

УДК 628.8.036

**И. С. Харитонова, И. С. Просвирина**

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ НАКОПЛЕНИЯ CO<sub>2</sub> И ФОРМАЛЬДЕГИДА В УЧЕБНОМ ПОМЕЩЕНИИ**

Представлены результаты натурного эксперимента по оценке скорости накопления диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и формальдегида (НСНО) в воздушной среде учебной аудитории в условиях отсутствия вентиляции. Установлено, что уже в течение 30...40 мин концентрации загрязнителей многократно превышают гигиенические нормативы, что негативно сказывается на самочувствии находящихся в помещении людей. Доказана высокая эффективность сквозного проветривания для быстрого восстановления качества воздуха. Экспериментально подтверждены нормативные значения необходимого воздухообмена.

**Ключевые слова:** микроклимат, качество воздуха, диоксид углерода, формальдегид, герметизация зданий, натурный эксперимент, вентиляция.

### **Введение**

Современная тенденция к энергосбережению и строительству зданий с повышенной герметичностью [1] входит в противоречие с необходимостью обеспечения качественного воздухообмена [2]. Эта проблема широко обсуждается в контексте строительства энергоэффективных зданий [3, 4]. Проблема «синдрома больного здания» (Sick Building Syndrome) особенно остро стоит в образовательных учреждениях [5], где от параметров микроклимата напрямую зависят когнитивные функции, работоспособность и здоровье учащихся.

Ключевыми антропогенными загрязнителями воздушной среды помещений являются диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), продукт дыхания человека, и формальдегид (НСНО), выделяющийся из мебели и отделочных материалов. Их влияние на когнитивные функции и здоровье подробно изучено в работах [6—8]. Накопление этих загрязнителей даже в низких концентрациях может вызывать головную боль, снижение концентрации внимания [6, 7] и оказывать долгосрочное негативное влияние на здоровье.

*Обзор литературы.* Вопрос нормирования параметров микроклимата детально регламентирован отечественными санитарными правилами и нормами<sup>1</sup> и государственными стандартами<sup>2</sup>. Однако, как показано в обзоре [9], большая часть исследований носит расчетный или лабораторный характер. Существует дефицит натуральных данных, особенно в условиях реального учебного процесса [10, 11].

*Гипотеза исследования.* Предполагается, что в герметизированной учебной аудитории стандартной площади с численностью обучающихся 6 чел. превышение гигиенических нормативов по CO<sub>2</sub> и формальдегиду происходит в течение первого академического часа (45...60 мин), а визуальная индикация

<sup>1</sup> СанПиН 1.2.3685—21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М. : Роспотребнадзор, 2021.

<sup>2</sup> ГОСТ 30494—2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М. : Стандартинформ, 2019. 35 с.

портативного газоанализатора адекватно отражает стадии деградации воздушной среды.

*Научная новизна работы* заключается в комплексном натурном мониторинге динамики CO<sub>2</sub> и HCHO в реальной аудитории в течение учебного занятия с привязкой к цветовой индикации прибора и расчетом скорости генерации загрязнителей.

*Цель работы* — экспериментально оценить скорость накопления и уровень превышения нормативов по CO<sub>2</sub> и формальдегиду в учебной аудитории в условиях отсутствия вентиляции. Согласно СанПиН 1.2.3685—21 и ГОСТ 30494—2011, оптимальный уровень CO<sub>2</sub> в помещениях с постоянным пребыванием людей не должен превышать 800...1000 ppm. Предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК<sub>м.р</sub>) формальдегида составляет 0,05 мг/м<sup>3</sup>.

*Задачи исследования:*

- провести часовой мониторинг концентраций CO<sub>2</sub>, HCHO, TVOC, температуры и влажности в герметизированной аудитории;
- сопоставить полученные данные с установленными гигиеническими нормативами;
- проанализировать соответствие между цветовой индикацией прибора и фактическим уровнем загрязнения;
- рассчитать скорость генерации CO<sub>2</sub> и оценить необходимый воздухообмен для соблюдения нормативных требований.

Оптимальный уровень CO<sub>2</sub> в помещениях с постоянным пребыванием людей не должен превышать 800...1000 ppm. Предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК<sub>м.р</sub>) формальдегида составляет 0,05 мг/м<sup>3</sup>.

### **Материалы и методы**

Экспериментальные исследования проводились в стандартной учебной аудитории общей площадью 40 м<sup>2</sup>. Объем воздушной среды помещения составил приблизительно 108 м<sup>3</sup> (при высоте потолков 2,7 м). Помещение было предварительно герметизировано: окна и двери закрыты, приточные вентиляционные клапаны заблокированы. Исследования проводились в осенний период года при температуре наружного воздуха +14...+16 °С. В эксперименте участвовало 6 чел. (возраст 20—22 года), находившихся в аудитории в состоянии спокойной сидячей работы (учебная деятельность).

Для мониторинга параметров воздушной среды использовался портативный многокомпонентный газоанализатор Air Quality Analyzer. Прибор прошел предварительную поверку и осуществлял измерение следующих параметров с указанной точностью:

- концентрация диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), ppm;
- концентрация формальдегида (HCHO), мг/м<sup>3</sup>;
- суммарная концентрация летучих органических соединений (TVOC), мг/м<sup>3</sup>;
- температура воздуха, °С;
- относительная влажность воздуха, %.

Измерительный зонд прибора был размещен в центральной зоне помещения на высоте 1,5 м от уровня пола (зона дыхания человека). Записи

показаний осуществлялись каждые 10 мин в течение 70 мин в режиме герметизации. Общий протокол эксперимента включал три этапа:

1. Фоновые замеры ( $t = 0$ ): запуск эксперимента в непроветренном помещении.

2. Этап герметизации ( $t = 0 \dots 70$  мин): непрерывный мониторинг в условиях отсутствия воздухообмена.

3. Этап проветривания: интенсивное сквозное проветривание помещения в течение 15 мин с фиксацией скорости восстановления параметров.

Для оценки субъективного восприятия микроклимата испытуемыми было проведено три волны анкетирования по единой форме в ключевые моменты времени:

- анкетирование № 1 — на старте эксперимента ( $t = 0$ );
- анкетирование № 2 — в момент пикового ухудшения параметров воздуха ( $t = 70$  мин);

- анкетирование № 3 — после завершения этапа проветривания.

Анкета включала вопросы, оценивающие по 5-балльной шкале Ликерта:

- Термический комфорт (ощущение холода/тепла).
- Восприятие качества воздуха (ощущение духоты/свежести).
- Общий уровень комфорта.
- Наличие симптомов, ассоциированных с «синдромом больного здания» (головная боль, сонливость, сухость слизистых).

Методика анкетирования была адаптирована на основе подходов, описанных в исследованиях по восприятию качества воздуха [12].

Первичные данные, регистрируемые прибором, заносились в протокол с фиксацией временных меток. Для последующего анализа и визуализации использовался табличный процессор Microsoft Excel. Статистическая обработка результатов анкетирования включала расчет средних значений и стандартного отклонения для каждой волны опроса.

### Результаты

В ходе проведенного эксперимента была зафиксирована значительная динамика ключевых параметров микроклимата в течение 70-минутного периода герметизации помещения, а также оценена эффективность последующего проветривания. Объективные данные приборных измерений, дополненные результатами анкетирования испытуемых, представлены ниже. Данные инструментальных измерений в режиме герметизации и последующего проветривания представлены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 позволяет выявить следующие ключевые тенденции в период герметизации помещения (8:30—9:40):

Концентрация диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) монотонно возросла с 444 до 1207 ppm, что составило прирост на 272 %. Превышение гигиенического норматива (1000 ppm) произошло между 9:20 и 9:30.

Содержание формальдегида (НСНО) увеличилось в 9,4 раза — с 0,014 до 0,132 мг/м<sup>3</sup>. Превышение предельно допустимой разовой концентрации (0,05 мг/м<sup>3</sup>) было зафиксировано в 9:00, а к концу этапа герметизации превышало норму в 2,6 раза.

Концентрация летучих органических соединений (TVOC) возросла в 8,2 раза — с 0,045 до 0,369 мг/м<sup>3</sup>.

Т а б л и ц а 1

*Динамика параметров микроклимата и качества воздуха в ходе эксперимента*

Время, мин	CO <sub>2</sub> , ppm	Температура, °С	Отн. влажность, %	НСНО, мг/м <sup>3</sup>	TVOC, мг/м <sup>3</sup>	Визуальная индикация
8:30	444	21	44	0,014	0,045	Зеленый
8:40	530	23	46	0,015	0,049	Зеленый
8:50	580	24	46	0,019	0,053	Зеленый
9:00	717	24	46	0,044	0,123	Желтый
9:10	844	25	46	0,065	0,182	Желтый
9:20	937	25	46	0,083	0,232	Желтый
9:30	1119	26	46	0,116	0,324	Оранжевый
9:40	1207	26	46	0,132	0,369	Оранжевый
9:45	<i>Открытие двух окон</i>					
9:46	992	26	45	0,098	0,217	Желтый
9:46	794	26	44	0,055	0,148	Желтый
9:47	503	26	42	0,017	0,042	Зеленый
9:47	444	26	42	0,013	0,05	Зеленый
9:50	441	26	40	0,012	0,03	Зеленый

*Примечание.* ПДК<sub>м.р</sub> формальдегида (НСНО) составляет 0,05 мг/м<sup>3</sup>. Гигиенический норматив для CO<sub>2</sub> — 800...1000 ppm. Начальная температура наружного воздуха +14 °С.

Температура воздуха в помещении повысилась на 5 °С (с +21 до +26 °С), выйдя за рамки оптимального диапазона, при этом относительная влажность оставалась стабильной (44...46 %).

Визуальная индикация портативного газоанализатора последовательно сменилась с зеленого (удовлетворительное состояние) на желтый (9:00) и далее на оранжевый уровень (9:30), что объективно отражало прогрессирующее ухудшение качества воздуха.

Режим интенсивного сквозного проветривания (9:45—9:50) показал высокую эффективность. Концентрация CO<sub>2</sub> снизилась с 1207 ppm до фонового уровня 441 ppm всего за 5 мин. Содержание НСНО и TVOC также вернулось к исходным значениям (0,012 и 0,030 мг/м<sup>3</sup> соответственно). Визуальная индикация прибора за 2 мин сменилась с оранжевого на зеленый уровень.

Для наглядного представления динамики всех ключевых параметров представлены зависимости концентраций CO<sub>2</sub>, НСНО, TVOC и температуры от времени (рис.).

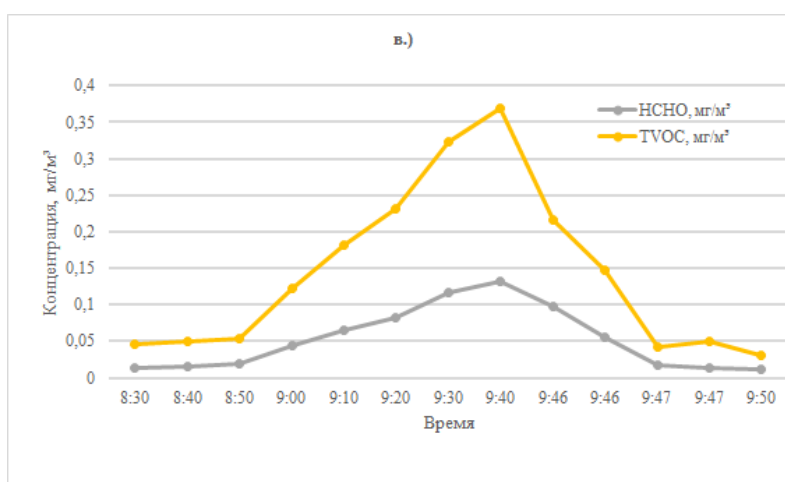
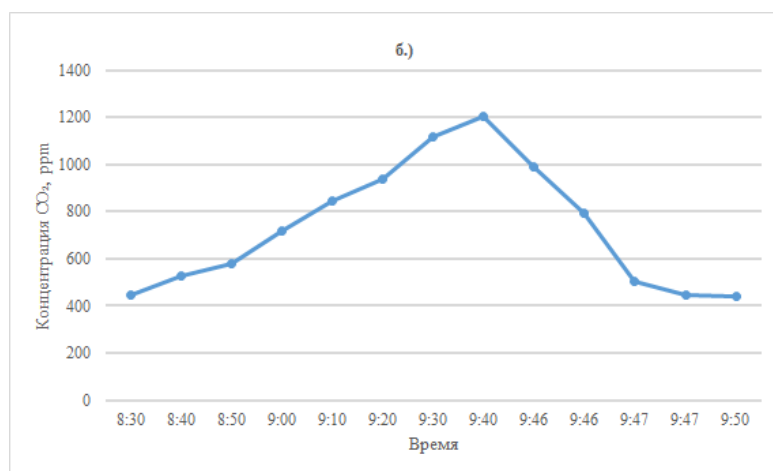
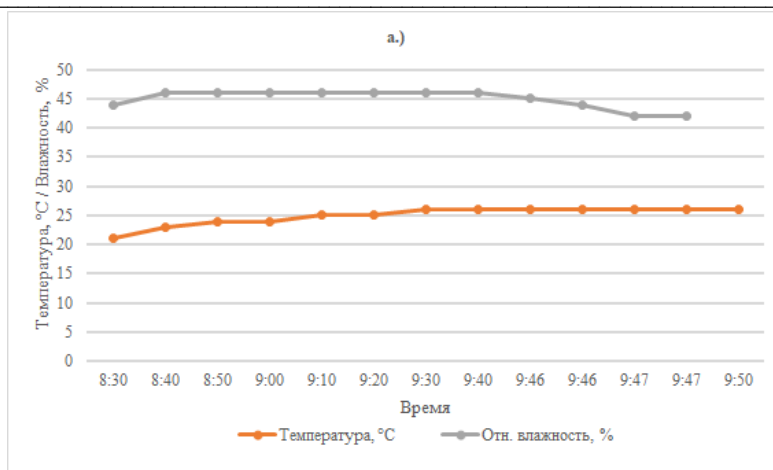
Для количественной оценки интенсивности процессов накопления загрязнителей и обоснования требований к вентиляции был проведен расчетный анализ экспериментальных данных.

Скорость генерации диоксида углерода одним человеком определялась по формуле материального баланса.

Для периода с 8:30 до 9:40 ( $\Delta t = 1,167$  ч,  $\Delta C = 763$  ppm):

$$G = (\Delta C \cdot V \cdot k) / (\Delta t \cdot n) \text{ л/ч}, \quad (1)$$

где  $G$  — скорость генерации CO<sub>2</sub> одним человеком, л/ч;  $\Delta C$  — изменение концентрации CO<sub>2</sub> за период измерения, ppm;  $V$  — объем помещения, м<sup>3</sup> (108 м<sup>3</sup>);  $k$  — коэффициент перевода (0,001);  $\Delta t$  — время измерения, ч;  $n$  — количество людей в помещении (6 чел.).



Динамика параметров микроклимата в учебной аудитории:  
*a* — температуры и влажности; *б* — CO<sub>2</sub>; *в* — химических загрязнителей

Скорость генерации CO<sub>2</sub> составила 11,77 л/ч на человека, что соответствует справочным данным для людей, занимающихся умственным трудом<sup>3</sup> (10...15 л/ч).

На основе полученной скорости генерации CO<sub>2</sub> был рассчитан необходимый воздухообмен для поддержания концентрации ниже нормативного уровня (1000 ppm):

$$L = (n \cdot G) / (C_n - C_o) 0,001 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где  $L$  — требуемый воздухообмен, м<sup>3</sup>/ч;  $C_n$  — нормативная концентрация CO<sub>2</sub> (1000 ppm);  $C_o$  — концентрация CO<sub>2</sub> в наружном воздухе (400 ppm).

Расчетный воздухообмен составил 117,7 м<sup>3</sup>/ч, что практически идентично нормативному значению по [13] (20 м<sup>3</sup>/ч на 1 чел. или 120 м<sup>3</sup>/ч для 6 чел.).

Для оценки динамики процесса накопления рассчитывалась скорость изменения концентраций по 10-минутным интервалам:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_2 - C_1}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $dC/dt$  — скорость изменения концентрации за временной интервал;  $C_1$  — концентрация загрязнителя в начале 10-минутного интервала (в момент времени  $t_1$ );  $C_2$  — концентрация загрязнителя в конце 10-минутного интервала (в момент времени  $t_2$ ).

Табл. 2 показывает, что скорость накопления CO<sub>2</sub> носила нелинейный характер, возрастая с примерно 8,6 ppm/мин в первом интервале до максимума ~18,2 ppm/мин в интервале 9:20—9:30. Аналогичный нелинейный тренд наблюдался для формальдегида, что свидетельствует об интенсификации процесса деградации воздушной среды во времени даже при постоянном количестве источников загрязнения.

Т а б л и ц а 2

Скорость накопления загрязнителей по интервалам

Временной интервал	$d\text{CO}_2 / dt$ , ppm/мин	$d\text{HCHO} / dt$ , мг/м <sup>3</sup> ·мин
8:30—8:40	8,6	0,0001
8:40—8:50	5	0,0004
8:50—9:00	13,7	0,0025
9:00—9:10	12,7	0,0021
9:10—9:20	9,3	0,0018
9:20—9:30	18,2	0,0033
9:30—9:40	8,8	0,0016

Эффективность проветривания оценивалась по скорости снижения концентраций: для CO<sub>2</sub> в интервале 9:40—9:47  $V = 109$  ppm/мин.

Интенсивное проветривание обеспечило скорость снижения концентрации CO<sub>2</sub> 109 ppm/мин, что в 6 раз превышает максимальную скорость накопления. Субъективная оценка микроклимата испытуемыми, полученная в трех

<sup>3</sup> СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализир. ред. СНиП 41-01—2003. М. : Минстрой России, 2020. 149 с.

ключевых временных точках, демонстрирует четкую корреляцию с объективными данными. Результаты анкетирования (средние баллы по 5-балльной шкале) обобщены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

*Динамика субъективной оценки параметров микроклимата*

Параметр оценки	Анкетирование № 1 ( $t = 0$ мин)	Анкетирование № 2 ( $t = 70$ мин, пик загрязнения)	Анкетирование № 3 (после проветривания)
Термический комфорт	4,0	4,5	3,3
Качество воздуха	3,3	4,8	2,3
Влажность воздуха	3,0	3,5	3,0
Общий комфорт	2,5	1,7	3,5

*Примечание.* Оценка по 5-балльной шкале Ликерта; в анкете № 2 двое испытуемых отметили появление головной боли; в анкете № 3 головная боль у двоих испытуемых сохранилась.

Анализ данных анкетирования выявил выраженную динамику субъективного восприятия микроклимата. На старте эксперимента ( $t = 0$ ) общий комфорт находился на низком уровне (средний балл 2,5), что, вероятно, связано с исходно неблагоприятным состоянием воздуха в непроветренном помещении.

В момент пиковых концентраций загрязнителей ( $t = 70$  мин) было зафиксировано статистически значимое ухудшение всех субъективных показателей: оценка качества воздуха сместилась к «ощущению духоты» (средний балл 4,8), а общий комфорт упал до 1,7 балла. При этом 33 % испытуемых (2 чел. из 6) отметили появление головной боли, что демонстрирует корреляцию с многократным превышением ПДК по формальдегиду.

После проветривания показатели субъективного восприятия значительно улучшились: оценка качества воздуха снизилась до 2,3 балла, а общий комфорт возрос до 3,5 баллов. Термический комфорт несколько снизился (с 4,5 до 3,3 балла) из-за притока более холодного воздуха, что является ожидаемым компромиссом при обеспечении требуемого воздухообмена.

#### **Обсуждение**

Проведенный эксперимент наглядно показал, что происходит с воздухом в обычном учебном классе, если его не проветривать. Исследования позволили количественно оценить динамику накопления загрязнителей, а именно: в герметизированной аудитории с шестью испытуемыми превышение ПДК<sub>м.р</sub> формальдегида происходит в течение 30 мин, а нормативная концентрация CO<sub>2</sub> достигается к 40-й минуте. К концу 70-минутного периода герметизации уровень формальдегида превышал допустимый в 2,6 раза, что объективно свидетельствует о значительном ухудшении качества воздуха в течение стандартной учебной пары. Выявленный нелинейный характер накопления загрязнителей, с максимумом скорости прироста CO<sub>2</sub> (18,2 ppm/мин) и НСНО (0,0033 мг/м<sup>3</sup> · мин) в интервале 60...70 мин, свидетельствует о кумулятивном эффекте и интенсификации процесса деградации среды во времени. Аналогичный нелинейный тренд в условиях недостаточной вентиляции отмечался и в других исследованиях [4, 10].

Полученные данные убедительно демонстрируют высокую эффективность простого технологического решения — интенсивного сквозного проветривания, которое позволяет вернуть параметры воздуха к исходным значениям в рекордно короткие сроки (5...7 мин). Скорость снижения концентрации CO<sub>2</sub> при проветривании (109 ppm/мин) в 6 раз превышает максимальную скорость его накопления, что доказывает: данный метод исключительно эффективен для оперативного восстановления качества воздуха.

Важным научным результатом является установленная корреляция между объективными данными и субъективным восприятием. Четкая динамика анкетных оценок, совпадающая со сменой цветовой индикации прибора и ростом концентраций, а также появление головной боли у 33 % испытуемых при значительном превышении ПДК по формальдегиду подтверждают надежность используемого методического аппарата для оперативной оценки состояния микроклимата. Появление головной боли у 33 % испытуемых при концентрациях формальдегида > 0,1 мг/м<sup>3</sup> согласуется с данными о его нейротоксическом эффекте, приведенными в [14]. Полученные результаты также подтверждают актуальность внедрения современных методов мониторинга качества воздуха в образовательных учреждениях [15].

Практическая ценность работы подтверждается расчетами. Экспериментально определенная скорость генерации CO<sub>2</sub> (11,77 л/ч на чел.) и, как следствие, расчетный воздухообмен (117,7 м<sup>3</sup>/ч) практически идентичны нормативным значениям, что свидетельствует о достоверности методики и позволяет использовать ее для верификации расчетных методов проектирования вентиляции.

Перспективы дальнейших исследований видятся в изучении эффективности различных режимов проветривания, а также в оценке влияния современных энергоэффективных систем вентиляции с рекуперацией тепла [16]. Полученные данные являются основой для разработки конкретных эксплуатационных рекомендаций для образовательных учреждений и могут быть использованы при обновлении нормативной базы в области проектирования и эксплуатации зданий. Перспективы дальнейших исследований видятся в изучении эффективности различных режимов проветривания (щелевое, угловое, сквозное) в разные сезоны года, а также в оценке влияния современных энергоэффективных систем вентиляции с рекуперацией тепла на динамику изучаемых параметров. Полученные данные являются основой для разработки конкретных эксплуатационных рекомендаций и могут быть использованы при обновлении нормативной базы<sup>4</sup>.

#### **Вывод**

На основании проведенного исследования сформулированы следующие выводы:

1. Разработана и апробирована комплексная методика оценки динамики микроклимата, интегрирующая инструментальный мониторинг и анкетирование, что обеспечивает достоверность и объективность получаемых данных.
2. Установлены критические временные интервалы безопасного пребывания в герметизированных учебных аудиториях, не превышающие

<sup>4</sup> ASHRAE Standard 62.1—2022. Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.

30...40 мин, по истечении которых наблюдается превышение гигиенических нормативов по основным загрязнителям.

3. Доказана необходимость внедрения регламентированного режима проветривания учебных помещений с периодичностью не реже чем каждые 30 мин для обеспечения соответствия параметров воздушной среды установленным нормативам.

4. Обоснована высокая эффективность применения портативных газоанализаторов с цветовой индикацией для оперативного контроля качества воздуха в образовательных учреждениях, что подтверждено установленной корреляцией между объективными измерениями и субъективным восприятием.

5. Экспериментально верифицированы нормативные значения воздухообмена, что подтверждает адекватность существующих строительных норм и правил для обеспечения требуемого качества микроклимата в учебных помещениях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 2006. 256 с.
2. *Ливчак В. И.* Качество воздушной среды в помещениях. М.: Стройиздат, 2012. 184 с.
3. *Табунициков Ю. А., Бродов М. М.* Энергоэффективные здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2013. 278 с.
4. *Awbi H. B.* Ventilation of buildings. 2<sup>nd</sup> ed. London: Spon Press, 2003. 512 p.
5. *Mumovic D., Santamouris M.* A Handbook of sustainable building design and engineering: an integrated approach to energy, health and operational performance. London: Earthscan, 2018. 450 p.
6. Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance / U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar et al. // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120. No. 12. Pp. 1671—1677. DOI: 10.1289/ehp.1104789.
7. *Zhang X., Wargocki P., Lian Z.* Effects of exposure to carbon dioxide and human bioeffluents on cognitive performance // Building and Environment. 2020. Vol. 184. Art. no. 107232. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107232.
8. Impact of indoor air pollution on human health / T. Salthammer, E. Uhde, T. Schripp et al. // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 753. Art. no. 141535. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141535.
9. *Wei W., Ramalho O., Mandin C.* Indoor air quality requirements in green building certifications // Building and Environment. 2015. Vol. 92. Pp. 10—19. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.035.
10. Ventilation rates in schools and pupils' performance / Z. Bakó-Biró, D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H. B. Awbi, M. J. Williams // Building and Environment. 2012. Vol. 48. Pp. 215—223. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018.
11. *Wargocki P., Porras-Salazar J. A., Contreras-Espinoza S.* The relationship between classroom temperature and children's performance in school // Building and Environment. 2020. Vol. 173. Art. no. 106749. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106749.
12. *Persily A., De Jonge L.* Carbon dioxide generation rates for building occupants // Indoor Air. 2017. Vol. 27. Iss. 5. Pp. 868—879. DOI: 10.1111/ina.12383.
13. *Кормилицына О. В., Самотесов Е. Д.* Оценка воздействия формальдегида в воздухе помещений на здоровье человека // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 7. С. 758—763. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-7-758-763.
14. *Власова О. П., Гагарин В. Г.* О влиянии концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе помещений на умственную работоспособность // АВОК. 2020. № 4. С. 44—50.
15. *Камаев И. А., Селиванова Н. Л.* Современные методы контроля качества воздуха в учебных заведениях // Инженер. вестн. Дона. 2022. № 1(84). Ст. 45. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2022/6955>.

16. Тер-Мартirosян А. З., Сидоров В. В., Ермошина Л. Ю. Определение и верификация параметров модели слабого грунта с учетом ползучести // Вестн. МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 6(117). С. 697—708. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708.

© Харитонова И. С., Просвирина И. С., 2026

Поступила в редакцию  
10.12.2025

Ссылка для цитирования:

Харитонова И. С., Просвирина И. С. Экспериментальная оценка рисков накопления CO<sub>2</sub> и формальдегида в учебном помещении // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 254—263. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_254.

Об авторах:

**Харитонова Ирина Сергеевна** — студентка, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ). Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18

**Просвирина Ирина Сергеевна** — канд. техн. наук, доц. каф. инженерных систем и экологии, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (АГАСУ). Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18; isp15@yandex.ru

**Irina S. Kharitonova, Irina S. Prosvirina**

**Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering**

## EXPERIMENTAL RISK ASSESSMENT OF CO<sub>2</sub> AND FORMALDEHYDE ACCUMULATION IN A CLASSROOM ENVIRONMENT

This article presents the results of a field experiment assessing the accumulation rate of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and formaldehyde (HCHO) in a classroom environment without ventilation. It was found that within just 30...40 minutes, pollutant concentrations repeatedly exceeded hygienic standards, negatively affecting the well-being of occupants. The high efficacy of cross-ventilation for rapid air quality restoration was demonstrated. The study provides experimental confirmation of standard air exchange rate values.

**Key words:** indoor climate, air quality, carbon dioxide, formaldehyde, building airtightness, field experiment, ventilation.

**For citation:**

Kharitonova I. S., Prosvirina I. S. [Experimental risk assessment of CO<sub>2</sub> and formaldehyde accumulation in a classroom environment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 254—263. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_254.

**About authors:**

**Irina S. Kharitonova** — Student, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE). 18, Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation

**Irina S. Prosvirina** — Candidate of Engineering Sciences, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering (ASUACE). 18, Tatishcheva st., Astrakhan, 414056, Russian Federation; isp15@yandex.ru