

Анализ результатов мониторинга параметров микроклимата и концентрации углекислого газа в школьной аудитории

Аверьянов Владимир Константинович (Санкт-Петербург). Доктор технических наук, член-корреспондент РААСН. Научно-исследовательский и проектный институт ПАО «Газпром» (197229, Санкт-Петербург, Лахтинский пр-кт, 2, кор. 3, стр. 1. Газпром промгаз). Эл. почта: avk2271216@yandex.ru

Пташкин Павел Александрович (Санкт-Петербург). Научно-исследовательский и проектный институт ПАО «Газпром» (197229, Санкт-Петербург, Лахтинский пр-кт, 2, кор. 3, стр. 1. Газпром промгаз). Эл. почта: P.Ptashkin@spb.promgaz.gazprom.ru

Кравченко Дмитрий Павлович (Санкт-Петербург). Научно-исследовательский и проектный институт ПАО «Газпром» (197229, Санкт-Петербург, Лахтинский пр-кт, 2, кор. 3, стр. 1. Газпром промгаз). Эл. почта: DP.Kravchenko@spb.promgaz.gazprom.ru

Горшков Александр Сергеевич (Санкт-Петербург). Доктор технических наук, советник РААСН. Научно-исследовательский и проектный институт ПАО «Газпром» (197229, Санкт-Петербург, Лахтинский пр-кт, 2, кор. 3, стр. 1. Газпром промгаз). Эл. почта: AS.Gorshkov@spb.promgaz.gazprom.ru

Аннотация. Исследование представляет собой анализ результатов мониторинга параметров микроклимата и качества внутреннего воздуха (температуры, относительной влажности и концентрации CO₂) в помещении учебного класса за период продолжительностью не менее 10 дней зимой и весной 2025 года. Исследование проведено с целью оценки соответствия параметров микроклимата в классе требованиям действующих санитарно-гигиенических нормативов (СанПиН 1.2.3685, СП 60.13330, ГОСТ 30494). Особое внимание уделено динамике изменения концентрации углекислого газа (CO₂) в классе, как ключевому индикатору качества воздушной среды и эффективности системы вентиляции. Регистрируемые показатели влияют на работоспособность и самочувствие людей, что определяет актуальность выявленных проблем и предлагаемых решений. Результаты исследования показывают, что в холодный период года температура и относительная влажность внутреннего воздуха в классе находятся в диапазоне допустимых значений. При этом концентрация углекислого газа (CO₂) в классе систематически превышает допустимый уровень (1400 см³/м³), достигая в отдельные периоды пиковых значений порядка 3000 см³/м³. Предложены конкретные организационные и технические мероприятия, направленные на снижение концентрации CO₂ в классе до допустимого уровня.

Ключевые слова: общеобразовательное учреждение, школьная аудитория, параметры микроклимата, мониторинг, температура внутреннего воздуха, относительная влажность воздуха, концентрация CO₂, энергоэффективность, энергосбережение

Для цитирования. Аверьянов В.К., Пташкин П.А., Кравченко Д.П., Горшков А.С. Анализ результатов мониторинга параметров микроклимата и концентрации углекислого газа в школьной аудитории // Academia. Архитектура и строительство. 2026. № 1. С. 121–132. DOI: 10.22337/2077-9038-2026-1-121-132.

Analysis of the Results of Monitoring Microclimate Parameters and Carbon Dioxide Concentration in a School Classroom

Aver'yanov Vladimir K. (Saint Petersburg). Doctor of Sciences in Technology, Corresponding Member of RAACS. Research and Design Institute of PJSC Gazprom (2/3 Lakhtinsky Avenue, Building 1, 197229 St. Petersburg. Gazprom Promgaz). E-mail: avk2271216@yandex.ru

Ptashkin Pavel A. (Saint Petersburg). Research and Design Institute of PJSC Gazprom (2/3 Lakhtinsky Avenue, Building 1, 197229 St. Petersburg. Gazprom Promgaz). E-mail: P.Ptashkin@spb.promgaz.gazprom.ru

Kravchenko Dmitrii P. (Saint Petersburg). Research and Design Institute of PJSC Gazprom (2/3 Lakhtinsky Avenue, Building 1, 197229 St. Petersburg. Gazprom Promgaz). E-mail: DP.Kravchenko@spb.promgaz.gazprom.ru

Gorshkov Aleksandr S. (Saint Petersburg). Doctor of Sciences in Technology, Advisor of RAACS. Research and Design Institute of PJSC Gazprom (2/3 Lakhtinsky Avenue, Building 1, 197229 St. Petersburg. Gazprom Promgaz). E-mail: AS.Gorshkov@spb.promgaz.gazprom.ru

Abstract. This study analyzes the results of monitoring microclimate parameters and indoor air quality (temperature, relative humidity, and CO₂ concentration) in a classroom over a period of at least 10 days in the winter and spring of 2025. The study was conducted to assess the compliance of the classroom microclimate parameters with current sanitary and hygienic standards (SanPiN 1.2.3685, SP 60.13330, GOST 30494). Particular attention is paid to the dynamics of changes in carbon dioxide (CO₂) concentration in the classroom, as a key indicator of air quality and ventilation system efficiency. The recorded indicators affect people's performance and well-being, which determines the relevance of the identified problems and proposed solutions. The study results show that during the cold season, the temperature and relative humidity of the indoor air in the classroom are within the permissible range. At the same time, the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the classroom systematically exceeds the permissible level (1400 cm³/m³), reaching peak values of approximately 3000 cm³/m³ during certain periods. Specific organizational and technical measures aimed at reducing CO₂ concentrations in the classroom to permissible levels are proposed.

Keywords: general education institution, school auditorium, microclimate parameters, monitoring, indoor air temperature, relative air humidity, CO₂ concentration, energy efficiency, energy saving

For citation. Aver'yanov V.K., Ptashkin P.A., Kravchenko D.P., Gorshkov A.S. Analysis of the Results of Monitoring Microclimate Parameters and Carbon Dioxide Concentration in a School Classroom. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2026, no. 1, pp. 121–132, doi: 10.22337/2077-9038-2026-1-121-132.

Введение

В холодный период года для комфортного пребывания человека в помещении требуется поддерживать в заданных пределах некоторые параметры, характеризующие микроклимат помещений, к которым в первую очередь относятся:

- температура воздуха;
- результирующая температура помещения;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха.

К дополнительным параметрам, характеризующим комфортность пребывания людей в помещениях, следует также отнести температуру на внутренних поверхностях наружных ограждающих конструкций и локальную асимметрию результирующей температуры.

Чем выше относительная влажность воздуха, тем выше его теплоёмкость и теплопроводность, ввиду чего усиливается теплоотдача с поверхности тела человека, а дискомфортное состояние наступает при меньших отклонениях температуры воздуха от оптимальных значений. Кроме того, при более высокой влажности внутреннего воздуха возрастает риск конденсации влаги на наиболее холодных поверхностях наружных ограждающих конструкций (углах, окнах и в местах их примыкания к оконным проёмам).

При низкой относительной влажности воздуха происходит более быстрое испарение влаги с поверхности слизистых оболочек дыхательных путей, что повышает вероятность заражения человека респираторными вирусами и инфекциями.

При более высоких значениях скорости движения (подвижности) воздуха в помещении возникает ощущение сквозняка. Это обстоятельство вызывает дискомфорт, так как увеличение скорости воздуха обуславливает увеличение коэффициента конвективного теплообмена на поверхности тела человека. Увеличение коэффициента теплообмена также способствует увеличению теплопотерь. В соответствии с этим в присутствии детей проветривание в классах не проводится (см. п. 2.7.2 СП 2.4.3648¹).

Более подробно влияние параметров микроклимата и качества воздушной среды на комфортность пребывания обучающихся в помещениях образовательных учреждений рассмотрено в исследованиях [1–5].

В зависимости от сочетания показателей микроклимата различают оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

¹ Санитарные правила СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодёжи» (<https://clck.ru/3Riu7D>).

Под оптимальными параметрами микроклимата следует понимать сочетание показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80 % людей, находящихся в помещении. Оптимальные условия обеспечивают ощущение теплового комфорта и создают предпосылки для хорошей работоспособности.

Под допустимыми параметрами микроклимата следует понимать такое сочетание показателей микроклимата, которое при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивает допустимое состояние организма человека. Допустимые условия учитывают способность организма человека адаптироваться к окружающей среде путём активации биологической терморегуляции [6].

Оптимальные и допустимые нормы температуры и относительной влажности воздуха в учебных аудиториях общеобразовательных учреждений в холодный период года приведены в таблице 1. Значения показателей, приведённых в таблице 1, приняты на основании данных ГОСТ 30494² и СанПиН 1.2.3685³ (табл. 5.34).

Помимо параметров микроклимата существенное влияние на самочувствие людей, находящихся в помещении, оказывает концентрация углекислого газа (CO₂). В совокупности с параметрами микроклимата концентрация CO₂ характеризует качество воздуха в помещении. Оптимальное качество воздуха обеспечивает комфортное состояние организма человека.

Таблица 1. Оптимальные и допустимые значения температуры и относительной влажности внутреннего воздуха в учебных аудиториях школ

Показатели	Оптимальные	Допустимые
Температура внутреннего воздуха, °С	20–21	18–24
Относительная влажность воздуха, %	30–45	не более 60

Таблица 2. Допустимое содержание CO₂ в воздухе в помещениях общественных зданий

Класс	Качество воздуха		Допустимое содержание CO ₂ *, см ³ /м ³
	Оптимальное	Допустимое	
1	Высокое	–	800 и менее
2	Среднее	–	800–1000
3	–	Допустимое	1000–1400
4	–	Низкое	1400 и более

*Приведены показатели сверх фонового содержания CO₂ в наружном воздухе, принятые для большого города равным 400 см³/м³.

Классификация качества воздуха зависит от концентрации CO₂ в помещении и регламентируется ГОСТ 30494. Допустимые значения концентрации CO₂ в помещениях общественных зданий приведены в таблице 2.

Качество воздуха в зданиях достигается необходимым уровнем вентиляции (величиной воздухообмена), обеспечивающим допустимые значения содержания углекислого газа в помещении. Расходы воздуха систем вентиляции, принимаемые для обеспечения качества воздуха, зависят от количества людей в помещении, интенсивности и рода их деятельности, технологических процессов (выделений загрязняющих веществ), а также от систем отопления и вентиляции.

Согласно требованиям п. 9.2.2 СП 251.1325800⁴, кратность воздухообмена в учебных аудиториях общеобразовательных школ должна составлять 2 ч⁻¹, но не менее 20 м³/час наружного воздуха на одно место.

Если принять во внимание требования стандартов, действовавших на момент строительства объекта исследования, то согласно требованиям табл. 20 ВСН 50-86⁵ в классных помещениях воздухообмен должен составлять 16 м³/ч на 1 человека. Удаление воздуха из учебных помещений следовало предусматривать через рекреации и санитарные узлы, а также за счёт эксфильтрации через наружное остекление.

Естественные системы вентиляции часто не обеспечивают требуемый воздухообмен, ввиду чего концентрация CO₂ в помещениях может достигать недопустимых значений [1; 2]. Повышенная концентрация CO₂ в помещении класса может оказывать негативное влияние не только на успеваемость учащихся, но и приводить к росту заболеваемости [7; 8]. При уровне CO₂ выше 1000 ppm⁶ люди могут испытывать признаки так называемого «синдрома больного здания», при котором наблюдаются общий дискомфорт, головная боль, раздражение слизистых оболочек, сухой кашель, головная боль, снижение концентрации внимания учащимися, проблемы с дыхательной и кровеносной системами [9–12].

Здоровье детей определяет будущее здоровье всей нации. Со временем экономия на здоровье детей может самым негативным образом отразиться на всей системе здравоохранения. В этой связи оценка соответствия показателей, характеризующих качество воздуха в учебных классах, требованиям санитарно-гигиенических нормативов определяет

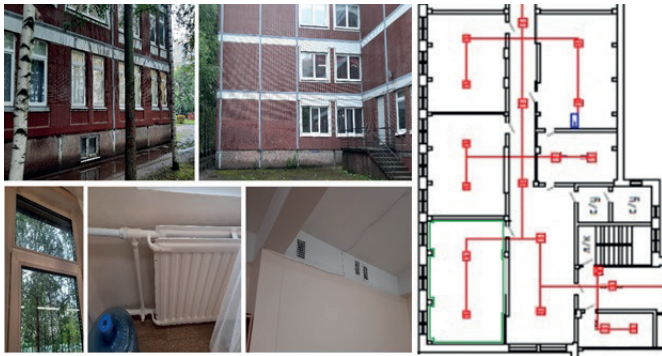
² ГОСТ 30494-2011. Межгосударственный стандарт. «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» (<https://clck.ru/3Riuv3>).

³ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (<https://docs.cntd.ru/document/573500115?section=text>).

⁴ СП 251.1325800.2016 «Здания общеобразовательных организаций» (<https://docs.cntd.ru/document/1200139445>).

⁵ ВСН 50-86. Ведомственные строительные нормы «Общеобразовательные школы и школы-интернаты. Нормы проектирования» (<https://docs.cntd.ru/document/1200037309>).

⁶ В иностранной литературе концентрация CO₂ часто обозначается сокращением ppm (от англ. parts per million) и выражает концентрацию вещества в миллионных долях, что эквивалентно концентрации, выраженной в см³/м³.



а) общий вид и интерьеры;
 б) план

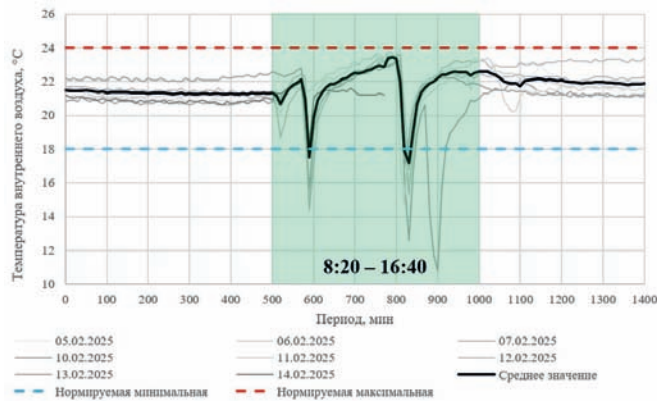


Рис. 2. Температура внутреннего воздуха в период наблюдения

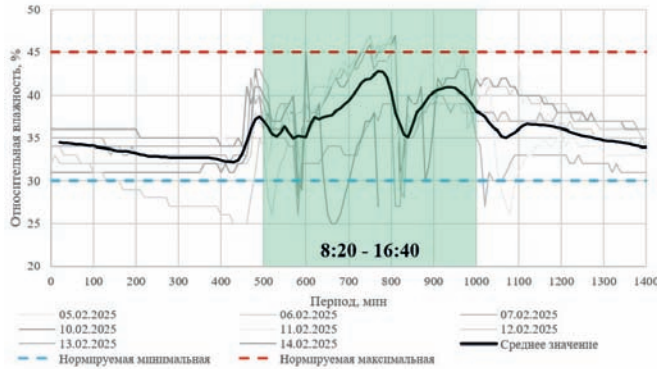


Рис. 3. Относительная влажность воздуха в период наблюдения

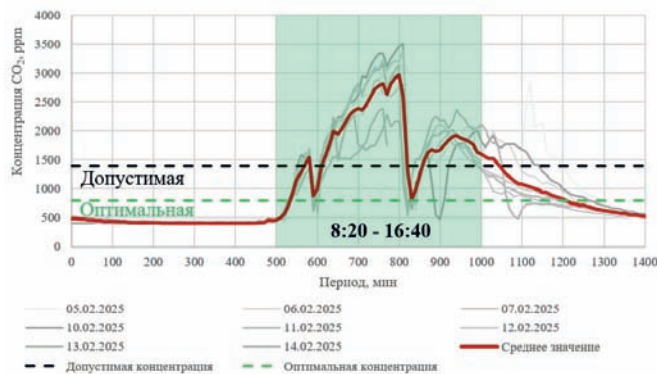


Рис. 4. Концентрация CO₂ в период наблюдения

актуальность рассматриваемых в исследовании проблем и предлагаемых решений.

Объект исследования представляет собой трёхэтажное здание образовательного учреждения, построенное в Ленинграде в 1988 году по типовому проекту 222-1-1ЛГ. Наружные стены выполнены из керамзитобетонных панелей толщиной 300 мм. Перекрытия – плиты сборные железобетонные плоские толщиной 100 мм. Оконные проёмы – стеклопакеты в ПВХ переплётах (по первоначальному проекту – двойное остекление в отдельных деревянных переплётах). Общая площадь здания составляет 7183 м². Вид обследуемого помещения представлен на рисунке 1.

Обследуемое помещение расположено на первом этаже здания и представляет собой учебный класс площадью 55 м², высотой – 3,12 м, объём помещения – 171,6 м³.

В наружных стенах рассматриваемого помещения расположены шесть оконных проёмов, заполненных оконными блоками размером 2×0,75 м. Суммарная площадь окон – 9 м². Суммарная протяжённость стыков (швов) между панелями в пределах помещения составляет 30 п.м.

Высота здания от уровня пола первого этажа до верха вытяжной шахты составляет 11,5 м.

Целями описываемого исследования является мониторинг параметров микроклимата в помещении учебного класса в зимний период, анализ полученных результатов, оценка соответствия параметров микроклимата в классе требованиям действующих санитарно-гигиенических нормативов и разработка рекомендаций, направленных на улучшение показателей качества воздуха в рассматриваемом учебном помещении.

Результаты исследования

Измерения параметров микроклимата (температуры внутреннего воздуха, относительной влажности и концентрации CO₂) в помещении учебного класса за периоды 05.02.2025–14.02.2025 и 01.04.2025–14.04.2025 проводились с помощью монитор-детектора CO₂. Данный прибор позволяет фиксировать с заданной периодичностью показания температуры, относительной влажности внутреннего воздуха и уровня CO₂ в окружающем воздухе. Для измерения уровня CO₂ датчик использует принцип недисперсионного инфракрасного (NDIR) спектрального анализа. Характеристики монитор-детектора CO₂ представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики монитор-детектора CO₂

Наименование	Измеряемый параметр		
	CO ₂	Температура	Влажность
Диапазон измерений	400÷9999 ppm	-20 ÷ 50 °C	0÷99,9%
Относительная погрешность измерений	±15 %	±0,5 °C	±5 %
Разрешение	1 ppm	0,1 °C	0,10 %

Результаты измерения температуры внутреннего воздуха в классе за период с 05.02.2025 по 14.02.2025 год приведены на рисунке 2, относительной влажности воздуха – на рисунке 3, концентрации CO₂ – на рисунке 4.

В процессе наблюдений зафиксированы регулярные залповые проветривания помещения в период 9:40–9:50 и 13:40–13:50, а также многократные короткие проветривания с периодичностью 40 минут. Ни залповые, ни короткие проветривания не приводят к длительному улучшению качества воздуха в помещении.

Из представленных на рисунках 2–4 данных следует:

- температура внутреннего воздуха соответствует требованиям СанПиН 1.2.3685 (18-24 °С);
- относительная влажность внутреннего воздуха соответствует требованиям СанПиН 1.2.3685 (30-45 %);
- концентрация диоксида углерода в период наблюдения превышает допустимую – 1400 ppm (ГОСТ 30494).

Данные, представленные на рисунке 4, согласуются с результатами исследований [1; 7], что подтверждает их сходимость.

Содержание CO₂ выше 1400 ppm приводит к утомляемости, потере учащимися концентрации и повышению сонливости. Более подробно физиологические проявления у людей при повышении концентрации CO₂ в помещении рассмотрены в исследованиях [9–12].

Причиной повышенного уровня CO₂ во время занятий, очевидно, является недостаточная кратность воздухообмена в помещении.

Кратность воздухообмена может быть определена косвенным способом – через изменение концентрации CO₂ в вечерний и ночной периоды.

В период после 16:00 (соответствует значению 960 мин. на графиках рисунков 2–4) учитель и все ученики покидают класс, после чего он закрывается до начала следующего учебного дня. Концентрация CO₂ постепенно снижается от начального значения до фоновое.

Снижение концентрации CO₂ описывается следующим уравнением:

Таблица 4. Концентрация CO₂ в период измерений, ppm

Время	05.02	06.02	07.02.	10.02.	11.02	12.02	13.02	14.02	Среднее значение
00:00	–	509	503	409	532	500	490	514	494
01:00	–	455	464	414	481	455	458	456	455
02:00	–	434	448	404	449	427	424	434	431
03:00	–	413	436	400	457	406	421	400	419
04:00	–	404	424	410	428	403	408	404	412
05:00	–	402	415	403	427	402	401	402	407
06:00	–	397	414	406	431	398	400	403	407
07:00	–	402	422	409	424	397	404	401	408
08:00	–	458	496	446	495	454	454	417	460
09:00	–	810	914	1013	958	981	909	842	918
10:00	–	1081	557	1043	1154	1009	903	1216	995
11:00	–	2195	2120	2244	2182	2200	1521	1831	2042
12:00	–	2631	2462	2926	2813	2843	1673	1807	2451
13:00	–	2904	2601	3257	2928	3174	2073	–	2823
14:00	–	629	892	1132	1513	749	977	–	982
15:00	–	1521	1800	471	2185	2121	1956	–	1676
16:00	–	2060	1722	1786	2208	1603	1798	–	1863
17:00	–	1823	1118	1847	1847	1276	1219	–	1522
18:00	–	1602	869	1779	524	1086	975	–	1139
19:00	2106	1148	800	1419	746	933	877	–	987
20:00	1403	959	687	1000	724	774	775	–	820
21:00	923	767	595	805	648	654	703	–	695
22:00	727	608	549	664	594	590	618	–	604
23:00	597	548	531	585	539	530	533	–	544

$$C_t = C_0 \cdot \exp[-n \cdot t], \quad (1)$$

где C_0 – начальная концентрация; C_t – концентрация в момент времени t ; n – кратность воздухообмена (ч^{-1}); C_t – время.

В связи с тем, что измеряется абсолютная концентрация, в уравнение необходимо внести поправку на фоновую концентрацию, составляющую в месте расположения рассматриваемого объекта 400-410 ppm.

Снижение концентрации с учётом фона имеет следующий вид

$$C_t = C_{out} + (C_0 - C_{out}) \cdot \exp[-n \cdot t], \quad (2)$$

где C_{out} – фоновая концентрация; C_0 , n , t – то же, что и в уравнении (1).

Преобразуя данное уравнение относительно известных значений концентрации и времени измерений, можно определить кратность воздухообмена:

$$n = -\frac{1}{t} \cdot \ln \frac{C_t - C_{out}}{C_0 - C_{out}}. \quad (3)$$

Все обозначения в уравнении (3) те же, что и в уравнениях (1) и (2).

Подставив в уравнение значения средней концентрации по результатам измерений в период с 16:00 до 23:00 (7 часов) из таблицы 4 (когда в помещении отсутствуют источники CO_2), получим кратность воздухообмена:

$$n = -\frac{1}{7} \cdot \ln \frac{544 - 407}{1863 - 407} = 0,34 \text{ (ч}^{-1}\text{)}.$$

Если принять во внимание исходные данные, то при средней за отопительный период скорости ветра в Санкт-Петербурге 2,4 м/с (по данным табл. 5.1 СП 131.13330⁷) разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций составит около 10 Па.

При нормативной поперечной воздухопроницаемости окон 0,5 кг/(м²·ч) и стыков между панелями – 0,5 кг/(м·ч), количество инфильтрующегося через наружные ограждения в помещение класса воздуха составит 60 кг/ч, что эквивалентно 50 м³/ч (при плотности воздуха 1,2 кг/м³). Кратность воздухообмена за счёт инфильтрации наружного воздуха, таким образом, составит 50/165 = 0,3 ч⁻¹. Исходя из полученной оценки можно сделать вывод, что полученное ранее при закрытых окнах расчётное значение кратности воздухообмена (0,34 ч⁻¹) обусловлено инфильтрацией наружного воздуха в помещение за счёт поперечной воздухопроницаемости наружных ограждений, отделяющих обследуемое помещение от наружной среды.

Фактическая воздухопроницаемость оконных блоков может оказаться больше нормативных показателей, особенно в том случае, если не производится сезонная регулировка створок окна.

Кратность воздухообмена также может быть подобрана по результатам фактических измерений для конкретных суток.

На рисунке 5 представлены графики фактических и расчётных снижений концентрации CO_2 в вечерний период. Для 07.02, 12.02–14.02 кратность воздухообмена близка к 0,35 ч⁻¹, а для 06.02, 10.02, 14.02 – 0,37 ч⁻¹. Данная кратность воздухообмена достигается за счёт инфильтрации наружного воздуха через светопрозрачные ограждения.

Анализ результатов измерения концентрации CO_2 в помещении класса показывает, что в вечерний и ночной периоды времени кратность воздухообмена в помещении с закрытыми окнами составляет 0,35 ÷ 0,37 ч⁻¹, то есть в 6 раз ниже нормативного показателя (табл. 9.1 СП 251.1325800).

Полученные значения кратностей воздухообмена предположительно имели место в период нахождения детей в классе. Во время присутствия детей в классе окна остаются в закрытом положении для уменьшения скорости движения воздуха. Периодические проветривания осуществляются на переменах, а также во время завтрака и обеда, когда дети в классе отсутствуют.

Увеличение концентрации CO_2 описывается следующим уравнением:

$$C_t = C_{out} + \frac{G \cdot 10^6}{n \cdot V} \cdot (1 - \exp[-n \cdot t]), \quad (4)$$

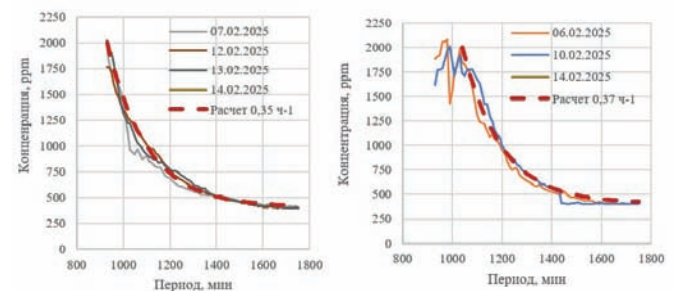
где G – мощность источника CO_2 , м³/ч; V – объём помещения, м³; C_t , n , t – то же, что и в уравнении (1); C_{out} – то же, что и в уравнении (2).

Источником выделения CO_2 являются находящиеся в классе 30 учеников и один учитель. Согласно данным исследования [8], ребёнок в возрасте 6-11 лет в спокойном состоянии выделяет порядка 13,2-14,3 л CO_2 в час. Взрослый человек в аналогичных условиях выделяет порядка 27 л CO_2 в час.

С учётом исходных данных суммарная мощность выделения CO_2 от присутствующих в классе людей составит:

$$G_{\text{уч.кол}} = g_{\text{дет.}}^{\text{нок.}} \cdot n_{\text{дет.}} + g_{\text{взр.}}^{\text{нок.}} \cdot n_{\text{взр.}} = 13,75 \cdot 30 + 27 \cdot 1 = 440 \text{ (л/ч)}. \quad (5)$$

⁷ СП 131.13330.2025. Свод правил «Строительная климатология» (<https://docs.cntd.ru/document/1313808224>).



а) б)
Рис. 5. Снижение концентрации CO_2 в вечерний и ночной периоды

На рисунке 6 представлена фактическая и расчётная концентрации при принятой кратности воздухообмена 0,37 ч⁻¹, мощности источника CO₂ 0,44 м³/ч (30 учеников и один учитель) и объёме помещения в 171,6 м³.

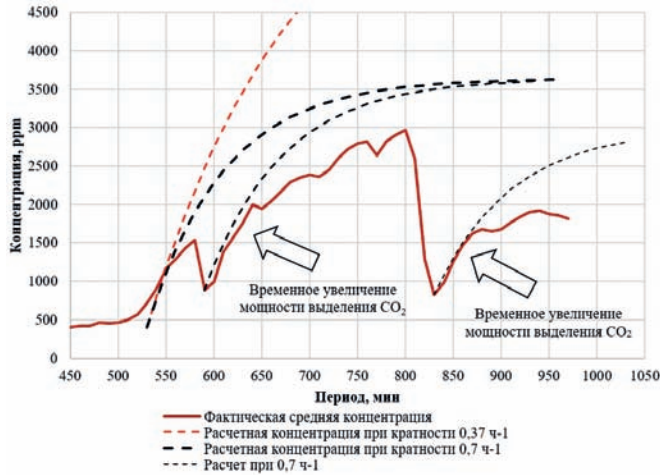


Рис. 6. Фактическая и расчётная концентрации CO₂ во время обучения

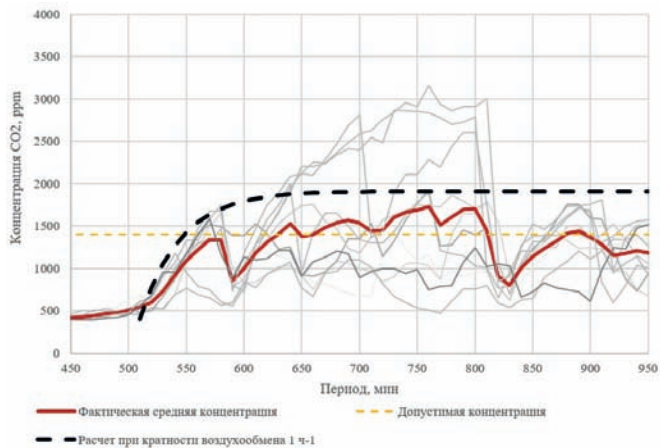


Рис. 7. Фактическая средняя концентрация CO₂ в весенний период и расчётная при нормативной кратности воздухообмена

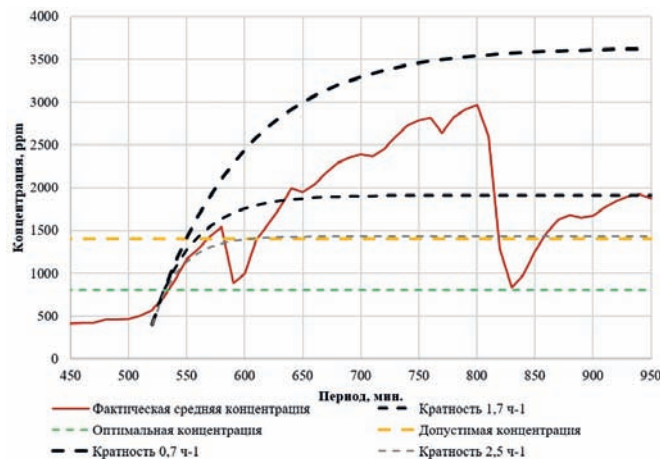


Рис. 8. Расчётная концентрация CO₂ при нормативной кратности воздухообмена

Увеличение расчётной концентрации CO₂ не соответствует фактически наблюдаемой кривой. Рост фактической концентрации CO₂ значительно отстаёт от расчётной при кратности воздухообмена 0,37 ч⁻¹ и больше соответствует кратности порядка 0,7 ч⁻¹. Увеличение кратности воздухообмена в период обучения может объясняться использованием режима микропроветривания.

Фактическая концентрация в период 510–580 мин. (08:30–09:40) – начало и первый урок, вырастает до 1500 ppm, что несколько ниже расчётной концентрации при кратности воздухообмена 0,7 ч⁻¹ (расчётная 1800 ppm), что вероятно объясняется открытием двери в рекреацию, одновременным входом детей в класс и прочими факторами.

В период 9:40–10:00 дети покидают класс на время завтрака и в помещении осуществляется проветривание, в результате которого концентрация CO₂ падает с 1500 ppm до 885 ppm.

После начала второго урока (600 мин) скорость изменения CO₂ несколько возрастает, что объясняется более интенсивным выделением CO₂ после активности детей на перемене и повышения уровня метаболизма после приёма пищи.

Периодические проветривания на переменах позволяют кратковременно снижать уровень CO₂, однако они практически не оказывают влияния на скорость роста CO₂ и его максимальный уровень.

Выполненные расчёты показали, что при отсутствии периодического проветривания максимальный уровень CO₂ находился бы в районе 3600 ppm, что на 21,2 % выше фактического значения (2969 ppm).

Кратность воздухообмена может быть увеличена путём использования режима микропроветривания на большем количестве пластиковых окон.

В связи с невозможностью проведения эксперимента по установлению максимальной кратности воздухообмена в зимний период путём организации микропроветривания, проанализированы данные за весенний период.

В период 01.04.2025–14.04.2025 температура наружного воздуха позволяла безопасно для здоровья детей использовать режим микропроветривания в период проведения уроков. В результате средняя концентрация CO₂ в этот период не превышала 1830 ppm.

Количество учеников и геометрические размеры помещения в весенний период не изменились.

Выполненная оценка кратности воздухообмена показала, что в весенний период средняя кратность воздухообмена составляет порядка 1,7 ч⁻¹.

Фактические значения средней концентрации CO₂ в весенний период представлены в таблице 5, а их сравнение с расчётным значением при кратности воздухообмена 1,7 ч⁻¹ показано на рисунке 7.

Результаты анализа фактической концентрации CO₂ в весенний период показывают, что кратность воздухообмена фактически может быть увеличена до 1,7 ч⁻¹ путём организа-

ции микропроветривания через существующее остекление в зимний период, однако для снижения концентрации CO₂ до уровня 1400 ppm требуется увеличение кратности воздухообмена до 2,5 ч⁻¹.

На рисунке 8 представлена фактическая и расчётные концентрации при кратности воздухообмена 0,7 ч⁻¹, 1,7 ч⁻¹ и 2,5 ч⁻¹ при мощности источника CO₂ – 0,44 м³/ч в объёме помещения в 171,6 м³.

Как видно из рисунка 8, при кратности воздухообмена 2,5 ч⁻¹, расчётная концентрация CO₂ в классе не превышает 1400 ppm, что на 47% ниже максимального фактического значения (2969 ppm).

Вместе с тем необходимо оценить снижение температуры внутреннего воздуха в рассматриваемом помещении в зимний период при увеличении кратности воздухообмена до нормативного значения.

Таблица 5. Концентрация CO₂ в период весенних измерений, ppm

Время	01.04	02.04	03.04	04.04	07.04	08.04	09.04	10.04	11.04	14.04	Среднее значение
00:00	403	437	400	401	413	495	495	432	472	455	440
01:00	397	428	400	402	426	458	471	427	438	450	430
02:00	403	411	403	404	436	437	461	417	421	436	423
03:00	401	408	404	396	433	422	459	484	411	416	423
04:00	403	401	400	403	442	438	447	414	402	422	417
05:00	402	403	397	401	436	424	448	424	404	429	417
06:00	404	411	403	401	448	426	443	414	400	401	415
07:00	407	401	401	400	451	417	438	416	404	402	414
08:00	546	461	456	430	524	450	497	486	436	414	470
09:00	827	700	697	879	927	937	1019	1185	1073	957	920
10:00	1122	828	851	1391	729	882	1044	793	1185	1137	996
11:00	832	753	674	914	1425	1762	2254	2207	2103	1077	1400
12:00	1155	850	820	1143	1305	1576	2758	2485	1443	1002	1454
13:00	974	1404	616	1281	1179	1865	2861	2702	2441	800	1612
14:00	845	1023	633	1038	1281	1030	1077	1259	1207	665	1006
15:00	1321	1244	1115	1602	1344	1363	1684	1757	1665	616	1371
16:00	1317	594	1186	1076	1592	1055	887	1406	1093	–	1134
17:00	1059	804	1060	1116	1606	1072	1034	1342	1212	–	1145
18:00	944	789	835	737	1386	1170	1186	1085	877	–	1001
19:00	725	604	494	638	946	824	791	920	676	–	735
20:00	662	541	489	557	804	760	626	800	553	–	644
21:00	556	451	451	497	680	661	533	677	511	–	557
22:00	510	417	401	469	576	575	472	575	481	–	497
23:00	467	401	397	450	531	530	453	519	444	–	466

Таблица 6. Температура наружного воздуха в момент проведения измерений

Время/дата	05.02	06.02	07.02	10.02	11.02	12.02	13.02	14.02	Среднее значение
21:00	-5,0	-3,5	-6,5	-4,3	-2,9	-3,4	-5,1	-10,6	-5,2
18:00	-6,0	-4,4	-3,8	-4,6	-3,8	-3,7	-4,8	-6,8	-4,7
15:00	-7,1	-3,0	-1,8	-4,6	-4,2	-4,0	-4,5	-6,2	-4,4
12:00	-10,6	-4,0	-4,9	-4,9	-4,4	-4,7	-4,4	-6,3	-5,5
09:00	-13,6	-4,6	-6,2	-6,5	-4,3	-4,5	-5,0	-7,1	-6,5
06:00	-14,8	-4,5	-3,1	-7,2	-3,9	-5,5	-4,8	-6,2	-6,3
03:00	-12,8	-4,4	-3,0	-7,6	-4,3	-5,6	-4,9	-5,7	-6,0
00:00	–	-4,7	-3,2	-6,6	-4,0	-4,1	-3,6	-5,6	-4,5

В таблице 6 приведены значения температуры наружного воздуха в периоды проведения измерений. Средняя температура наружного воздуха в период проведения измерений составила минус 5,3 °С.

Для оценки изменения температуры внутреннего воздуха в помещении в случае увеличения кратности воздухообмена используется уравнение теплового баланса:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p \cdot \rho \cdot V} \cdot (Q - c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V \cdot (T - T_{out})), \quad (6)$$

где T – температура в помещении, °С; T_{out} – температура наружного воздуха, °С; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; Q – мощность источника тепла Вт; n – то же, что и в уравнении (1), ч⁻¹.

Стандартное решение для температуры в помещении с источником тепла и вентиляцией (без учёта теплопередачи через ограждающие конструкции):

$$T(t) = T_{out} + \frac{Q}{c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V} \cdot \left((T - T_{out}) - \frac{Q}{c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V} \right) \cdot \exp[-n \cdot t], \quad (7)$$

где все обозначения те же, что и в уравнениях (1) и (5).

Установившаяся (предельная) температура:

$$T_{ycm} = T_{out} + \frac{Q}{c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V}. \quad (8)$$

Решение:

$$T(t) = T_{ycm} + (T - T_{ycm}) \cdot \exp[-n \cdot t]. \quad (9)$$

Установившаяся температура внутреннего воздуха в ночной период составляла 21,3 °С (см. рис. 2).

Тепловыделения коллектива в процессе обучения можно определить исходя из данных, представленных в работе [13]:

$$Q_{уч.кол} = q_{дет.}^{нок.} \cdot n_{дет.} + q_{взр.}^{нок.} \cdot n_{взр.}, \quad (10)$$

где $q_{дет.}^{нок.}$ – количество явной теплоты, выделяемой ребёнком при лёгкой (умственной) работе, Вт/(чел); $q_{взр.}^{нок.}$ – количество явной теплоты, выделяемой учителем при лёгкой работе, Вт/(чел); $n_{дет.}$, $n_{взр.}$ – количество детей и взрослых, соответственно.

Согласно данным [13], явное тепловыделение взрослого человека при лёгкой работе при температуре окружающего воздуха 21 °С составляет 93 Вт. Взрослые женщины выделяют 85 % (80 Вт), дети – в среднем 75 % (70 Вт) от тепловыделений мужчин.

Подставив значения $q_{дет.}^{нок.}$, $q_{взр.}^{нок.}$ получим:

$$Q_{уч.кол} = q_{дет.}^{нок.} \cdot n_{дет.} + q_{взр.}^{нок.} \cdot n_{взр.} = 70 \cdot 30 + 80 \cdot 1 = 2180 \text{ (Вт)}.$$

Требуемая дополнительная кратность воздухообмена для компенсации тепловыделений учебного коллектива для сохранения установившегося температурного режима может быть определена по формуле:

$$n_{mp} = \frac{Q_{уч.кол}}{c_p \cdot \rho \cdot V \cdot (T_{ycm} - T_{out})} = \frac{2180 \cdot 3600}{1005 \cdot 1,23 \cdot 171,6 \cdot (21,3 - (-5,3))} = 1,39 \text{ (ч}^{-1}\text{)}.$$

Суммарная кратность воздухообмена, при которой теоретически сохраняется установившийся температурный режим, складывается из кратности при плотно закрытых окнах (0,37 ч⁻¹) и требуемой для компенсации тепловыделений коллектива (1,39 ч⁻¹):

$$n_{\Sigma} = n + n_{mp} = 0,37 + 1,39 = 1,78 \text{ (ч}^{-1}\text{)}.$$

Как показано выше, при кратности воздухообмена 1,7 ч⁻¹ расчётная концентрация CO₂ в помещении составит 1913 ppm. Увеличение кратности воздухообмена до 1,78 ч⁻¹ позволит снизить расчётную концентрацию CO₂ на 45 % без риска нарушения нормируемой минимальной температуры внутреннего воздуха в помещении. Но даже при таком воздухообмене по классификации таблицы 4 ГОСТ 30494 качество воздуха в помещении класса окажется низким с допустимым содержанием CO₂ 1000 и более см³/м³ сверх содержания CO₂ в наружном воздухе.

Откуда следует, что ни залповое проветривание помещения класса в перерывах, ни микропроветривание во время проведения уроков не обеспечивает допустимое качество воздуха в помещении.

Для обеспечения допустимых показателей концентрации CO₂ в помещении класса в периоды проведения учебных занятий требуется устройство механической системы вентиляции с подогревом приточного воздуха. Для уменьшения затрат тепловой энергии на нагрев приточного воздуха целесообразно использовать устройства утилизации теплоты удаляемого воздуха [14–18]. Повышение энергетической эффективности механической системы вентиляции может быть достигнуто также за счёт автоматического регулирования подачи воздуха по концентрации углекислого газа в помещении [19].

Для обеспечения требуемого воздухообмена в классе возможна установка стеновых вентиляционных клапанов. В настоящее время многие отечественные компании предлагают стеновые вентиляционные клапаны, оснащённые системой утилизации теплоты вытяжного воздуха (рекуперации). Для притока и подогрева приточного воздуха, поступающего с улицы, могут использоваться специальные вентиляционные устройства (бризеры).

В качестве альтернативного варианта обеспечения допустимых показателей концентрации CO₂ возможно использование в классах химических или биологических поглотителей углекислого газа при обеспечении безопасности их использования в условиях школьной аудитории.

Одним из способов снижения концентрации CO₂ в помещениях является использование при внутренней отделке стен известковых штукатурных составов [20], так как находящаяся в их составе известь (гидроксид кальция) способна в течение длительного времени поглощать углекислый газ из воздуха.

Руководству школ также следует обращать внимание на обеспечение нормативных показателей площади класса, приходящейся на одного обучающегося.

Согласно требованиям п. 3.4.14 4.9 СП 2.4.3648⁸ площадь учебных классов без учёта площадей, необходимых для расстановки дополнительной мебели для хранения учебных пособий и оборудования, должна составлять не менее 2,5 м² на одного обучающегося при фронтальных формах занятий и не менее 3,5 м² на одного обучающегося при организации групповых форм работы и индивидуальных занятий. Для обследуемого помещения площадь учебного класса, приходящаяся на одного обучающегося, составляет $55/31 = 1,77$ м²/чел, что меньше нормативного показателя. С учётом мебели в классе удельная площадь учебного класса, приходящаяся на одного ребёнка, окажется ещё меньше.

Таким образом, обеспечение нормативных показателей микроклимата и качества воздуха в школьных аудиториях может быть достигнуто путём реализации комплекса инженерных и организационных мероприятий. Организационные мероприятия являются необходимыми, инженерные – достаточными.

Выводы

На основании проведённого анализа можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Фактическая кратность воздухообмена в исследуемом учебном помещении в зимний период при закрытых окнах составляет $0,35 \div 0,37$ ч⁻¹, что приблизительно в шесть раз ниже нормативного значения (2 ч⁻¹).

2. Фактическая кратность воздухообмена в исследуемом учебном помещении в зимний период во время учебного процесса составляет 0,7 ч⁻¹, что примерно в три раза ниже нормативного значения (2 ч⁻¹).

3. Вследствие недостаточной вентиляции в учебные часы, концентрация CO₂ в исследуемом помещении учебного класса систематически превышает допустимый уровень в 1400 ppm, достигая в отдельные периоды пиковых значений около 3000 ppm.

4. Существующая практика периодических (залповых и кратковременных) проветриваний не обеспечивает долгосрочное улучшение качества воздуха в помещении и не предотвращает накопление CO₂ до высоких уровней в период проведения учебных занятий.

5. Результаты измерений за весенний период показывают, что использование режима микропроветривания позволяет достичь кратности воздухообмена 1,7 ч⁻¹. Указанная кратность воздухообмена в зимний период при температуре наружного воздуха до минус 5,3 °С теоретически не приводит к снижению температуры внутреннего воздуха благодаря тому, что тепловыделения учебного коллектива (около 2,2 кВт) выступают в роли внутреннего источника тепла. Они ком-

пенсируют увеличение воздухообмена до указанного уровня, предотвращая падение температуры внутреннего воздуха.

6. Для обеспечения нормативного качества воздушной среды с уровнем CO₂ менее 1400 ppm в зимний период целесообразно использовать механическую систему вентиляции, обеспечивающую требуемый приток подогретого свежего воздуха. При этом предпочтение следует отдавать энергосберегающим технологиям, например, системам вентиляции с утилизацией теплоты удаляемого воздуха и автоматическим регулированием подачи воздуха по критерию допустимой концентрации углекислого газа в помещении.

7. При невозможности устройства механической системы вентиляции для обеспечения требуемого воздухообмена во время проведения учебных занятий возможно устройство стеновых вентиляционных клапанов, оборудованных системой утилизации теплоты приточного воздуха, или использование вентиляционных устройств с подогревом приточного воздуха (бризеров).

8. В качестве альтернативного варианта обеспечения допустимого уровня концентрации углекислого газа в учебных аудиториях могут быть рекомендованы химические или биологические поглотители углекислого газа.

9. Реализацию рассмотренных выше инженерно-технических решений необходимо выполнять с одновременным обеспечением нормативных показателей удельной площади учебного класса, приходящейся на одного ребёнка (не более 2,5 м² на одного обучающегося). При сложности реализации предлагаемых инженерно-технических решений должна быть увеличена удельная площадь учебного класса, приходящаяся на одного ребёнка, в соответствии с изложенной выше методикой расчёта.

10. Одновременная реализация предлагаемых технических и организационных мероприятий позволит обеспечить нормативные параметры микроклимата и допустимые показатели качества воздуха в учебных классах, что благоприятно скажется на здоровье детей.

11. Актуальность рассмотренной проблемы требует проведения исследований состояния воздушной среды в большинстве школьных зданий, а для их решения необходима разработка оптимальных инженерно-технических мероприятий с привлечением высокопрофессиональных специализированных организаций.

Список литературы/References

1. Долбилова, М. А. Особенности организации естественной вентиляции в образовательных учреждениях / М.А. Долбилова, Н. М. Попова. EDN WTZZRZ // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2021. № 1 (22). С. 39-43.

Dolbilova M.A., Popova N.M. Features of the Organization of Natural Ventilation in Educational Institutions. In: *Urban Development. Infrastructure. Communications*, 2021, no. 1 (22), pp. 39–43. EDN WTZZRZ. (In Russ.)

2. Natural Ventilation and Indoor Air Quality in Educational Buildings: Experimental Assessment and Improvement Strategies

⁸ Санитарные правила СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи» (<https://clck.ru/3Riu7D>).

/R.M.S.F. Almeida, M. Pinto, P.G. Pinho, L.T. de Lemos. DOI 10.1007/s12053-016-9485-0 // *Energy Efficiency*. 2017. № 10. P. 839–854. URL: <https://clck.ru/3Rj7fq> (дата обращения 16.01.2026)

Almeida R.M.S.F., Pinto M., Pinho P.G., de Lemos L.T. Natural Ventilation and Indoor Air Quality in Educational Buildings: Experimental Assessment and Improvement Strategies. In: *Energy Efficiency*, 2017, no. 10, pp. 839–854. DOI 10.1007/s12053-016-9485-0. URL: <https://clck.ru/3Rj7fq> (Accessed 01/16/2026). (In Engl.)

3. Adaptive Thermal Comfort in Primary School Classrooms: Creating and Validating PMV-Based Comfort Charts / S.T. Mors, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, A.C. Boerstra. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.05.025 // *Building and Environment*. 2011. – № 46 (12). P. 2454–2461. URL: <https://clck.ru/3Rj838> (дата обращения 16.01.2026).

Mors S.T., Hensen J.L.M., Loomans M.G.L.C., Boerstra, A.C. Adaptive Thermal Comfort in Primary School Classrooms: Creating and Validating PMV-Based Comfort Charts. In: *Building and Environment*, 2011, no. 46 (12), pp. 2454–2461. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.05.025. URL: <https://clck.ru/3Rj838> (Accessed 01/16/2026). (In Engl.)

4. Griffiths, M. Control of CO₂ in a Naturally Ventilated Classroom / M. Griffiths, M. Eftekhari. DOI 10.1016/j.enbuild.2007.04.013 // *Energy and Buildings*. 2008. № 40 (4). P. 556–560. URL: <https://clck.ru/3Rj8aq> (дата обращения 16.01.2026).

Griffiths M., Eftekhari M. Control of CO₂ in a Naturally Ventilated Classroom. In: *Energy and Buildings*, 2008, no. 40 (4), pp. 556–560. DOI 10.1016/j.enbuild.2007.04.013. URL: <https://clck.ru/3Rj8aq> (Accessed 01/16/2026). (In Engl.)

5. Experimental Investigation of the Air Flow and indoor Carbon Dioxide Concentration in Class-Rooms with Intermittent Natural Ventilation / M. Santamouris, A. Synnefa, M. Assimakopoulos [и др.]. DOI: 10.12691/jephh-7-1-3 // *Energy and Buildings*. 2008. № 40 (10). P. 1833–1843. URL: <https://clck.ru/3SjuSx> (дата обращения 16.01.2026).

Santamouris M., Synnefa A., Assimakopoulos M. [et al.] Experimental Investigation of the Air Flow and Indoor Carbon Dioxide Concentration in Class-Rooms with Intermittent Natural Ventilation. In: *Energy and Buildings*, 2008, no. 40 (10), pp. 1833–1843. DOI: 10.12691/jephh-7-1-3. URL: <https://clck.ru/3SjuSx> (Accessed 01/16/2026). (In Engl.)

6. Инженерное оборудование зданий и сооружений : Учебник для вузов / Ю.А. Табунщиков, Л.П. Голубничий, Ю.Н. Ефимов [и др.] ; под ред. Ю.Н. Табунщикова. Москва : Высшая школа, 1989. 238 с.

Tabunshchikov Yu.A., Golubnichii L.P., Efimov Yu.N. [et al.] *Engineering Equipment of Buildings and Structures*, Yu.N. Tabunshchikov (ed.). Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 238 p. (In Russ.)

7. Обзор результатов исследований влияния качества воздуха на обучение и посещаемость / Д.С. Симонов, А.Ю. Морозов, К.Д. Коновалова, Е.Л. Миськова // *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024. № 10. С. 54–56.

Simonov D.S., Morozov A.Yu., Konovalova K.D., Mis'kova E.L. Review of Research Results on the Impact of Air Quality on Learning and Attendance. In: *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*, 2024, no. 10, pp. 54–56. (In Russ.)

8. Tugores. J. Estimation of Children's CO₂ Generation Rates in Naturally Ventilated Educational Buildings / J. Tugores, M. Macarulla, M. Gangoells. DOI 10.1016/j.buildenv.2024.111550 // *Building and Environment*. 2024. № 257. P. 111550. URL: <https://clck.ru/3Rj9KA> (дата обращения 16.01.2026).

Tugores J., Macarulla M., Gangoells M. Estimation of Children's CO₂ Generation Rates in Naturally Ventilated Educational Buildings. In: *Building and Environment*, 2024, no. 257, pp. 111550. DOI 10.1016/j.buildenv.2024.111550. URL: <https://clck.ru/3Rj9KA> (Accessed 01/16/2026). (In Engl.)

9. Нормирование диоксида углерода в воздушной среде жилых и общественных зданий / Ю.Д. Губернский, Н.В. Калинина, Е.Б. Гапонова, И.М. Банин. EDN RAWDWP // *Методы оценки соответствия*. 2013. № 7. С. 35–38.

Gubernskii Yu.D., Kalinina N.V., Gaponova E.B., Banin I.M. Standardization of Carbon Dioxide in the Air of Residential and Public Buildings. In: *Conformity Assessment Methods*, 2013, no. 7, pp. 35–38. EDN RAWDWP. (In Russ.)

10. Углекислый газ: проблемы нормирования, контроля и профилактики неблагоприятного воздействия в образовательных организациях / И.И. Новикова, А.В. Сорокина, М.А. Лобкис [и др.]. DOI 10.24075/rbh.2023.081. EDN RAIJEY // *Российский вестник гигиены*. 2023. № 4. С. 18–28.

Novikova I.I., Sorokina A.V., Lobkis M.A. [et al.] Carbon Dioxide: Problems of Standard Setting, Content Control and Prevention of Adverse Effects in Educational Institutions. In: *Russian Bulletin of Hygiene*, 2023, no. 4, pp. 18–28. DOI 10.24075/rbh.2023.081. EDN RAIJEY. (In Russ., abstr. in Engl.)

11. Гурина, И.В. Кто ответит за духоту в помещении / И.В. Гурина // *Химия и жизнь XXI век*. 2010. №2. С. 22–25.

Gurina I.V. Who will be responsible for the stuffiness in the room. *Chemistry and Life of the 21st Century*, 2010, no. 2, pp. 22–25. (In Russ.)

12. Мансуров, Р.Ш. Влияние концентрации углекислого газа на организм человека / Мансуров Р.Ш., Гурина М.А., Рубель Е.В. EDN YLRTZR // *Строительство: новые технологии – новое оборудование*. 2018. № 3. С. 56–59. URL: <https://clck.ru/3RjCvK> (дата обращения 16.01.2026).

Mansurov R. Sh., Gurin M.A., Rubel' E.V. The Effect of Carbon Dioxide Concentration on the Human Body. In: *Construction: New Technologies – New Equipment*, 2018, no. 3, pp. 56–59. EDN YLRTZR. (Accessed 01/16/2026). (In Russ.)

13. Statistical and Probabilistic Analysis of the Impact of Heat Gains from People on the Cooling Load / D.V. Nemova, R.A. Gorshkov, A.Yu. Lezer [и др.]. DOI 10.4123/CUBS.113.5. EDN DVVUGK // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024. № 4 (113). P. 11305. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2024/4\(113\)/11305.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2024/4(113)/11305.pdf) (дата обращения 16.01.2026).

Nemova D.V., Gorshkov R.A., Lezer A.Yu. [et al.] Statistical and Probabilistic Analysis of the Impact of Heat Gains from People on the Cooling Load. In: *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2024, no. 4 (113), p. 11305. DOI 10.4123/CUBS.113.5. EDN DVVUGK. (Accessed 01/16/2026). (In Russ., abstr. & title in Engl.)

14. Губина, И.А. Энергосбережение в зданиях при утилизации тепла вытяжного воздуха / И.А. Губина, А.С. Горшков. EDN UISIEV // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 4 (31). С. 209–219. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/4\(31\)/15_gubina_31.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/4(31)/15_gubina_31.pdf) (дата обращения 16.01.2026).

Gubina I.A., Gorshkov A.S. Energy Saving in Buildings with Exhaust Air Heat Recovery. In: *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2015, no. 4 (31), pp. 209–219. EDN UISIEV. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/4\(31\)/15_gubina_31.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/4(31)/15_gubina_31.pdf) (Accessed 01/16/2026). (In Russ., title in Engl.)

15. Горшков, А.С. Инженерные системы : Руководство по проектированию, строительству и реконструкции зданий с низким потреблением энергии / А.С. Горшков. EDN SWXTYD. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013. 160 с.

Gorshkov A.S. Engineering Systems: Guide to the Design, Construction, and Reconstruction of Low-Energy Buildings. St-Peterburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2013, 160 p. EDN SWXTYD. (In Russ.)

16. Региональная концепция обеспечения энергетической эффективности жилых и общественных зданий / В.К. Аверьянов, С.А. Байкова, А.С. Горшков [и др.]. EDN PACREL. Жилищное строительство. 2012. № 3. С. 2–4.

Aver'yanov V.K., Baikova S.A., Gorshkov A.S. [et al.] Regional Concept of Ensuring Energy Efficiency of Residential and Public Buildings. In: *Housing Construction*, 2012, no. 3, pp. 2–4. EDN PACREL. (In Russ.)

17. Горшков, А.С. Принципы энергосбережения в зданиях / А.С. Горшков. EDN TAPWSP // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2014. № 7 (186). С. 26–35.

Gorshkov A.S. The Principles of Buildings Energy Saving. In: *Building Materials. Equipment, Technologies of the XXI Century*, 2014, no. 7 (186), pp. 26–35. EDN TAPWSP. (In Russ., abstr. in Engl.)

18. Аверьянов, В.К. Повышение эффективности централизованного теплоснабжения существующего жилого фонда / В.К. Аверьянов, А.С. Горшков, Г.П. Васильев. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-99-111. EDN IZKVOW // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 6 (71). С. 99–111.

Aver'yanov V. K., Gorshkov A.S., Vasil'ev G.P. Increasing the Efficiency of Centralized Heat Supply of the Existing Housing Stock. In: *Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 6 (71), pp. 99–111. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-99-111. EDN IZKVOW. (In Russ., abstr. in Engl.)

19. Пути повышения эффективности применения адаптивных систем вентиляции в общественных и жилых зданиях / Е.А. Наумова, С.Ф. Серов, В.В. Ефремов, Д.В. Капко. EDN WAIEKP // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 6. С. 40–45.

Naumova E.A., Serov S.F., Efremov V.V., Kapko D.V. Ways to Improve the Effectiveness of Adaptive Ventilation Systems in Public and Residential Buildings. In: *Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 6, pp. 40–45. EDN WAIEKP. (In Russ., abstr. in Engl.)

20. Штукатурные покрытия как регулятор параметров микроклимата в помещении: обзор теоретических и экспериментальных исследований / В.В. Строкова, М.Н. Сивальнева, С.В. Неровная, Б.Б. Второв. DOI 10.31659/0585-430X-2021-793-7-32-72. EDN SYFFUJ // *Строительные материалы*. 2021. № 7. С. 32–72.

Stroкова V.V., Sival'neva M.N., Nerovnaya S.V., Vtorov B.B. Plaster Coverings As a Regulator of Indoor Microclimate Parameters: an Overview of Theoretical and experimental research. In: *Construction Materials*, 2021, no. 7, pp. 32–72. DOI 10.31659/0585-430X-2021-793-7-32-72. EDN SYFFUJ. (In Russ., abstr. in Engl.)