

Воздухообмен и воздухораспре- деление в учеб- ных кабинетах

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат) за 2023 год [1] численность обучающихся по различным образовательным программам общего и профессионального образования составила 26,033 млн человек. Таким образом, примерно каждый шестой житель России в 2023 году обучался по одной из образовательных программ.

В учебном году значительную часть дня обучающиеся проводят в учебных кабинетах образовательных организаций. При этом качество внутреннего воздуха и параметры микроклимата в кабинетах оказывают непосредственное влияние как на здоровье, так и на освоение учебного материала и успеваемость [2–8].

Концентрация углекислого газа (CO_2) является одним из важных параметров, характеризующих качество внутреннего воздуха в помещениях. Оценки качества воздуха в учебных кабинетах показали [7, 8], что концентрация CO_2 и величина воздухообмена влияют на скорость выполнения заданий, количество допущенных ошибок и посещаемость. Например, в ходе анализа [7] было установлено, что снижение концентрации CO_2 с 2100 ppm (долей CO_2 на миллион долей воздуха) до 900 ppm улучшило бы скорость выполнения заданий на 12 % и снизило бы количество ошибок на 2 %, а увеличение расхода наружного воздуха на человека с 7,2 до 36 м³/ч могло бы улучшить посещаемость и успеваемость учащихся.

Данные недавно проведённых исследований свидетельствуют [8], что поддержание концентрации CO_2 на уровне ниже 900 ppm положительно влияет на обучение. При этом отмечается необходимость проведения дальнейших исследований в области качества воздуха в учебных кабинетах и его связи с энергопотреблением систем вентиляции.

Недавние исследования свидетельствуют [8], что поддержание концентрации CO_2 на уровне ниже 900 ppm положительно влияет на обучение

Стоит отметить, что средняя концентрация CO_2 в атмосферном воздухе до начала XX века не превышала 300 ppm, потом медленно увеличивалась, достигнув в 1960 году значения 317 ppm, а в 2013 году превысила 400 ppm и продолжает расти [9]. С увеличением концентрации CO_2 в атмосферном воздухе также будет увеличиваться его концентрация и внутри помещений на протяжении всего жизненного цикла здания при условии сохранения в нём технологического процесса, величины и схемы организации воздухообмена.

Исследования, выполненные для оценки качества воздуха в учебных кабинетах школ в странах Европы, США и Австралии, показали, что фактические уровни концентрации углекислого газа во многих случаях превышают рекомендуемые значения, а существующей величины воздухообмена недостаточно.

Например, исследования, проведённые в десяти учебных кабинетах школ Австралии, показали [10], что концентрация CO_2 в среднем составляла от 657 до 2235 ppm, и во всех классах было отмечено превышение рекомендованного значения концентрации 850 ppm.

При исследовании качества воздуха в 45 учебных кабинетах 23 школ Швеции было установлено [11], что в кабинетах с естественной вытяжной вентиляцией и открываемыми окнами для притока наружного воздуха наблюдались значительные колебания концентрации углекислого газа с установившимися значениями около 1500 ppm.

Рецензия эксперта на статью получена 17.07.2024 [The expert review of the article was received on July 17, 2024]

УДК 697.92:727. Научная специальность: 2.1.3.

Воздухообмен и воздухораспределение в учебных кабинетах

Д. С. Симонов, аспирант, старший преподаватель, кафедра «Теплогасоснабжение и вентиляция», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ, г. Екатеринбург); **А. Ю. Морозов**, к.т.н., доцент, кафедра «Теплогасоснабжение и вентиляция», УрФУ; **Т. С. Жилина**, к.т.н., доцент, кафедра «Инженерные системы и сооружения», Тюменский индустриальный университет (ТИУ)

Выполнен обзор результатов исследований качества внутреннего воздуха в учебных кабинетах школ разных стран. Определена минимальная величина воздухообмена в учебных кабинетах из условия обеспечения допустимого содержания углекислого газа в помещениях сверх содержания в наружном воздухе с учётом возрастной и половой групп людей. Выполнен анализ схем воздухораспределения с учётом теплового баланса в учебном кабинете в холодный период года. Приведена рекомендация по предпочтительному применению потолочных диффузоров для подачи воздуха в учебные кабинеты.

Ключевые слова: вентиляция, воздухообмен, воздухораспределение, качество внутреннего воздуха, углекислый газ, учебный кабинет.

UDC 697.92:727. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Air exchange and air distribution in classrooms

D. S. Simonov, postgraduated student, senior lecturer, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU, Yekaterinburg city); **A. Yu. Morozov**, PhD, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, UrFU; **T. S. Zhilina**, PhD, Associate Professor, Department of Engineering Systems and Structures, Tyumen Industrial University (TIU, Tyumen city)

The review of the results of research on the quality of indoor air in classrooms of schools in different countries is carried out. The minimum value of air exchange in classrooms has been determined from the condition of ensuring the permissible content of carbon dioxide in rooms in excess of the content in the outdoor air, taking into account the age and gender groups of people. The analysis of air distribution schemes taking into account the thermal balance in the classroom during the cold season is carried out. A recommendation is given on the preferred use of ceiling diffusers for air supply to classrooms.

Keywords: ventilation, air exchange, air distribution, indoor air quality, carbon dioxide, study room.

Для кабинетов с механическими приточными и вытяжными системами вентиляции колебания концентрации CO_2 были низкими, и установившиеся значения концентраций CO_2 составляли около 900 ppm. При этом средний расход воздуха на одного человека в кабинетах с естественной вентиляцией составлял 10,8 м³/ч, в кабинетах с механической вентиляцией и постоянным расходом воздуха — 23,6 м³/ч, в кабинетах с механической вентиляцией и переменным расходом воздуха — 27,7 м³/ч.

В ходе исследования в 36 учебных кабинетах 11 школ Нидерландов до и после карантина по COVID-19 было установлено [12] значительное снижение концентрации CO_2 (среднее максимальное значение снизилось с 1254 до 903 ppm) в связи с сокращением средней заполняемости классов с 17 человек до карантина до 10 человек во время карантина, что привело к увеличению расхода наружного воздуха на одного человека в 90 % учебных кабинетов.

Таким образом, обеспечение надлежащего воздухообмена в учебных кабинетах из условия поддержания допустимых концентраций CO_2 является весьма актуальным вопросом.

Учебные кабинеты характеризуются компактностью, высокой плотностью посадки обучающихся и чёткими нормативными требованиями к объёмно-планировочным и технологическим решениям. В этих условиях вопросы анализа схем организации воздухообмена в данном классе помещений приобретают особую актуальность: условия воздушораспределения в компактном помещении (при достаточно малой расчётной длине приточной струи до входа в рабочую зону) должны удовлетворять условиям теплового комфорта, подвижности и газового состава воздуха в рабочей зоне.

В статье [13] уже отмечалось, что в большинстве случаев при проектировании школ расчётный воздухообмен определяется по минимальным удельным требованиям. В проектной документации пяти зданий образовательных организаций, рассмотренной авторами статьи, расчётный воздухообмен также определялся либо по кратности 2 ч⁻¹, либо по подаче 20 м³/ч наружного воздуха на одно место.

В тоже время, согласно ГОСТ 30494–2011, величину воздухообмена необходимо определять не только на основании удельных норм, но и по расчёту на обеспечение допустимых концентраций загрязняющих веществ, обеспечивая в помещениях общеобразовательных организаций первый класс качества воздуха,

а в помещениях организаций профессионального образования — второй класс. При этом в качестве определяющего загрязняющего вещества предписывается принимать CO_2 , выделяемый людьми.

Для определения расчётного воздухообмена по допустимым концентрациям данные по выделениям людьми CO_2 (табл. 1) приняты авторами настоящей статьи на основании работы [14] при температуре воздуха +19°C и давлении 101 кПа с учётом возрастной группы, пола, средней массы тела и уровня физической активности.

:: Минимальные расходы воздуха в учебных кабинетах по допустимым концентрациям CO_2 табл. 1

Группа по возрасту	Группа по полу	Выделение CO ₂ от одного человека, л/с [14]	Расход воздуха на одного человека, м ³ /ч	Средний расход воздуха на одного человека*, м ³ /ч
Для обеспечения первого класса качества воздуха в школах при превышении концентрации CO ₂ на 400 ppm				
Учащиеся 1–4 классов	Девочки	0,0030	27	29
	Мальчики	0,0033	30	
Учащиеся 5–11 классов	Девочки	0,0040	36	41
	Мальчики	0,0050	45	
Учителя (для 21–30 лет)	Женщины	0,0055	50	–
	Мужчины	0,0071	64	
Для обеспечения второго класса качества воздуха в организациях профессионального образования при превышении концентрации CO ₂ на 600 ppm				
Обучающиеся (для 21–30 лет)	Женщины	0,0042	25	29
	Мужчины	0,0053	32	
Преподаватели (для 21–30 лет)	Женщины	0,0055	33	–
	Мужчины	0,0071	42	

* При нахождении в помещении по 50 % представителей мужского и женского пола.

Общеобразовательные организации обеспечивают осуществление образовательной деятельности в соответствии с тремя уровнями образования: начальное общее образование (1–4 классы), основное общее образование (5–9 классы), среднее общее образование (10–11 или восьмой, 9–11 классы).

При этом для учащихся начальных классов, как правило, предусматриваются закреплённые за каждым классом учебные кабинеты. Таким образом, с точки зрения определения расчётного воздухообмена, с учётом сильной зависимости выделений CO_2 от возраста человека [14, 15] можно выделить две группы учебных кабинетов школ: для 1–4 классов (дети до

11–12 лет) с закреплёнными за каждым классом кабинетами и для 5–11 классов (дети от 11–12 до 18–19 лет).

Для учителей, преподавателей и обучающихся по программам профессионального образования при определении расчётного воздухообмена принята возрастная группа от 21 года до 30 лет, для которой характерно максимальное выделение CO_2 среди всех возрастных групп [14, 15].

Количество выделяющегося CO_2 для обучающихся определено при уровне физической активности 1,2 met (met — отношение уровня метаболизма во время

физической активности к уровню метаболизма в состоянии покоя), что соответствует спокойной учёбе, а для учителей и преподавателей при уровне физической активности 1,6 met, с учётом возможности выполнения работы в положении стоя и периодической ходьбы по учебному кабинету [14, 15].

В работах [13, 15], в ГОСТ 30494–2011 и СП 60.13130.2020 приведены различные методы определения расчётного воздухообмена, в том числе с учётом того, что процесс выделения CO_2 является нестационарным. Авторы настоящей статьи считают, что при определении воздухообмена необходимо учитывать возможность постоянного нахождения обучающихся в учебном кабинете, в том числе во время перемен, использование кабинета в две смены, а также возможность введения карантинных мероприятий, подобных тем, которые применялись для разобщения классов при пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 (нахождение одного класса на протяжении всего учебного дня в одном кабинете, даже во время школьных перемен).



Принимая для удобства расчётов в качестве единицы измерения концентрации CO₂ миллионные доли (ppm), формула, приведённая в СП 60.13130.2020 для определения воздухообмена по количеству выделяющихся вредных веществ, преобразуется к следующему виду:

$$L = \frac{10^6 G_{CO_2}}{K_L^{CO_2} (C_l - C_{in})}, \quad (1)$$

где L — воздухообмен, м³/ч; G_{CO_2} — расчётные поступления CO₂, м³/ч; C_l — концентрация CO₂ в удаляемом воздухе, ppm; C_{in} — концентрация CO₂ в приточном воздухе, ppm; $K_L^{CO_2}$ — коэффициент воздухообмена [16].

В этой статье определение расчётного воздухообмена рассмотрено для часто применяемой в учебных кабинетах схеме воздухораспределения с подачей и удалением воздуха в верхней зоне помещения (перемешивающая вентиляция с равномерным распределением воздуха по помещению, для которой авторами принят коэффициент воздухообмена, равный 1,0).

Результаты расчёта воздухообмена для учебных кабинетов приведены в табл. 1, в последнем столбце которой средний расход воздуха на одного обучающегося определён при условии, что среди обучающихся в учебном кабинете 50 % мужского пола и 50 % женского пола.

На основании результатов расчёта можно сделать вывод, что для обеспечения требуемого качества воздуха при применении перемешивающей вентиляции необходимо принимать расчётные воздухообмены не по минимальным требованиям, а по расчёту на обеспечение допустимых концентраций CO₂.

На здоровье людей и освоение учебного материала оказывает влияние не только качество внутреннего воздуха, но и такие параметры микроклимата, как темпе-

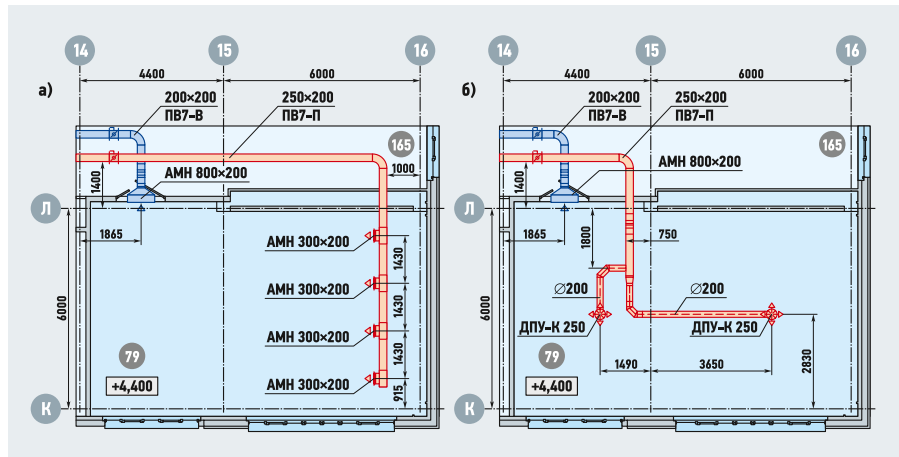


Рис. 1. План учебного кабинета (а и б — первый и второй варианты воздухораспределения)

ратура и подвижность воздуха, значение которых зависит от схемы подачи воздуха в помещение. Несмотря на то, что по вопросам воздухораспределения выполнено значительное количество работ, а в статье [13] приводится рекомендация по применению в учебных кабинетах многодисковых потолочных воздухораспределителей для обеспечения нормируемой подвижности воздуха, рассмотренная авторами проектная документация показывает, что при выборе схемы воздухораспределения в учебных кабинетах не учитываются возможные отклонения значения температуры внутреннего воздуха от расчётного, обусловленные наличием в кабинетах избытков теплоты даже в холодный период.

В рамках настоящей работы вопрос воздухораспределения рассмотрен на примере одного из учебных кабинетов существующей общеобразовательной организации, план которого представлен на рис. 1. Учебный кабинет основного образования на 25 мест площадью 63,9 м² и высотой 3600 мм расположен на втором этаже здания. Величина потерь теплоты, определённая при температуре наружного воздуха –32 °С и температуре внутреннего воздуха +19 °С, составляет 3350 Вт.

Величина воздухообмена в кабинете составляет 520 м³/ч, расчётная температура приточного воздуха равна +18 °С. Проектная схема воздухораспределения: настилающиеся на потолок струи с применением настенных решёток типа АМН.

Авторами было рассмотрено изменение температуры внутреннего воздуха в учебном кабинете в зависимости от температуры наружного воздуха для холодного периода года. При этом поступления теплоты были учтены в минимальном количестве: от 25 учащихся, учителя

В рамках настоящей работы вопрос воздухораспределения рассмотрен на примере одного из учебных кабинетов существующей общеобразовательной организации, план которого представлен на рис. 1

и от искусственного освещения, а также было принято, что в рассматриваемом расчётном режиме теплоступления от солнечной радиации и от оборудования отсутствуют.

Результаты расчёта температуры внутреннего воздуха, при которой в рассматриваемом учебном кабинете установится баланс между потерями и поступлениями теплоты, представлен на рис. 2.

В связи с тем, что в холодный период года величина потерь теплоты через ограждающие конструкции зависит от температуры наружного воздуха и с повышением температуры наружного воздуха уменьшается, а величина поступлений теплоты от температуры наружного воздуха не зависит, для рассмотренного случая при температурах наружного воздуха выше –29 °С поступления теплоты превышают потери, и, как следствие, значение температуры внутреннего воздуха даже в холодный период года может существенно увеличиваться относительно расчётного.



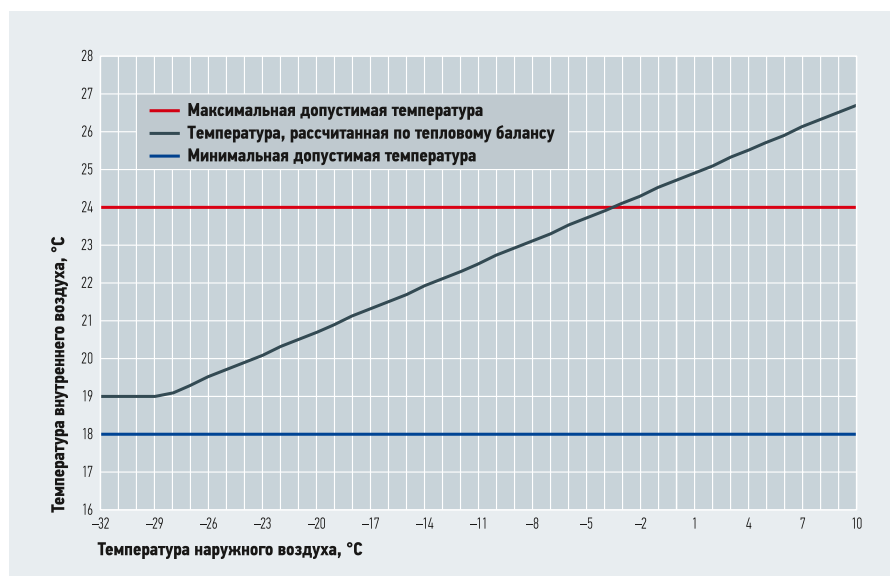


Рис. 2. Температура внутреннего воздуха

Параметры струй при различных значениях температуры внутреннего воздуха табл. 2

Параметр струи	Настилающаяся на потолок струя (решётка типа АМН при $a_1 = 0$) при температуре внутреннего воздуха			Настилающаяся веерная струя (диффузор типа ДПУ-К при $b = 0,05$) при температуре внутреннего воздуха		
	19 °C	24 °C	27 °C	19 °C	24 °C	27 °C
Расстояние от воздухо-распределителя до точки отрыва от потолка $x_{отр}$, м	2,7	1,1	0,9	1,7	0,7	0,6
Максимальная скорость в месте внедрения струи в обслуживаемую зону V_x , м/с	0,24	0,38	0,41	0,08	0,12	0,13
Избыточная температура в месте внедрения струи в обслуживаемую зону Δt_x , °C	-0,5	-4,6	-7,5	-0,1	-0,6	-1,0

В табл. 2 для рассматриваемого учебного кабинета представлены результаты расчёта воздухораспределения для двух схем воздухораспределения (настилающимися на потолок струями с применением настенных решёток типа АМН со скоростным и температурным коэффициентами $m = 8,4$ и $n = 7,1$; настилающимися веерными струями с применением диффузоров типа ДПУ-К с коэффициентами $m = 1,0$ и $n = 0,9$), при различных возможных температурах внутреннего воздуха: расчётной — +19 °C, максимальной допустимой — +24 °C и максимальной для рассматриваемого режима — +27 °C.

Результаты расчёта показывают, что подача приточного воздуха настилающимися веерными струями может обеспечить нормируемые значения максимальной скорости и избыточной температуры приточной струи в месте внедрения в рабочую зону в достаточно широком диапазоне значений температуры внутреннего воздуха. Напротив, при подаче приточного воздуха настилающимися на потолок струями с увеличением температуры внутреннего воздуха относительно расчётного значения будет увеличиваться отклонение параметров приточной струи от нормируемых значений.

Также стоит отметить, что рассмотренная схема подачи воздуха неизотермически настилающимися веерными струями позволяет принимать температуру приточного воздуха ниже, чем при подаче воздуха настилающимися на потолок струями, что может позволить уменьшить расход тепловой энергии на нагрев приточного воздуха и увеличить количество ассимилируемых в помещении избытков теплоты.

Выводы

1. Многочисленные исследования показывают, что для качественного образования и сохранения здоровья людей в учебных кабинетах образовательных организаций необходимо обеспечивать требуемое качество внутреннего воздуха. Одним из важных параметров качества воздуха является концентрация углекислого газа и, как показывают выполненные расчёты, величину воздухообмена в учебных кабинетах необходимо определять из условия поддержания требуемых концентрации CO_2 с учётом половой и возрастной групп учащихся и учителей, а также коэффициента воздухообмена.

Дальнейшие исследования в области определения величины и коэффициента воздухообмена для различных схем воздухораспределения в учебных кабинетах представляются весьма актуальными и перспективными.

2. При выборе схемы воздухораспределения в учебных кабинетах необходимо учитывать весь диапазон возможных значений температуры внутреннего воздуха. При подаче воздуха в верхнюю зону можно рекомендовать предпочтительное применение потолочных диффузоров с относительно низкими значениями скоростного и температурного коэффициентов, в частности, рекомендовать потолочные диффузоры с веерной вставкой из нескольких диффузоров. ●

- Социально-экономическое положение России. 2023 год [Электр. текст]. Минэкономразвития России; Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Режим доступа: rosstat.gov.ru. Дата обращ.: 14.04.2024.
- Turunen M., Toyinbo O., Putus T., Nevalainen A., Shaughnessy R., Haverinen-Shaughnessy U. Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2014. Vol. 217. Issue 7. Pp. 733–739.
- Wargocki P. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019. Vol. 157. Pp. 197–204.
- Wargocki P., Wyon D.P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013. Vol. 59. Pp. 581–589.
- Mohamed S., Rodrigues L., Omer S., Calautit J. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 250.
- Korsavi S.S., Montazami A. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 214.
- Wargocki P. et al. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*. 2020. Vol. 173.
- Sadrizadeh S., Yao R. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57.
- ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide 2022. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE). Atlanta, Georgia, U.S. 2022. 21 p.
- Andamon M.M., Rajagopalan P., Woo J. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO_2 concentration measurements. *Building and Environment*. 2023. Vol. 237.
- Cabovská S., Bekö G., Teli D., Ekberg L., Dalenbäck J.-O., Wargocki P., Psomas Th., Langer S. Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022. Vol. 226.
- Ding Er, Zhang D., Hamida A., García-Sánchez C., Jonker L., de Boer A.R., Bruijning P.C.J.L., Linde K.J., Wouters I.M., Bluyssena Ph.M. Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023. Vol. 229.
- Савельев Ю.Л. Основы проектирования систем общеобменной вентиляции учебных кабинетов и классов образовательных организаций // *Журнал СОК*. 2016. №9. С. 56–67.
- Persily A., de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017. Vol. 27. Issue 5. Pp. 868–879.
- Batterman S. Review and extension of CO_2 -based methods to determine ventilation rates with application to school classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. Vol. 14. Issue 2.
- Гримитин М.И. Распределение воздуха в помещениях. — СПб.: АВООК Северо-Запад, 2004. 320 с.

References — see page 79.

Denis S. Simonov, postgraduated student, senior lecturer, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU, Yekaterinburg city); **Anton Yu. Morozov**, PhD, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, UrFU; **Tatyana S. Zhilina**, PhD, Associate Professor, Department of Engineering Systems and Structures, Tyumen Industrial University (TIU, Tyumen city)

1. *Sotsial'no-ekonomicheskoe polozhenie Rossii. 2023 god* [Socio-economic situation in Russia. 2023]. *Minjekonomrazvitiya Rossii; Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki (Rosstat)* [Ministry of Economic Development of the Russia Federation; Federal State Statistics Service of the Russia Federation (Rosstat)]. Web-source: rosstat.gov.ru. Access date: April 14, 2024. [In Russian]
2. M. Turunen, O. Toyinbo, T. Putus, A. Nevalainen, R. Shaughnessy, U. Haverinen-Shaughnessy. Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2014. Vol. 217. Issue 7. Pp. 733–739.
3. P. Wargocki. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019. Vol. 157. Pp. 197–204.
4. P. Wargocki, D.P. Wyon. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013. Vol. 59. Pp. 581–589.
5. S. Mohamed, L. Rodrigues, S. Omer, J. Calautit. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 250.
6. S.S. Korsavi, A. Montazami. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 214.
7. P. Wargocki et al. The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*. 2020. Vol. 173.
8. S. Sadrizadeh, R. Yao. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57.
9. ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide 2022. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE). Atlanta, Georgia, U.S. 2022. 21 p.
10. M.M. Andamon, P. Rajagopalan, J. Woo. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements. *Building and Environment*. 2023. Vol. 237.
11. S. Cabovská, G. Bekö, D. Teli, L. Ekberg, J.-O. Dalenbäck, P. Wargocki, Th. Psomas, S. Langer. Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022. Vol. 226.
12. Er Ding, D. Zhang, A. Hamida, C. García-Sánchez, L. Jonker, A.R. de Boer, P.C.J.L. Bruijning, K.J. Linde, I.M. Wouters, Ph.M. Bluyssena. Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023. Vol. 229.
13. [Yu.L. Savelyev. Osnovy proektirovaniya sistem obsheobmennoj ventiljatsii uchebnykh kabinetov i klassov obrazovatel'nykh organizatsij](#) [Fundamentals of designing general ventilation systems for classrooms and classrooms in educational organizations]. *Zhurnal San-tekhnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2016. No. 9. Pp. 56–67. [In Russian]
14. A. Persily, L. de Jonge. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017. Vol. 27. Issue 5. Pp. 868–879.
15. S. Batterman. Review and extension of CO₂-based methods to determine ventilation rates with application to school classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. Vol. 14. Issue 2.
16. M.I. Grimitlin. *Raspredelenie vozdukh v pomeshenijakh* [Air distribution in rooms]. St. Petersburg. AVOK Severo-Zapad [Publishing House of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics of the north-west part of Russia ("ABOK North-West" Publishers)]. 2004. 320 p. [In Russian]