

УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ: ПРОБЛЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ, КОНТРОЛЯ И ПРОФИЛАКТИКИ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

И. И. Новикова¹, А. В. Сорокина¹, М. А. Лобкис¹✉, Н. А. Зубцовская¹, М. В. Семенихина¹, В. А. Щевелева¹, Н. И. Назимкин²

¹ Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Роспотребнадзора, Новосибирск, Россия

² Центр гигиены и эпидемиологии в Новосибирской области, Новосибирск, Россия

В статье представлен обзор литературных данных по российским и зарубежным исследованиям, отражающих современные проблемы, касающиеся содержания углекислого газа в помещениях жилых и общественных зданий, в том числе детских образовательных организаций. Рассмотрены механизмы влияния высоких концентраций двуокиси углерода на организм человека, проявляющиеся острыми и отсроченными негативными эффектами в виде нарушения обменных процессов кровеносной, центральной и дыхательной систем, существующие методы оценки содержания двуокиси углерода в воздухе помещений, а также принципы нормирования и контроля оптимальных параметров микроклимата и качества воздуха в помещениях, предназначенных для временного и постоянного пребывания людей. По результатам аналитического обзора установлена необходимость нормирования, а также разработки и утверждения методики оценки фактических показателей концентрации углекислого газа в детских образовательных организациях в силу неэффективности или невозможности обеспечения достаточного объема режимных мероприятий до нормализации и стабилизации всех качественных и количественных показателей воздушной среды, обеспечивающих оптимальные и безопасные условия воспитания и обучения при высокой ежечасной наполняемости учебных кабинетов.

Ключевые слова: углекислый газ, диоксид углерода, образовательные организации, влияние на здоровье, высокие концентрации, проблемы нормирования, профилактика

Вклад авторов: И. И. Новикова — концепция, дизайн, редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи; М. В. Семенихина, Н. А. Зубцовская, В. А. Щевелева, Н. И. Назимкин — поиск и обзор публикаций, фрагментарная аналитика; А. В. Сорокина, М. А. Лобкис — поиск и обзор публикаций, написание и редактирование текста статьи.

✉ **Для корреспонденции:** Мария Александровна Лобкис
ул. Пархоменко, д. 7, г. Новосибирск, 630108, Россия; lobkis_ma@niig.su

Статья получена: 05.09.2023 **Статья принята к печати:** 26.09.2023 **Опубликована онлайн:** 02.12.2023

DOI: 10.24075/rbh.2023.081

CARBON DIOXIDE: PROBLEMS OF STANDARD SETTING, CONTENT CONTROL AND PREVENTION OF ADVERSE EFFECTS IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Novikova II¹, Sorokina AV¹, Lobkis MA¹✉, Zubtsovskaya NA¹, Semenikhina MV¹, Shcheveleva VA¹, Nazimkin NI²

¹ Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor, Novosibirsk, Russia

² Center of Hygiene and Epidemiology in the Novosibirsk Region, Novosibirsk, Russia

This article is a review of data published in Russian and foreign studies that reflect current problems concerning content of carbon dioxide in spaces of residential and public buildings, including children's educational organizations. We consider: mechanisms of action of high concentrations of carbon dioxide on the human body, which manifests as acute and delayed disruptions of metabolic processes in circulatory, central and respiratory systems; existing carbon dioxide content measurement methods used for indoor spaces; principles of setting microclimate and air quality standards for temporarily and constantly occupied indoor spaces and the respective parameter control principles. This analytical review revealed the need for standard-setting efforts, development and approval of a methodology enabling measurement of the actual carbon dioxide concentration in children's educational institutions, since routine measures adopted for the purpose lack in effectiveness or realization, which prevents normalization and stabilization of all qualitative and quantitative air parameters at the levels making the environment of a classroom safe and optimal for education-related activities given high occupancy of the space.

Keywords: carbon dioxide, educational organizations, health effects, high concentrations, standard setting problems, prevention

Author contribution: Novikova II — study conceptualization, design, text editing, approval of the final version of the article; Semenikhina MV, Zubtsovskaya NA, Shcheveleva VA, Nazimkin NI — search for and review of publications, fragmentary analytics; Sorokina AV, Lobkis MA — search for and review of publications, article authoring and editing.

✉ **Correspondence should be addressed:** Maria A. Lobkis
Parkhomenko, 7, Novosibirsk, 630108, Russia; lobkis_ma@niig.su

Received: 05.09.2023 **Accepted:** 26.09.2023 **Published online:** 02.12.2023

DOI: 10.24075/rbh.2023.081

Углекислый газ (CO₂) — продукт метаболизма, необходимый для жизнеобеспечения организма, который при избыточном содержании в воздухе оказывает неблагоприятное воздействие на организм, а в высоких концентрациях может быть токсичным. Его фактическое содержание в закрытых помещениях является важным гигиеническим показателем качества воздуха, который требует всестороннего изучения с целью разработки профилактических мероприятий по минимизации риска здоровью. Наибольшее внимание уделяют воздействию CO₂ как основного компонента загрязнения воздуха жилых и общественных помещений, концентрация

которого наиболее часто становится причиной нарушения благоприятного состояния человека, возникновения острых и отсроченных неблагоприятных эффектов. Это особенно актуально для детских образовательных организаций, так как именно там одновременно длительное время находится большое количество детей и подростков, организм которых наиболее чувствителен к неблагоприятным воздействиям среды. При этом концентрация CO₂ до сих пор является ненормируемым показателем, учитывая, что строго регламентированные нормативы по содержанию двуокиси углерода в жилых и общественных помещениях в России отсутствуют. Однако

вопрос необходимости нормирования концентрации CO_2 в образовательных организациях, а также разработка методики оценки фактического содержания CO_2 в помещениях, предназначенных для воспитания и обучения детей, требуют пристального внимания в плане профилактики неблагоприятного влияния на организм обучающихся.

Целью работы было изучить публикации российских и зарубежных исследователей, посвященные проблемам воздействия диоксида углерода на организм, принципам его нормирования, целесообразности мониторинга воздушной среды помещений, мероприятиям по приведению параметров воздушной среды помещений к гигиеническим требованиям.

Поиск научных публикаций, посвященных проблемам содержания CO_2 в жилых и общественных помещениях, принципам нормирования CO_2 , влиянию на здоровье и методам профилактики, осуществляли с использованием ресурсов различных электронных поисковых платформ (электронных библиотек E-library, PubMed, Cyberleninka). Проанализированы более 100 работ зарубежных и отечественных авторов, в основном опубликованные с 2004 по 2023 г., и нормативные материалы. В работе использовали аналитический метод исследования.

CO_2 , долгое время считавшийся конечным продуктом метаболизма, негативно влияющим на организм, со второй половины XIX в. считают необходимым для жизнедеятельности организма продуктом обмена [1, 2]. Оптимальный состав воздуха, которым дышит человек, содержит 21,5% кислорода и 0,03–0,04% CO_2 , остальное приходится на самый распространенный на Земле элемент — азот. Именно такой состав обеспечивает нормальный метаболизм [3, 4]. Авторы монографии [2] приводят результаты исследования [5], согласно которым компонентами единой физико-химической регуляции биологических процессов являются как молекулы газов (CO_2 , активные формы кислорода (АФК) и оксид азота), так и их производные радикальной и нерадикальной природы, которые моделируют все нейроэндокринные и метаболические процессы в организме. При этом диоксид углерода, в отличие от оксида азота (NO) и АФК, не оказывает патологического и цитотоксического действия. Основываясь на экспериментальных данных, авторы выдвинули гипотезу о защитной роли диоксида углерода, который является ингибитором АФК, регулируя при этом свободнорадикальный гомеостаз в организме.

О необходимости CO_2 для организма свидетельствуют исследования последних десятилетий. О содержании CO_2 в организме судят по показателю парциального давления в крови (pCO_2), которое оказывает влияние на кору головного мозга, дыхательный и сосудодвигательный центры. Регулируя при этом тонус сосудов, бронхов, обмен веществ, секрецию гормонов и электролитный состав крови, CO_2 опосредованно влияет на ферментативную активность и скорость биохимических реакций в организме. Известно, что снижение концентрации кислорода до 15,0% или увеличение до 80% не оказывает существенного влияния на организм, в то время как изменение концентрации CO_2 на 0,1% вызывает существенные негативные изменения, что свидетельствует о большей значимости CO_2 для организма [3].

Однако поступление избыточного количества CO_2 ингаляционным путем вызывает патологические изменения [6]. Согласно международной системе классификации, CO_2 относится к удушающим газам IV класса опасности, наряду с аммиаком. Проблема увеличения концентрации

CO_2 в атмосферном воздухе появилась с наступлением промышленной революции, результатом которой стало антропогенное увеличение выбросов диоксида азота и нарушения геохимического цикла углерода в воздухе, что, несомненно, является одним из важнейших факторов влияния на жизнь и здоровье людей, при этом вопросы регулирования уровня диоксида углерода не решены и ситуация постепенно ухудшается [7]. CO_2 относится к парниковым газам, сокращение поступления которых в атмосферу, является приоритетным направлением экологической политики страны, подписавшей Киотское соглашение. Поступая в организм человека, этот газ влияет на состояние сердечно-сосудистой и дыхательной систем, в высоких концентрациях вызывая сонливость, тошноту, слабость, потерю сознания. По этой причине важно выяснить тенденции изменений поступления газа в атмосферу в результате функционирования промышленных предприятий, в структуре выбросов, которых во многих районах преобладает CO_2 [8]. При изучении влияния парникового CO_2 получены данные, свидетельствующие о воздействии на генетическую активность человека, а следовательно, и его здоровье. Исследования показали, что такое воздействие имеет место благодаря «парниковому эффекту» и может осуществляться через мембраны определенных клеток кожи [9].

Концентрация CO_2 в артериальной крови является важным показателем состояния кровоснабжения тканей организма, а значит, управление ею может способствовать управлению адаптационным потенциалом человека [10], которое, в свою очередь, будет способствовать улучшению функционирования организма [11]. В организме CO_2 присутствует в составе химических соединений (угльной кислоты, карбонатов, бикарбонатов) и в связанном с гемоглобином состоянии (карбогемоглобин). Содержание CO_2 в крови зависит от его парциального давления, отражающего баланс между количеством образующейся углекислоты и количеством выделяемого легкими CO_2 . Нормальным уровнем (нормокапния) CO_2 в крови считают pCO_2 40 мм рт. ст. в артериальной крови и 47 мм рт. ст. — в венозной крови. При повышении pCO_2 формируется состояние гиперкапнии (газовый ацидоз), при избыточном выделении CO_2 и понижении pCO_2 в артериальной крови — состояние гипокапнии (газовый алкалоз) [12]. При этом именно повышенное содержание CO_2 в атмосферном воздухе (более 7,6 мм рт. ст.) способно нарушить физиологические пороговые значения содержания CO_2 в альвеолах легких (более 40 мм рт. ст.) и артериальной крови (более 46–49 мм рт. ст.), делая необходимым для дыхания газ токсичным для организма [13].

К клиническим признакам токсического воздействия CO_2 в состоянии гиперкапнии относятся одышка в покое, тошнота, рвота, головная боль, головокружение, синюшность слизистых оболочек и кожи лица, сильное потоотделение, нарушение зрения [2]. При повышении концентрации CO_2 не более чем на 2% основные нарушения происходят со стороны сердечно-сосудистой (вначале тахикардия, затем брадикардия) и центральной нервной систем с повышением и последующим снижением возбудимости нервных окончаний. Увеличение концентрации CO_2 до 5–6% сопровождается угнетением электрической активности головного мозга [14]. При превышении нормальной концентрации CO_2 до 10–12% наступают быстрая потеря сознания и смерть [15].

К вентилируемым помещениям, в которых индикатором содержания вредных веществ является CO_2 , относятся

офисы, помещения общественного питания, банкетные и зрительные залы, медицинские учреждения, аудитории и классы образовательных организаций, помещения дошкольных образовательных организаций, транспорт и др. Установлено, что наилучшим уровнем CO_2 в этих помещениях является уровень, близкий к его содержанию в атмосферном воздухе [16]. Для помещений непромышленного назначения этот показатель до недавнего времени считался единственным критерием качества, так как было принято считать, что существует прямая корреляционная связь между содержанием CO_2 в помещении с находящимися в нем людьми и уровнем химического и бактериального загрязнения [17, 18].

Использование CO_2 как важнейшего показателя качества воздушной среды, подтверждается многочисленными исследованиями, указывающими на то, что даже при наличии в воздухе помещений многочисленных загрязнителей основным загрязнителем помещений является CO_2 [19–25]. В помещениях, где в течение длительного времени пребывает большое число людей, концентрация диоксида углерода быстро нарастает, а при неэффективности либо невозможности проветривания создаются условия, способствующие нарушению самочувствия и здоровья. При этом установлено, что воздушная среда ухудшается пропорционально числу лиц и времени их пребывания в закрытом помещении [26].

Вопрос изучения гигиенической оценки содержания CO_2 и его влияния на здоровье в последние годы стал актуальным как в России, так и за рубежом, где интерес к нему также был связан с ростом числа так называемых «больных зданий» (СБЗ; Sick Building Syndrome) [27].

Концентрацию CO_2 измеряют в ppm (от англ. *parts per million* или лат. *pro pro mille*), то есть «частях на миллион». По сути это кубический сантиметр углекислого газа на кубический метр воздуха ($\text{см}^3/\text{м}^3$). Однако в ряде отечественных и зарубежных исследований, а также в нормативной документации уровень содержания CO_2 обозначают в $\text{мг}/\text{м}^3$ или процентах. Соразмерность указанных единиц измерения следует уточнить на примере нормальной условной концентрации CO_2 в атмосферном воздухе. Например, условно 400 ppm (или 400 млн⁻¹) означают, что в 1 м^3 воздуха содержится 400 см^3 CO_2 или 0,04% (так как 1 ppm = 0,0001%). При этом для перерасчета из $\text{мг}/\text{м}^3$ применяют более сложную формулу, подразумевающую учет молекулярной массы газа, общего давления и температуры газовой смеси. Условно содержание CO_2 в 1 $\text{мг}/\text{м}^3$ приблизительно стремится к 0,510725 $\text{см}^3/\text{м}^3$.

Российские исследования показали, что ухудшение самочувствия начинается при 1000 ppm: возникают ощущение духоты, общий дискомфорт, слабость, головная боль, снижение концентрации внимания. Помимо этого увеличиваются частота и глубина дыхания, происходит сужение бронхов, а при концентрации выше 15% возникает спазм голосовой щели. При длительном нахождении в помещении с избыточным количеством CO_2 происходят изменения в кровеносной, центральной нервной, дыхательной системах, при умственной деятельности нарушаются восприятие, оперативная память, распределение внимания [3, 20, 22].

Содержание CO_2 в воздухе спален влияет на сон, при этом есть мнение, что для хорошего сна важнее качество воздуха, нежели его количественные показатели [28]. Исследования показывают, что при увеличении содержания CO_2 в воздухе помещений растет число жалоб на быстрое

утомление, что проявляется сложностью концентрации внимания, появлением сонливости, головной боли [29, 30]. Ключевой особенностью влияния на организм человека CO_2 является потеря возможности крови поглощать кислород. Степень отравления этим веществом зависит от времени воздействия на организм и концентрации вещества в атмосферном воздухе [31].

По данным научной работы отечественной ученой концентрация CO_2 в помещении не должна превышать 1000 ppm независимо от источника образования CO_2 (например, ночью CO_2 выделяют растения). Используя специальную методику исследования, автор пришла к выводу о том, что кратковременное вдыхание здоровыми людьми CO_2 в концентрации 500 и 1000 ppm вызывает определенные сдвиги функции внешнего дыхания, кровообращения и электрической активности головного мозга [32]. Исследования показали, что содержание CO_2 в воздухе помещений на уровне 1000 ppm (0,1%) можно рассматривать как критерий безопасного качества воздушной среды жилых и общественных зданий [20]. Такая концентрация соответствует рекомендованным значениям содержания CO_2 в воздухе помещений, действующим в большинстве зарубежных стран.

Проведенные исследования показали, что концентрация CO_2 в 2–2,5% не вызывает заметных отклонений в самочувствии человека, его трудоспособности [33]. При увеличении концентрации CO_2 в атмосферном воздухе до 4–5% наблюдаются одышка, усиление сердечной деятельности, имеет место прямая корреляция повышенной концентрации содержания CO_2 со снижением трудоспособности человека. При повышении концентрации CO_2 до 6% заметно снижается умственная деятельность, возникают головная боль, состояние утомления. Рост концентрации CO_2 до 7% выражается в физической неспособности контролировать свои действия, потере сознания, в отдельных случаях наступает смерть. Высокое процентное содержание CO_2 в атмосферном воздухе в 10% вызывает быструю, а более 15% — мгновенную смерть из-за паралича дыхания.

В основе механизма развития нарушений лежит увеличение парциального давления CO_2 в человеческих альвеолах. Его растворимость в крови повышается, и образуется слабая угольная кислота ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$), распадающаяся, в свою очередь, на H^+ и HCO_3^- . Первый признак ацидоза — плохое восприятие новой информации. Чем выше концентрация CO_2 в воздухе, которым постоянно дышит человек, тем ниже pH крови и тем более кислую реакцию она имеет. Люди, проводящие много времени в помещении с высоким уровнем CO_2 , в 3,5 раза чаще имеют сухой кашель и в два раза больше болеют ринитом [33]. Это согласуется с более ранними исследованиями зарубежных ученых, установивших, что при уровне CO_2 в помещении выше 500 ppm может происходить снижение pH крови [34], а длительное воздействие уровня CO_2 0,5–1% может привести к повышенному отложению кальция в тканях организма, в том числе почек [35].

Исследования, проведенные белорусскими учеными, свидетельствуют о корреляции снижения работоспособности с повышением процентного содержания CO_2 в атмосферном воздухе. При приближении этого показателя к 1% увеличивается время двигательной реакции, уменьшается точность реакции слежения; при 1,5–2% начинает качественно меняться умственная деятельность человека, нарушаются функции дифференцировки, восприятия, оперативной памяти и распределения внимания. При

длительной работе в атмосфере, содержащей 3% CO₂, возникают выраженные расстройства мышления, памяти, тонкой двигательной координации, резко возрастает число опусок и ошибок деятельности, возникают расстройства слуха и зрения [14].

Однако, изучая вопрос влияния условно допустимых концентраций CO₂ в воздухе атмосферы, отмечаются достаточно интересные данные. Так, согласно данным зарубежных исследований, при концентрации CO₂ выше 600–800 ppm наблюдается снижение внимания на 30%; при концентрациях более 1500 ppm у 79% испытуемых отмечают чувство усталости; у 97%, страдающих мигренью, жалобы на головную боль появляются при уровне CO₂ в воздухе от 1000 ppm и выше [36]. Длительное нахождение в помещениях с повышенным содержанием CO₂ в воздухе можно рассматривать как фактор риска развития синдрома хронической усталости, учащения случаев заболеваний верхних дыхательных путей [20, 37]. По данным финских ученых, полученным в результате эксперимента, проведенного в офисном помещении, такие симптомы, как воспаление глаз, заложенность носа, воспаление носоглотки, проблемы, связанные с дыхательной системой, головная боль, усталость и сложность с концентрацией внимания, которые возникали у сотрудников при высокой концентрации CO₂, значительно снижались, если уровень CO₂ в офисном помещении был ниже 800 ppm (0,08% об.) [38].

Воздействие 2000 или 4000 ppm CO₂ индуцировало воспалительные реакции в нейтрофилах *ex vivo* (человека и мыши) и *in vivo* (мыши), вызывали повреждение сосудов в тканях мышц, мозга и дистального отдела толстой кишки, которое сохранялось в течение 13 ч после двухчасового воздействия. Воздействие 1000 ppm вызывало воспалительные реакции *ex vivo*, но не *in vivo*. Кроме того, у мышей, подвергшихся воздействию CO₂ в концентрации 5000 ppm, возможно усиление воспаления в бронхиальном эпителии [39], а воздействие 3000 ppm может вызвать легкое воспаление носовой полости у человека [40]. Рандомизированное двойное слепое контролируемое экспериментальное исследование показало, что при воздействии 550, 945 и 1400 ppm CO₂ в течение обычного восьмичасового рабочего дня на протяжении недели в офисной среде когнитивные показатели были ниже на 15% при 945 ppm, на 50% при 1400 ppm по сравнению с 550 ppm CO₂. В среднем показатели участников снижались на 21% при увеличении на 400 ppm [41].

В последнее время возрос интерес к безопасности пребывания в помещениях образовательных организаций, связанный с рисками негативного влияния факторов, формирующихся в результате длительного пребывания большого числа обучающихся в образовательном пространстве. Актуальность проблемы обусловлена более высоким долевым вкладом в индекс опасности веществ, поступающих из окружающего воздуха помещений, по сравнению с атмосферным воздухом. Это указывает на необходимость усиления контрольно-надзорных мероприятий, касающихся источников поступления химических токсикантов, соблюдения режима проветривания и нормативов наполняемости помещений [42].

В учебных заведениях оптимальным уровнем концентрации CO₂ в помещении принимают диапазон 800–1000 ppm. Отметка на уровне 1400 ppm — предел допустимого содержания CO₂ в помещении. Если его больше, то качество воздуха считается низким, ведь чем больше CO₂ в воздухе, тем сложнее сосредоточиться

и справиться с учебной нагрузкой. Однако уже 1000 ppm не признает вариантом нормы целый ряд исследований, посвященных зависимости состояния организма от уровня CO₂. Их данные свидетельствуют о том, что на отметке 1000 ppm больше половины испытуемых ощущают последствия ухудшения микроклимата: учащение пульса, головную боль, усталость и, конечно, пресловутое «нечем дышать» [14].

В другом исследовании спрогнозировано формирование концентрации CO₂ в учебных помещениях в зависимости от числа находящихся в помещении обучающихся, объема помещения и его вентилирования. Установлено, что к концу занятий значение концентрации CO₂ в помещениях соответствует недопустимому уровню и достигает 2500 ppm. При этом в больших по объему помещениях (до 200 м³, на 25–30 человек) на фоне роста концентрации CO₂ происходит увеличение температуры воздуха до 27 °С и изменение до 30,0–40,0% влажности воздуха [43].

Помимо этого, один из экспериментов в образовательной организации показал, что больше половины учебного времени количество CO₂ в воздухе превышает 1300 ppm, а иногда приближается к 2500 ppm. В таких условиях невозможно сосредоточиться, способность к восприятию информации критически снижается. Другие вероятные симптомы избытка CO₂ — это гипервентиляция, потливость, воспаление глаз, заложенность носа, затрудненное дыхание [44].

Изучены показатели концентрации CO₂ в стандартных и нестандартных спортивных залах при разных гигиенических условиях их эксплуатации. Представлен анализ изменения общего самочувствия студентов до, во время и после физической нагрузки в помещениях с нормальной и повышенной концентрацией CO₂. В результате было установлено, что повышение концентрации CO₂ пагубно сказывается на возможностях студентов, их концентрации внимания, координационных способностях и общем самочувствии. Прослеживается четкая взаимосвязь концентрации CO₂ самочувствия, работоспособности и результативности студентов во время физической нагрузки [45]. На превышение содержания диоксида углерода в спортивных залах к концу занятий в 1,5–3 раза указывают исследования [46], что свидетельствует о неудовлетворительной работе вентиляционной системы.

Имеющиеся исследования демонстрируют важность регламентации содержания CO₂ и задач по оценке и контролю за состоянием воздушной среды помещений. В особенности это касается организаций для воспитания и обучения, где дети находятся длительное время, подвергаясь негативному воздействию различных химических веществ, содержащихся в воздухе образовательных помещений, ведущее значение среди которых придают CO₂. На территории Российской Федерации общие требования к оптимальным и допустимым показателям микроклимата обслуживаемой зоны помещений жилых, детских дошкольных учреждений, общественных, административных и бытовых зданий регламентирует Межгосударственный стандарт [47], который также уделяет внимание качеству воздуха в помещениях, зависящему от процентного содержания CO₂. В соответствии с данным документом для детских учреждений, больниц и поликлиник следует принимать показатели качества воздуха 1-го класса, а для жилых и общественных зданий оптимальные показатели воздуха допустимо принимать по заданию на проектирование с учетом загрязнения наружного воздуха, источника загрязнения воздуха в помещении.

Помимо Межгосударственного стандарта качество воздуха жилых и общественных зданий обеспечивают согласно действующему Национальному стандарту [48], в основу которого положен Европейский стандарт по качеству воздуха в помещениях с пребыванием людей 2004 г. [49]. Согласно Национальному стандарту [48], качество воздуха складывается из необходимого уровня вентиляции (величиной воздухообмена в помещениях), которое обеспечивает допустимое значение содержания CO_2 в помещении. В Европейском стандарте [49] сказано, что воздух высокого качества в помещении должен отличаться от наружного воздуха населенного пункта всего на 350 ppm CO_2 , но содержание CO_2 не должно превышать 1000 ppm. Поскольку в России никто не замеряет уровень CO_2 , ориентиры для правильного расчета необходимого уровня подачи воздуха в помещении вентиляционными системами отсутствуют.

Гигиеническое нормирование микроклимата в организациях воспитания и обучения предусматривает строгое нормирование только трех количественных показателей: температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, которые строго регламентируются Санитарными правилами 2020 г. [50] и Санитарными правилами и нормативами 2021 г. [51]. Про качество воздушной среды помещений организаций воспитания и обучения в санитарных правилах сказано, что «в воздухе не допускается превышение предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, определенных требованиями гигиенических нормативов» [50]. Учитывая действующий список загрязняющих веществ атмосферного воздуха, установленный гигиеническими нормативами [51], CO_2 не относится к загрязняющим веществам атмосферы. Однако в то же время концентрация CO_2 в воздухе рабочей зоны нормирована. Газообразное химическое вещество «углерода диоксид» входит в список загрязняющих веществ (№ 2124), а в международной системе классификации опасности газов CO_2 относят к удушью газам IV класса опасности, наряду с аммиаком [51]. При этом максимальная разовая предельно допустимая концентрация (ПДК) CO_2 в воздухе рабочей зоны составляет 27 000 мг/м³ (13 790 ppm или см³/м³), а среднесменная ПДК CO_2 равна 9000 мг/м³ (4597 ppm или см³/м³) [51]. Для сравнения, согласно Стандартам безопасности и гигиены труда США [52], «...токсичные и опасные вещества, предельные значения загрязнителей воздуха: двуокись углерода PEL (допустимый, базовый предел экспозиции в среднем за смену) — 5000 ppm средневзвешенное значение за 8 часов (TWA), STEL (предел кратковременной экспозиции) — 30 000 ppm...». В перерасчете на более привычные для нас значения в мг/м³ эти цифры составляют 30 000 ppm (58 740 мг/м³) (это максимальная разовая концентрация, которая вдвое превышает нормативы РФ) и 5000 ppm (9790 мг/м³) (среднесменная концентрация, которая почти равнозначна нашей среднесменной концентрации CO_2).

В России такие концентрации впервые были установлены Гигиеническими нормативами в 2006 г. [53]. Первым научным обоснованием ПДК CO_2 в СССР послужила научная работа [54], по обоснованию ПДК CO_2 в воздухе жилых и общественных зданий в концентрациях 1000 ppm (0,1%) и 5000 ppm (0,5%) на организм человека.

Однако во всем мире важной остается проблема обеспечения высокого качества окружающей среды в школьных зданиях, что связано с отсутствием юридически обязательных предельных значений для

большинства загрязнителей воздуха помещений [55]. В Финляндии максимально допустимая концентрация CO_2 в используемом помещении при нормальных погодных условиях составляет 1200 ppm. В норвежских и шведских нормах для жилых помещений, школ и офисов установлена максимальная концентрация CO_2 1000 ppm. Япония, Португалия, Корея, Франция, Дания также установили 1000 ppm в качестве стандарта для конкретных помещений, включая школы и офисные здания. Стандарты и руководящие принципы по содержанию CO_2 в жилых, школьных и офисных зданиях были обобщены в единый документ в рамках оценки содержания CO_2 в воздухе помещений Национальным агентством по охране окружающей среды и труда (ANSES) [56, 57]. В Германии применяют значение концентрации CO_2 в 0,15% или 1500 ppm, что является гигиенической ориентировочной величиной. Ориентировочные значения концентрации CO_2 в помещениях также были опубликованы Комиссией по гигиене воздуха в помещении Федерального министерства окружающей среды и Государственным органом по здравоохранению [58].

Различные методы и показания для проектирования и оценки качества воздуха в помещении и теплового комфорта в школьных зданиях предусмотрены такими стандартами, как Европейский стандарт [59], Британский строительный бюллетень [60] и Стандарт американского общества инженеров [61]. Европейский стандарт предоставляет входные параметры внутренней среды для проектирования и оценки энергоэффективности зданий с учетом различных аспектов качества среды внутри помещений (IEQ). Расчетные концентрации CO_2 в этом документе представлены в четырех категориях, сформированных по уровню ожидаемого процента недовольных качеством воздуха (чем ниже категория, тем меньше ожидаемый процент недовольных; минимальный показатель — 15%, максимальный — 40%). Таким образом, верхний порог для 1-й категории — 550 ppm, для 2-й категории — 800 ppm, для 4-й категории — 1350 ppm. При этом нормальным уровнем будет 2-я категория. Для школьников с особыми потребностями может быть выбран более низкий уровень. Более высокий уровень не представляет опасности для здоровья, но может снизить комфорт.

Британский строительный бюллетень [60] устанавливает правила, стандарты и рекомендации по вентиляции, тепловому комфорту и внутреннему качеству воздуха для школьных зданий. Что касается учебных помещений, он устанавливает разные требования к качеству воздуха в помещении для разных стратегий вентиляции. Для механических систем и гибридных систем при использовании в механическом режиме должно быть обеспечено достаточное количество наружного воздуха для достижения среднесуточной концентрации CO_2 менее 1000 ppm в течение рабочего периода. Кроме того, максимальная концентрация также не должна превышать 1500 ppm более 20 мин подряд каждый день в течение рабочего периода. Для помещений с естественной вентиляцией и смешанной системы, в которой используется естественная вентиляция, среднесуточная концентрация CO_2 не должна превышать 1500 ppm в период пребывания людей, а максимальная концентрация также не должна превышать 2000 ppm на протяжении более 20 мин подряд каждый день.

Стандарт американского общества инженеров [61] не содержит предельного значения содержания CO_2

в помещении с момента издания стандарта в 1989 г., где намеренно убрали ранее использовавшийся порог (1000 ppm), чтобы избежать переоценки значимости этого предела как показателя приемлемого IAQ в целом, в то время как эта концентрация в лучшем случае является показателем скорости вентиляции наружного воздуха на человека. Сравнение Стандарта американского общества инженеров [61] с Европейским стандартом [59] показывает, что текущая минимальная скорость вентиляции Американского стандарта для классных комнат составляет половину порогового значения Европейского стандарта (5 вместо 10 л/с на человека). С другой стороны, старое и больше не используемое значение 1000 ppm будет приблизительно эквивалентно пределу 1-й категории Европейского стандарта (950 ppm при концентрации на открытом воздухе 400 ppm).

Сравнительная оценка оценки качества воздуха в школьных помещениях в Южном Тироле (Италия) с использованием разных стандартов показала сопоставимые, но не идентичные результаты. В ходе исследования выявлено, что в тех случаях, когда классы не проветривают в течение всего урока, уровни CO₂ могут превышать 2000 ppm или даже 3000 ppm. Через 13–18 мин без вентиляции достигается пороговое значение CO₂ в 1000 ppm, тогда как порог в 1500 ppm может быть превышен через 23–35 мин во всех школах, если отсутствует вентиляция. Концентрации CO₂, измеренные в классах, большую часть времени были ниже 1000 ppm. Превышение порога CO₂ в 2000 ppm наблюдалось редко (0–2%), что указывает на то, что классы проветривали по крайней мере один раз за урок [62].

В настоящее время в России существует несколько методов определения уровня CO₂ в воздухе. Предложенный в позапрошлом веке врачом-гигиенистом М. Петтенкофером метод является косвенным интегральным санитарным показателем чистоты воздуха, который указан в Национальном стандарте Российской Федерации [63]. Значение уже несколько десятилетий используют в качестве критерия удовлетворительного качества воздуха в замкнутом помещении, а также при проектировании систем кондиционирования и вентиляции воздуха в действующей редакции Европейского [64] и Национального стандартов [65], устанавливающих технические требования к системам вентиляции и кондиционирования.

При определении уровня CO₂ в воздухе используют объемные методы — содержание CO₂ определяют при помощи газоанализаторов Холдена, Кудрявцева, Калмыкова; титрометрические методы Субботина-Нагорского и Гесса; сравнительный метод Прохорова [66]. В качестве экспресс-методов используют: а) метод Д. В. Прохорова как экспресс-метод, основанный на сравнительном исследовании воздуха помещений и воздуха наружной атмосферы, в котором содержание CO₂ сохраняется на уровне 0,03–0,04% (300–400 ppm или см³/м³); б) метод на основе реакции углекислоты с раствором соды и фенолфталеина, который применим даже в условиях школьной лаборатории. Основные современные утвержденные методики разработаны в соответствии с Национальным стандартом [63], который идентичен Международному стандарту [67]. Настоящие стандарты устанавливают основные положения, которые необходимо учитывать при планировании измерений содержания диоксида углерода в воздухе замкнутых помещений.

Для измерения концентрации химических веществ методом прямых измерений и получения количественных

значений из содержания в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, закрытых (замкнутых) и жилых помещениях, промышленных выбросах, выбросах окружающей среды, обеспечения безопасности труда и оптимизации технологических процессов лабораторно-инструментальные центры применяют газоанализаторы ГАНК-4 в соответствии с руководством по эксплуатации [68]. Для измерения концентрации диоксида углерода (CO₂) в соответствии с определенными актуальными аттестованными методиками выполнения измерений (МВИ) и эксплуатационной документацией КППГУ используют стационарный газоанализатор ГАНК-4ФЕх. В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации № 102 от 26.06.2020 «Об обеспечении единства измерений» [69] все методики выполнения измерений, используемые в сфере государственного регулирования, должны осуществляться согласно порядку, установленному в аттестованных методиках выполнения измерений.

Вопрос необходимости нормирования концентрации диоксида углерода в образовательных организациях обусловлен прежде всего неэффективностью или невозможностью обеспечения достаточного проветривания до нормализации и стабилизации всех параметров микроклимата до значений, которые обеспечивают оптимальный микроклимат в закрытых помещениях при высокой ежечасной наполняемости учебных кабинетов (например, при недостатке времени для эффективного проветривания во время перемены, так как проветривание запрещено при присутствии детей [50]). Кроме того, необходимость пристального внимания к концентрации CO₂ в воздухе закрытых помещений приобрела актуальность в связи с повсеместной заменой деревянных оконных рам на пластиковые окна, которые превращают учебные кабинеты в закупоренные камеры, что при несовершенной системе воздухообмена создает условия для увеличения концентрации CO₂ [70, 71].

Оценка и контроль содержания CO₂ в помещениях позволит минимизировать риски его неблагоприятного влияния на организм. В этой связи в последнее время уделяют большое внимание разработкам, позволяющим автоматизировать регистрацию и анализ показателей содержания диоксида углерода в воздухе помещений с их дальнейшей централизованной обработкой [72]. Это особенно важно для образовательных организаций, так как дает возможность вовремя определить уровень CO₂ и принять соответствующие меры по его регулированию. Оборудование помещений системами измерения температуры, относительной влажности и концентрации CO₂ наряду с системами принудительной вентиляции обеспечивает приведение газовой среды к требованиям санитарных норм и правил. Для этого системы принудительной вентиляции следует оборудовать устройствами автоматического пуска при достижении концентрации CO₂, превышающей оптимальный уровень (1200 ppm (0,12%)) [73].

Важным средством профилактики являются установка приточной вентиляции, помогающей стабильно снижать уровень CO₂, исключая его пагубное воздействие на здоровье, и установка датчиков для контроля концентрации CO₂. При этом следует отметить, что в основе проектирования вентиляционных систем лежит нормирование воздухообмена. В России нормируемый воздухообмен не менее 30 м³/ч (в Европе 72 м³/ч) не зависит от площади и объема комнаты, только от

«скорости дыхания» и объема вентиляции. Таким образом, в состоянии спокойного бодрствования концентрация CO_2 вырастет до 1000 ppm, а при физической активности превысит норму. Воздухообмен 30 м³/ч, принятый нормативным в России, не позволяет чувствовать себя комфортно в помещении. К тому же для обеспечения оптимального содержания диоксида углерода в помещении требуется увеличение воздухообмена, что отражено в рекомендациях по борьбе с CO_2 . Так, воздухообмен, требуемый для обеспечения концентрации CO_2 1000 ppm, составляет 33 м³/ч, а для обеспечения концентрации 500 ppm — 200 м³/ч [3].

Однако постоянный рост содержания CO_2 в атмосфере городов делает поддержание безопасного и комфортного для человека уровня CO_2 в помещении с помощью вентиляционных систем более энергозатратным в отсутствие его принудительного удаления из помещения. В настоящее время многие признают, что наиболее эффективным способом является очистка воздуха в помещениях, где находятся люди, для чего используют очистители воздуха, основанные на методе абсорбции загрязняющих воздух помещения веществ. Правильное сочетание очистителей воздуха с разумным уровнем вентиляции может дать очень хороший результат наряду с хорошим уровнем энергосбережения, что показывают исследования и разработки, описанные в научных публикациях последних лет [74–80].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследований, опубликованных как в российских, так и зарубежных источниках, свидетельствуют о значительном внимании к проблеме содержания CO_2 , обусловленном стремительным ростом его концентрации в воздушной среде закрытых помещений. В многочисленных источниках литературы внимание акцентировано на изучении влияния различных концентраций CO_2 в воздухе помещений на функциональное состояние и здоровье, результаты которого свидетельствуют о том, что даже при небольших отклонениях от рекомендованных (в частности для помещений организаций обучения и воспитания детей и подростков) допустимых концентраций выявляют неблагоприятные изменения со стороны отдельных систем организма, что оказывает острое и отсроченное отрицательное влияние на общее самочувствие обучающихся, а также выражается в снижении показателей работоспособности и умственной деятельности, повышении утомляемости и низкой сопротивляемости к инфекционным и неинфекционным агентам с ростом заболеваний верхних дыхательных путей. Аналитический обзор подчеркивает необходимость изучения вопроса нормирования фактического содержания CO_2 как одного из факторов риска среды воспитания и обучения, а также разработки и утверждения методической базы для мониторинга и контроля этого показателя с целью профилактики отрицательного воздействия.

Литература

- Mosso A. Life of man on the high Alps. London: T. Fisher Unwin, 1898; 342 p.
- Гладких В. Д., Вершинина Г. В. Диоксид углерода. Клинико-токсикологические и гигиенические аспекты. В книге: Ивановская И. И., редактор. Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития. Петрозаводск, 2022; с. 309–74.
- Мансуров Р. Ш., Гурин М. А., Рубель Е. В. Влияние концентрации углекислого газа на организм человека. *Universum: технические науки*. 2017; 8 (41): 20–3.
- Басова И. А. Распределение углекислого газа в ресторане и воздействие его на человека. Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Воронеж, 27 апреля 2022 г. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2022; 7–11.
- Коган А. Х., Грачев С. В., Елисеева С. В. Модулирующая роль CO_2 в действии активных форм кислорода. М.: Изд. «ГЭОТАР-Медиа», 2006; 224 с.
- Permentier K, Vercammen S, Soetaert S, Schellemans C. Carbon dioxide poisoning: a literature review of an often-forgotten cause of intoxication in the emergency department. *International Journal of Emergency Medicine*. 2017; 10 (1): 14. DOI: 10.1186/s12245-017-0142-y.
- Князева А. В., Секушина А. И., Гарин Л. Ю. Проблемы правового регулирования выброса углекислого газа в атмосферу. *Журнал МедиАль*. 2019; 2 (24): 6–9. DOI: 10.21145/2225-0026-2019-2-6-9.
- Галай Е. И. Промышленное загрязнение атмосферного воздуха Минской области выбросами углекислого газа. Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: Материалы Международной научной конференции, Минск, 5–8 мая 2015 г. Минск: Белорус. гос. ун-т, 2015: 5–8.
- Октябрьский В. П., Рязанцева Л. Т. Влияние парникового углекислого газа на человека. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020; 8–1 (98): 16–9. DOI: 10.23670/IRJ.2020.98.8.002.
- Шаов М. Т., Шаова З. А., Пшикова О. В. Изменение концентрации углекислого газа в крови человека под воздействием электроакустических сигналов нервных клеток. *Юг России: экология, развитие*. 2009; 1 (4): 136–41.
- Шалабодина В. А., Волкова А. М. Применение эффекта гиперкапнии для оптимизации работы организма в режиме образовательной деятельности. *Современные вопросы биомедицины*. 2021; 5 (2): 286–98. DOI: 10.51871/2588-0500_2021_05_02_27.
- Судаков К. В. Нормальная физиология. Курс физиологии функциональных систем. М.: Медицинское информационное агентство, 1999; 718 с.
- Гузенберг А. С., Юргин А. В., Романов С. Ю. и др. Поддержание допустимой концентрации углекислого газа в атмосфере обитаемых гермомодулей космических станций. *Пилотируемые полеты в космос*. 2021; (2): 35–59. DOI: 10.34131/MSF.21.2.35-59.
- Новосельцев В. Г., Бойко С. В., Матлашук Д. В. Проблема превышения содержания углекислого газа в воздухе жилых и общественных зданий. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2020; (2): 68–70. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-68-70>.
- Бондаренко С. Л., Басов Г. Ф., Филимонова С. В., Филимонов Н. Е. Мобильная геолокационная система анализа и контроля углекислого газа в городской среде. *Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2021): Материалы XVII Международной научно-технической конференции: в 2 томах, Уфа, 19 мая 2021 г., Т. 1. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021: 244–50.*
- Фангер О. П. Качество внутреннего воздуха в зданиях, построенных в холодном климате, и его влияние на здоровье, обучение и производительность труда людей. *АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха*,

- теплоснабжение и строительная теплофизика. 2006; (2): 12–9.
17. Будович В. Л., Полотнюк Е. Б. Контроль суммарного содержания летучих органических соединений в воздухе непромышленных помещений. Химическая безопасность. 2019; 3 (1): 7–27. DOI: 10.25514/CHS.2019.1.15000.
 18. Рыбакова Ю. А. Концентрация углекислого газа как критерий эффективности вентиляции. Вестник магистратуры. 2020; 1–3 (100): 75–9.
 19. Маркова О. Л., Зарицкая Е. В., Кирьянова М. Н. и др. Определение приоритетных загрязнителей воздушной среды закрытых помещений. Здоровье населения и среда обитания. 2021; 29 (9): 62–8. DOI: 10.35627/2219-5238/2021-29-9-62-68.
 20. Губернский Ю. Д., Калинина Н. В., Гапонова Е. Б. и др. Обоснование допустимого уровня содержания диоксида углерода в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Гигиена и санитария. 2014; 93 (6): 37–41.
 21. Наумов А. Л., Капко Д. В. CO₂: критерий эффективности систем вентиляции. АВOK: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2015; (1): 12–21.
 22. Шилькрот Е. О., Губернский Е. О. Сколько человеку нужно воздуха для комфорта? АВOK: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2016; (4): 74–7.
 23. Богомаз К. С., Волорова Н. А., Макарич Д. А. и др. Интернет вещей. Система мониторинга качества воздуха. Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: Сборник научных статей XIII Международной научно-технической конференции, Минск, 8–9 декабря 2022 г. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022: 169–73.
 24. Laverge J, Delghust M, Janssens A. Carbon dioxide concentrations and humidity levels measured in Belgian standard and low energy dwellings with common ventilation strategies. International Journal of Ventilation. 2015; 14 (2): 165–80. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684078>.
 25. Таурит В. Р., Кораблева Н. А. Обеспечение высокого качества воздуха и комфорта в зоне массового пребывания людей в помещении при нетрадиционной вытесняющей вентиляции. Вестник гражданских инженеров. 2015; 3 (50): 211–8.
 26. Машкова Е. Г. Необходимое количество воздуха для комфортного микроклимата. Вестник магистратуры. 2020; 1–3 (100): 9–15.
 27. Van der Luijt A. Management CO₂ levels cause office staff to switch off. Director of Finance online. 2007; 11.
 28. Ткаченко Н. В., Зарецкая М. А. К вопросу о качестве внутреннего воздуха в учебных классах общеобразовательных школ. Наука и бизнес: пути развития. 2021; 9 (123): 61–6.
 29. Пронина Т. Н., Карпович Н. В., Полянская Ю. Н. Уровень содержания углекислого газа в учебных помещениях и степень комфорта учащихся. Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья. 2015; (3): 32–5.
 30. Квашнин И. М., Гурин И. И. К вопросу о нормировании воздухообмена по содержанию CO₂ в наружном и внутреннем воздухе. АВOK: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2008; (5): 34–42.
 31. Грызунов П. Н. Анализ диоксидов азота и серы, углекислого газа и аммиака в цехах завода АО «Электроприбор». Студенческая наука и XXI век. 2020; 17 (1–1): 78–80.
 32. Елисеева О. В. Биологическое действие двуокси углерода на организм человека и гигиеническая оценка ее содержания в воздухе общественных зданий [диссертация]. М., 1964.
 33. Сальникова С. Р. Влияние концентрации углекислого газа на умственную способность человека: Материалы научного семинара «Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях», Брест, 20 марта 2015 г. Брест: РУПЭ «БРЕСТЭНЕРГО», 2015: 29–32.
 34. Robertson DS. The rise in the atmospheric concentration of carbon dioxide and the effects on human health. Medical Hypotheses. 2001; 56 (4): 513–8. DOI: <https://doi.org/10.1054/mehy.2000.1256>.
 35. Chaudhuri RN, Sengupta DD. Evaluation of environmental NO₂, CO₂, benzene and lead exposures of Kolkata population by biological monitoring techniques. Report of the research project. All India Institute of Hygiene & Public Health, University College of Science University of Kolkata. 2004.
 36. Robertson DS. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Current Science. 2006; 90 (12): 1607–9.
 37. Pitarma R, Marques G, Ferreira BR. Monitoring indoor air quality for enhanced occupational health. Journal of Medical Systems. 2017; 41 (2): 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0667-2>.
 38. Jacobson TA, Kler JS, Hernke MT, et al. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. Nature Sustainability. 2019; 2 (8): 691–701. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>.
 39. Hutter HP, Haluza D, Pieglar K, et al. Semivolatile compounds in schools and their influence on cognitive performance of children. International journal of occupational medicine and environmental health. 2013; (26): 628–35. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13382-013-0125-z>
 40. Zhang X, Wargocki P, Lian Z. Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. Indoor Air. 2017; 27 (1): 65–77. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12286>.
 41. Allen JG, MacNaughton P, Satish U, et al. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. Environmental health perspectives. 2016; 124 (6): 805–12. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>.
 42. Мыльникова И. В., Ефимова Н. В., Кудяев А. Н. Комплексная оценка ингаляционного риска для здоровья подростков с учетом долевого вклада воздуха помещений. Медицина труда и экология человека. 2022; (2): 113–27. DOI: 10.24412/2411-3794-2022-10209.
 43. Беседин С. Н. Прогноз углекислого газа в учебных помещениях и разработка организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба здоровью обучаемых. Грани познания. 2020; 2 (67): 3–8.
 44. Мониторинг CO₂ и качество воздуха в помещении: экспертная статья Testo [Интернет]. [Дата обращения 29.08.2023]; URL: <https://climatecontrolsolutions.ru/publication/32205-monitoring-co2-i-kachestvo-vozdukh-v-pomeshchenii.html>.
 45. Ибатуллин Э. Г., Шалавина А. С., Шалавина Ю. В. Влияние концентрации углекислого газа на общее самочувствие, показатели внимания и координации движений студентов до и после физической нагрузки. Физическая культура, спорт, туризм: наука, образование, информационные технологии: Материалы Всероссийской с международным участием заочной научно-практической конференции. Казань, 24–25 марта 2022 г., Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022; 241–6.
 46. Ефимова Н. В., Мыльникова И. В., Кудяев А. Н. О совершенствовании гигиенической оценки качества воздушной среды спортивных сооружений. Саратовский научно-медицинский журнал. 2022; 18 (3): 458–62.
 47. ГОСТ 30494—2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
 48. ГОСТ Р ЕН 13779-2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования».
 49. EN 13779:2004 “Ventilation for non-residential buildings — Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems”.
 50. СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения».
 51. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
 52. Code of Federal Regulations. OSHA Table Z-1-A. 29 CFR 1910.1000. 1988.
 53. ГН 2.2.5.2100-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (дополнение

- № 2 к ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны)».
54. Елисеева О. В. К обоснованию ПДК двуокси углерода в воздухе. Гигиена и санитария. 1964; (8): 16–21.
 55. Kutsyuruba B, Klinger DA, Hussain A. Relationships among school climate, school safety, and student achievement and well-being: a review of the literature. *Review of Education*. 2015; 3 (2): 103–35. DOI: <https://doi.org/10.1002/rev3.3043>.
 56. Évolution de la réglementation sanitaire des bâtiments: Ventilation et CO₂. Rapport n°ESE/Santé-2011-098R, non publié. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Champs-sur-Marne (as cited in ANSES 2013). CSTB (2011).
 57. Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de santé et de sécurité alimentation, environnement et travail. Maisons-Alfort, le 17 juillet 2013. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2012sa0093Ra.pdf#page=46>.
 58. Bundesgesundheitsbelehrung, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes. Gesetzliche Vorgaben und Regelwerke. 2008; 4:1358–69. Herausgegeben am 15.10.2010.
 59. EN 16798-1:2019 "Energy performance of buildings — Ventilation for buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6".
 60. Building Bulletin 101 "Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools".
 61. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022 "Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality".
 62. Babich F, Torriani G, Corona J, et al. Comparison of indoor air quality and thermal comfort standards and variations in exceedance for school buildings. *Journal of Building Engineering*. 2023; (71): 106405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106405>.
 63. ГОСТ Р ИСО 16000-26—2015 «Воздух замкнутых помещений. Часть 26. Отбор проб при определении содержания диоксида углерода (CO₂)».
 64. EN 13779 "Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems".
 65. ГОСТ Р ЕН 13779—2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования».
 66. Онина С. А., Никонова Н. А. Методы определения чистоты воздуха. Национальная ассоциация ученых. 2016; 5 (21): 50-51.
 67. ISO 16000-26:2012 "Indoor air — Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂)".
 68. НПО Прибор ГАНК. Газоанализаторы универсальные ГАНК-4. Контроль ПДК вредных веществ в воздухе. 2020. URL: <https://www.gank4.ru/upload/doc/GANK4-preview.pdf>.
 69. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», с изменениями на 8 декабря 2020 г. М., 2021.
 70. Бердаков Н. Ю., Ткаченко Н. В. Повышение эффективности систем климатизации в современных школах. Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Тихоокеанский государственный университет, 2017; (3): 199–204.
 71. Агафонова В. В. Оценка качества воздуха в помещении офисного здания. Водоснабжение и санитарная техника. 2019; (3): 61–4.
 72. Липкин И. Ю., Колуков В. В. Дистанционный контроль и оценка воздушной среды в помещениях. Молодой ученый. 2019; 23 (261): 108–11.
 73. Беседин С. Н. Углекислый газ в учебных помещениях и разработка организационно-технических мероприятий по минимизации ущерба здоровью обучаемых. Евразийское Научное Объединение. 2020; 4–2 (62): 82–5.
 74. Крупицин А. Удаление углекислого газа из помещений. Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011; 6 (114): 72–5.
 75. Маркелова О. В., Сандаков В. Д. Разработка автоматизированной системы управления вентиляционной установкой. Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: XVI Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция, Казань, 20–21 октября 2021 г. Казань: Общество с ограниченной ответственностью «Издательско-полиграфическая компания «Бриг», 2022: 57–9.
 76. Ермаков М. С., Музалев И. В., Гаршин И. В., авторы; Федеральный научно-производственный центр акционерное общество «Научно-производственное объединение «Марс», патентообладатель. Устройство контроля микроклимата в помещении. Патент на полезную модель РФ № 197598. Оpubl.15.05.2020.
 77. Санкина Ю. Н. Анализ процесса стратификации углекислого газа в помещении. Сборник трудов X Конгресса молодых ученых: Материалы Конгресса, Санкт-Петербург, 14–17 апреля 2021 г., Т. 2. Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2021; 155–9.
 78. Федосов С. В., Федосеев В. Н., Логинова, С. А. и др. Качество воздухообмена в помещении с эффектом очищения окружающей среды. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2022; 4 (72): 69–74. DOI: <https://doi.org/10.6060/snt.20227204.00010>.
 79. Чернов В. Ю. Устройство контроля микроклимата в помещении. Точная наука. 2021; (103): 6–10.
 80. Калинина В. А., Пуговкин А. В. Разработка системы контроля и управления микроклиматом помещения «умная лаборатория» Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции, Омск, 23–24 апреля 2020 г. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2020; 455–61.

References

1. Mosso A. Life of man on the high Alps. London: T. Fisher Unwin, 1898; 342 p.
2. Gladkih VD, Verzhinina GV. Диоксид углерода. Клинико-токсикологические и гигиенические аспекты. В книге: Ivanovskaya I.I., редактор. Fundamental'naya i prikladnaya nauka: sostoyaniye i tendencii razvitiya. Petrozavodsk, 2022; p. 309–74 (in Rus.).
3. Mansurov RSH, Gurin MA, Rubel EV. Vliyaniye koncentracii uglekislogo gaza na organizm cheloveka. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2017; 8 (41): 20–3 (in Rus.).
4. Basova IA. Raspredeleye uglekislogo gaza v restorane i vozdeystviye ego na cheloveka. Sintez nauki i obrazovaniya kak mekhanizm perekhoda k postindustrial'nomu obshchestvu: Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 27 aprelya 2022 g. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "OMEGA SAJNS", 2022; 7–11 (in Rus.).
5. Kogan AH, Grachev SV, Eliseeva SV. Moduliruyushchaya rol' CO₂ v deystvii aktivnykh form kisloroda. M.: Izd. "GEOTAR-Media", 2006; 224 p (in Rus.).
6. Permentier K, Vercammen S, Soetaert S, Schellemans C. Carbon dioxide poisoning: a literature review of an often-forgotten cause of intoxication in the emergency department. *International Journal of Emergency Medicine*. 2017; 10 (1): 14. DOI: 10.1186/s12245-017-0142-y.
7. Knyazeva AV, Sekushina AI, Garin LYu. Problemy pravovogo regulirovaniya vybrosa uglekislogo gaza v atmosferu. *Zhurnal MediaI*. 2019; 2 (24): 6–9 (in Rus.). DOI: 10.21145/2225-0026-2019-2-6-9.
8. Galaj EI. Promyshlennoye zagryazneniye atmosfernogo vozduha Minskoy oblasti vybrosami uglekislogo gaza. Problemy gidrometeorologicheskogo obespecheniya hozyajstvennoj

- deyatel'nosti v usloviyah izmenyayushchegosya klimata: Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Minsk, 5–8 maya 2015 g. Minsk: Belorus. gos. un-t, 2015; 5–8 (in Rus.).
9. Oktyabrskij VP, Ryazanceva LT. Vliyanie parnikovogo uglekislogo gaza na cheloveka. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2020; 8–1 (98): 16–9 (in Rus.). DOI: 10.23670/IRJ.2020.98.8.002.
 10. Shaov MT, Shaova ZA, Pshikova OV. Izmenenie koncentracii uglekislogo gaza v krvi cheloveka pod vozdejstviem elektroakusticheskikh signalov nervnykh kletok. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*. 2009; 1 (4): 136–41 (in Rus.).
 11. Shalabodina VA, Volkova AM. Primenenie efekta giperkarnii dlya optimizacii raboty organizma v rezhime obrazovatel'noj deyatel'nosti. *Sovremennye voprosy biomeditsiny*. 2021; 5(2): 286–98 (in Rus.). DOI: 10.51871/2588-0500_2021_05_02_27.
 12. Sudakov KV. Normal'naya fiziologiya. Kurs fiziologii funkcional'nykh sistem. M.: Medicinskoe informacionnoe agentstvo, 1999; 718 p. (in Rus.).
 13. Guzenberg AS, Yurgin AV, Romanov SYu, et al. Podderzhanie dopustimoy koncentracii uglekislogo gaza v atmosfere obitaemykh germomodulej kosmicheskikh stancij. *Pilotiruemye polety v kosmos*. 2021; (2): 35–59 (in Rus.). DOI: 10.34131/MSF.21.2.35-59.
 14. Novoselcev VG, Bojko SV, Matlashuk DV. Problema prevysheniya soderzhaniya uglekislogo gaza v vozduhe zhilyh i obshchestvennykh zdaniy. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020; (2): 68–70 (in Rus.). DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-68-70>.
 15. Bondarenko SL, Basov GF, Filimonova SV, Filimonov NE. Mobil'naya geolokacionnaya sistema analiza i kontrolya uglekislogo gaza v gorodskoj srede. *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya–2021): Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno–tekhnicheskoy konferencii: v 2 tomah, Ufa, 19 maya 2021 g., T. 1. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tekhnicheskij universitet*, 2021: 244–50 (in Rus.).
 16. Fanger OP. Kachestvo vnutrennego vozduha v zdaniyah, postroennykh v holodnom klimate, i ego vliyanie na zdorov'e, obuchenie i proizvoditel'nost' truda lyudej. AVOK: ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2006; (2): 12–9 (in Rus.).
 17. Budovich VL, Polotnyuk EB. Kontrol' summarnogo soderzhaniya letuchih organicheskikh soedinenij v vozduhe neproizvodstvennykh pomeshchenij. *Himicheskaya bezopasnost'*. 2019; 3 (1): 7–27 (in Rus.). DOI: 10.25514/CHS.2019.1.15000.
 18. Rybakova YuA. Koncentraciya uglekislogo gaza kak kriterij effektivnosti ventilyacii. *Vestnik magistratury*. 2020; 1–3 (100): 75–9 (in Rus.).
 19. Markova OL, Zarickaya EV, Kiryanova MN, et al. Opredelenie prioritetnykh zagryaznitelej vozdushnoj sredy zakrytykh pomeshchenij. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2021; 29 (9): 62–8 (in Rus.). DOI: 10.35627/2219-5238/2021-29-9-62-68.
 20. Gubernskij YuD, Kalinina NV, Gaponova EB, et al. Obnosovnye dopustimogo urovnya soderzhaniya dioksida ugleroda v vozduhe pomeshchenij zhilyh i obshchestvennykh zdaniy. *Gigiena i sanitariya*. 2014; 93 (6): 37–41 (in Rus.).
 21. Naumov AL, Kapko DV. CO₂: kriterij effektivnosti sistem ventilyacii. AVOK: ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2015; (1): 12–21 (in Rus.).
 22. Shilkrot EO, Gubernskij EO. Skol'ko cheloveku nuzhno vozduha dlya komforta? AVOK: ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2016; (4): 74–7 (in Rus.).
 23. Bogomaz KS, Volorova NA, Makarich DA, et al. Internet veshchej. Sistema monitoringa kachestva vozduha. *Medelektronika–2022. Sredstva medicinskoj elektroniki i novye medicinskie tekhnologii: Sbornik nauchnykh statej XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Minsk, 8–9 dekabrya 2022 g. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki*, 2022: 169–73 (in Rus.).
 24. Laverge J, Delghust M, Janssens A. Carbon dioxide concentrations and humidity levels measured in Belgian standard and low energy dwellings with common ventilation strategies. *International Journal of Ventilation*. 2015; 14 (2): 165–80. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684078>.
 25. Taurit VR, Korableva NA. Obespechenie vysokogo kachestva vozduha i komforta v zone massovogo prebyvaniya lyudej v pomeshchenii pri netradicijonnoj vytesnyayushchej ventilyacii. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; 3 (50): 211–8 (in Rus.).
 26. Mashkova EG. Neobhodimoe kolichestvo vozduha dlya komfortnogo mikroklimata. *Vestnik magistratury*. 2020; 1–3 (100): 9–15 (in Rus.).
 27. Van der Luijt A. Management CO₂ levels cause office staff to switch off. *Director of Finance online*. 2007; 11.
 28. Tkachenko NV, Zareckaya MA. K voprosu o kachestve vnutrennego vozduha v uchebnykh klassah obshcheobrazovatel'nykh shkol. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2021; 9 (123): 61–6 (in Rus.).
 29. Pronina TN, Karpovich NV, Polyanskaya YuN. Uroven' soderzhaniya uglekislogo gaza v uchebnykh pomeshcheniyah i stepen' komforta uchashchih'sya. *Voprosy shkol'noj i universitetskoy mediciny i zdorov'ya*. 2015; (3): 32–5 (in Rus.).
 30. Kvashnin IM, Gurin II. K voprosu o normirovanii vozduhoobmena po soderzhaniyu CO₂ v naruzhnom i vnutrennem vozduhe. AVOK: ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2008; (5): 34–42 (in Rus.).
 31. Gryzunov PN. Analiz dioksidov azota i sery, uglekislogo gaza i amiaka v cekhah zavoda AO "Elektropribor". *Studencheskaya nauka i XXI vek*. 2020; 17 (1–1): 78–80 (in Rus.).
 32. Eliseeva OV. Biologicheskoe dejstvie dvuokisi ugleroda na organizm cheloveka i gigienicheskaya ocenka ee soderzhaniya v vozduhe obshchestvennykh zdaniy [dissertaciya]. M., 1964 (in Rus.).
 33. Salnikova SR. Vliyanie koncentracii uglekislogo gaza na umstvennyuyu sposobnost' cheloveka: Materialy nauchnogo seminara "Problemy energeticheskoy effektivnosti v razlichnykh otraslyah", Brest, 20 marta 2015 g. Brest: RUPE "BRESTENERGO", 2015: 29–32 (in Rus.).
 34. Robertson DS. The rise in the atmospheric concentration of carbon dioxide and the effects on human health. *Medical Hypotheses*. 2001; 56 (4): 513–8. DOI: <https://doi.org/10.1054/mehy.2000.1256>.
 35. Chaudhuri RN, Sengupta DD. Evaluation of environmental NO₂, CO₂, benzene and lead exposures of Kolkata population by biological monitoring techniques. Report of the research project. All India Institute of Hygiene & Public Health, University College of Science University of Kolkata. 2004.
 36. Robertson DS. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. *Current Science*. 2006; 90 (12): 1607–9.
 37. Pitarma R, Marques G, Ferreira BR. Monitoring indoor air quality for enhanced occupational health. *Journal of Medical Systems*. 2017; 41 (2): 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0667-2>.
 38. Jacobson TA, Kler JS, Hernke MT, et al. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*. 2019; 2 (8): 691–701. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>.
 39. Hutter HP, Haluza D, Piegler K, et al. Semivolatile compounds in schools and their influence on cognitive performance of children. *International journal of occupational medicine and environmental health*. 2013; (26): 628–35. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13382-013-0125-z>.
 40. Zhang X, Wargocki P, Lian Z. Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor Air*. 2017; 27 (1): 65–77. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12286>.
 41. Allen JG, MacNaughton P, Satish U, et al. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental health perspectives*. 2016; 124 (6): 805–12. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>.
 42. Mylnikova IV, Efimova NV, Kudaev AN. Kompleksnaya ocenka ingalyacionnogo riska dlya zdorov'ya podrostkov s uchetom dolevogo vklada vozduha pomeshchenij. *Medicina truda i ekologiya cheloveka*. 2022; (2): 113–27 (in Rus.). DOI: 10.24412/2411-3794-2022-10209.
 43. Besedin SN. Prognoz uglekislogo gaza v uchebnykh pomeshcheniyah i razrabotka organizacionno-tekhnicheskikh

- meropriyatij po minimizacii ushcherba zdorov'yu obuchaemyh. Grani poznaniya. 2020; 2 (67): 3–8 (in Rus.).
44. Monitoring CO₂ i kachestvo vozduha v pomeshchenii: ekspertnaya stat'ya Testo [Internet]. [Cited 2023 Aug 29]. Available from: <https://climatecontrolsolutions.ru/publication/32205-monitoring-co2-i-kachestvo-vozdukh-v-pomeshchenii.html>. (In Rus.).
 45. Ibatullin EG, Shalavina AS, Shalavina YuV. Vliyaniye koncentracii uglekislogo gaza na obshchee samochuvstvie, pokazateli vnimaniya i koordinacii dvizhenij studentov do i posle fizicheskoy nagruzki. Fizicheskaya kul'tura, sport, turizm: nauka, obrazovanie, informacionnyye tekhnologii: Materialy Vserossijskoj s mezhdunarodnym uchastiem zaocnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Kazan', 24–25 marta 2022 g., Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2022: 241–6 (in Rus.).
 46. Efimova NV, Mylnikova IV, Kudaev AN. O sovershenstvovanii gigienicheskoj ocenki kachestva vozduhnoj sredy sportivnyh sooruzhenij. Saratovskij nauchno-medicinskij zhurnal. 2022; 18 (3): 458–62 (in Rus.).
 47. GOST 30494—2011 “Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyah” (in Rus.).
 48. GOST R EN 13779-2007. «Ventilyaciya v nezhilyh zdaniyah. Tekhnicheskie trebovaniya k sistemam ventilyacii i kondicionirovaniya». Russian.
 49. EN 13779:2004 “Ventilation for non-residential buildings — Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems”.
 50. SP 2.4.3648-20 “Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizacijam vospitaniya i obucheniya” (in Rus.).
 51. SanPiN 1.2.3685-21 “Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya” (in Rus.).
 52. Code of Federal Regulations. OSHA Table Z-1-A. 29 CFR 1910.1000. 1988.
 53. GN 2.2.5.2100-06. “Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vrednyh veshchestv v vozduhe rabochej zony (dopolnenie № 2 k GN 2.2.5.1313-03. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vrednyh veshchestv v vozduhe rabochej zony)” (in Rus.).
 54. Eliseeva OV. K obosnovaniyu PDK dvoukisi ugleroda v vozduhe. Gigiena i sanitariya. 1964; (8): 16–21 (in Rus.).
 55. Kutsyuruba B, Klinger DA, Hussain A. Relationships among school climate, school safety, and student achievement and well-being: a review of the literature. Review of Education. 2015; 3 (2): 103–35. DOI: <https://doi.org/10.1002/rev3.3043>.
 56. Évolution de la réglementation sanitaire des bâtiments: Ventilation et CO₂. Rapport n°ESE/Santé-2011-098R, non publié. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Champs-sur-Marne (as cited in ANSES 2013). CSTB (2011).
 57. Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de santé et de sécurité alimentation, environnement et travail. Maisons-Alfort, le 17 juillet 2013. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2012sa0093Ra.pdf#page=46>.
 58. Bundesgesundheitsbelehrung, Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz des Umweltbundesamtes. Gesetzliche Vorgaben und Regelwerke. 2008; 4:1358–69. Herausgegeben am 15.10.2010.
 59. EN 16798-1:2019 “Energy performance of buildings — Ventilation for buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics — Module M1-6”.
 60. Building Bulletin 101 “Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools”.
 61. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022 “Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality”.
 62. Babich F, Torriani G, Corona J, et al. Comparison of indoor air quality and thermal comfort standards and variations in exceedance for school buildings. Journal of Building Engineering. 2023; (71): 106405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106405>.
 63. GOST R ISO 16000-26—2015 “Vozduh zamknutyh pomeshchenij. Chast' 26. Otbor prob pri opredelenii soderzhaniya dioksida ugleroda (CO₂)” (in Rus.).
 64. EN 13779 “Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems”.
 65. GOST R EN 13779—2007 “Ventilyaciya v nezhilyh zdaniyah. Tekhnicheskie trebovaniya k sistemam ventilyacii i kondicionirovaniya” (in Rus.).
 66. Onina SA, Nikonova NA. Metody opredeleniya chistoty vozduha. Nacional'naya associaciya uchenyh. 2016; 5 (21): 50–1 (in Rus.).
 67. ISO 16000-26:2012 “Indoor air — Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂)”.
 68. NPO Pribor GANK. Gazoanalizatory universal'nye GANK-4. Kontrol' PDK vrednyh veshchestv v vozduhe. 2020. Available from: <https://www.gank4.ru/upload/doc/GANK4-preview.pdf> (in Rus.).
 69. Federal'nyj zakon ot 26.06.2008 № 102-FZ “Ob obespechenii edinstva izmerenij”, s izmeneniyami na 8 dekabrya 2020 g. M., 2021 (in Rus.).
 70. Berdakov NYu, Tkachenko NV. Povyshenie effektivnosti sistem klimatizacii v sovremennyh shkalah. Noveye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet, 2017; (3): 199–204 (in Rus.).
 71. Agafonova VV. Ocenka kachestva vozduha v pomeshchenii ofisnogo zdaniya. Vodopostavlenie i sanitarnaya tekhnika. 2019; (3): 61–4 (in Rus.).
 72. Lipkin IYu, Kolukov VV. Distancionnyj kontrol' i ocenka vozduhnoj sredy v pomeshcheniyah. Molodoj uchenyj. 2019; 23 (261): 108–11 (in Rus.).
 73. Besedin SN. Uglekislyj gaz v uchebnyh pomeshcheniyah i razrabotka organizacionno-tekhnicheskij meropriyatij po minimizacii ushcherba zdorov'yu obuchaemyh. Evrazijskoe Nauchnoe Ob'edinenie. 2020; 4–2 (62): 82–5 (in Rus.).
 74. Krupicin A. Udalenie uglekislogo gaza iz pomeshchenij. Santechnika, Otoplenie, Kondicionirovanie. 2011; 6 (114): 72–5 (in Rus.).
 75. Markelova OV, Sandakov VD. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy upravleniya ventilyacionnoj ustanovkoj. Dispetcherizaciya i upravlenie v elektroenergetike: XVI Vserossijskaya otkrytaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Kazan', 20–21 oktyabrya 2021 g. Kazan': Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu “Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya “Brig”, 2022; 57–9 (in Rus.).
 76. Ermakov MS, Muzalev IV, Garshin IV, avtory; Federal'nyj nauchno-proizvodstvennyj centr akcionerное obshchestvo “Nauchno-proizvodstvennoe ob'edinenie “Mars”, patentoobladatel'. Ustrojstvo kontrolya mikroklimata v pomeshchenii. Patent na poleznuyu model' RF № 197598. Opubl.15.05.2020 (in Rus.).
 77. Sankina YuN. Analiz processa stratifikacii uglekislogo gaza v pomeshchenii. Sbornik trudov X Kongressa molodyh uchenyh: Materialy Kongressa, Sankt-Peterburg, 14–17 aprelya 2021 g., T. 2. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya “Nacional'nyj issledovatel'skij universitet ITMO”, 2021; 155–9 (in Rus.).
 78. Fedosov SV, Fedoseev VN, Loginova SA, et al. Kachestvo vozduhuobmena v pomeshchenii s efektom ochishcheniya okruzhayushchej sredy. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie. 2022; 4 (72): 69–74 (in Rus.). DOI: <https://doi.org/10.6060/snt.20227204.00010>.
 79. Chernov VYu. Ustrojstvo kontrolya mikroklimata v pomeshchenii. Tochnaya nauka. 2021; (103): 6–10 (in Rus.).
 80. Kalinina VA, Pugovkin AV. Razrabotka sistemy kontrolya i upravleniya mikroklimatom pomeshcheniya “umnaya laboratoriya” Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitel'stvo: Sbornik materialov III Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Omsk, 23–24 aprelya 2020 g. Omsk: Sibirskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj universitet (SibADI), 2020: 455–61 (in Rus.).