Information about the authors

Denis S. Simonov, Postgraduate, Senior Lecturer in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, d.simonov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2434-5866>

Anton Yu. Morozov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, anton.morozov@urfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9772-6726>

Kristina D. Konovalova, Graduate Student in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, grinovich.msi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0466-3794>

Elizaveta L. Miskova, Graduate Student in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, lizaveta_mel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6957-4157>

Получена 11 января 2025 г., одобрена 12 февраля 2025 г., принята к публикации 18 февраля 2025 г.
Received 11 January 2025, Approved 12 February 2025, Accepted for publication 18 February 2025