

Естественные науки

УДК 502

С.Н. БЕСЕДИН
(Волгоград)

ПРОГНОЗ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В УЧЕБНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ И РАЗРАБОТКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО МИНИМИЗАЦИИ УЩЕРБА ЗДОРОВЬЮ ОБУЧАЕМЫХ

Прогнозируется формирование концентрации углекислого газа в учебных помещениях Волгоградского государственного социально-педагогического университета в зависимости от количества обучаемых, объема помещений и степени их вентилирования. Получены полуэмпирические зависимости прогноза углекислого газа для оценки добавочного риска при обучении для студентов и персонала. Предложены организационно-технические мероприятия по минимизации риска от токсического влияния углекислого газа на здоровье обучаемых.

Ключевые слова: углекислый газ (CO_2), концентрация углекислого газа (C_{CO_2}); прирост концентрации углекислого газа (ΔC_{CO_2}), скорость прироста углекислого газа (V_{CO_2}), удельная скорость выделения углекислого газа человеком в зависимости от тяжести выполняемой работы ($V_{CO_2уд}$).

SERGEY BESEDIN
(Volgograd)

FORECAST OF CARBON DIOXIDE IN CLASSROOMS AND DEVELOPMENT OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL ACTIVITIES OF MINIMIZING STUDENTS HEALTH DAMAGE

The article deals with the forecast of the formation of carbon dioxide concentration in the classrooms of Volgograd State Socio-Pedagogical University depending on the students' number, the rooms' volume and the ventilation's degree. There are given the semi-empirical dependences of the carbon dioxide forecast for the evaluation of the additional risk in the educational process for students and staff. The author suggests the organizational and technical measures of minimizing the risk of the carbon dioxide toxic effect on the students' health.

Key words: carbon dioxide (CO_2), carbon dioxide concentration (C_{CO_2}), carbon dioxide concentration increase (ΔC_{CO_2}), carbon dioxide growth speed (V_{CO_2}), specific speed of carbon dioxide emission by a person depending on the severity of the work performed ($V_{CO_2уд}$).

В настоящее время интерес к обеспечению безопасного пребывания в образовательном пространстве обучаемых и персонала непрерывно растет. Это связано с необходимостью анализа, минимизацией и управлением рисками от негативных факторов, которые формируются в учебных помещениях образовательного пространства. Одним из негативных факторов газовой среды (ГВС) является углекислый газ от жизнедеятельности обучаемых, который накапливается в учебных помещениях и оказывает воздействие на обучаемых, а именно повышает утомляемость и снижает их работоспособность [1, 2], а следовательно негативно влияет на качество обучения студентов. Исходя из сказанного возникает необходимость исследования динамики формирования этого газа в учебных помещениях и разработки рекомендаций по снижению его негативного воздействия на жизнедеятельность обучаемых в образовательном учреждении.

Важность этого исследования подтверждается тревожными данными о масштабных международных исследованиях, которые проведены по инициативе Европейского респираторного общества в школах Франции, Италии, Дании, Швеции и Норвегии. Оно показало, что в учебных заведениях, где концентрация CO_2 в классах превышала 1000 ppm, подверженность учащихся заболеваниям респираторных органов повышалась в 2–3,5 раза. Достаточно отметить, что исследователи этой проблемы пришли к заключению, что безопасный уровень CO_2 в помещении не должен превышать 1000 ppm (0,1 %). Так, напри-

мер, в школах Департамент здравоохранения США рекомендует поддерживать уровень углекислого газа не выше 600 ppm [5].

Задача настоящей работы – исследование динамики формирования углекислого газа в учебных помещениях образовательного учреждения, анализ и разработка рекомендаций по снижению его негативного влияния на безопасность жизнедеятельности обучающихся на примере учебных аудиторий 1-31, 1-29, 405 Волгоградского государственного социально-педагогического университета (ВГСПУ).

Измерения концентрации углекислого газа и температуры проводились детектором углекислого газа МТ 8057S (см. рис. 1) в учебных помещениях: 1-31, 1-29 и 405, окна первых двух аудиторий выходят на автомагистраль по пр. им. В.И. Ленина, которые расположены на первом этаже и аудитории 405, расположенную на четвертом этаже (окна выходят во внутренний дворик здания университета). Измерение концентрации CO_2 и температуры C^0 производилось в пяти точках каждого помещения, равномерно расположенных друг от друга с последующим перемещением прибора в другую измеряемую экспозицию помещения. Количество измерений в каждой экспозиции (точке) составляло 3, всего 15 измерений в каждом помещении. Определение относительной влажности в помещениях осуществлялось по психометрическим таблицам анализа параметров микроклимата с учетом значений температуры сухого и влажного термометров. Измерения проводилось при закрытых окнах с последующим сквозным их вентилированием через 90 мин. занятий. После каждого занятия производилось сквозное вентилирование до снижения концентрации CO_2 до фоновых наружных значений. Фоновые наружные концентрации с учетом движения автотранспортных потоков составляли порядка 375–400 pppt (0,03–0,04%). Значения температуры сухого и влажного термометров составили $t_{\text{сух}}=21,2 \text{ C}^0$ и $t_{\text{вл}}=15 \text{ C}^0$, а величина относительной влажности воздуха по психрометру без вентилятора составила $\phi_{\%}=35\%$.



Рис. 1. Детектор углекислого газа МТ 8057S

Скорость прироста углекислого газа определили как отношение к среднему приросту концентрации углекислого газа $\Delta C_{\text{CO}_2 \text{ppm}}$ к интервалу времени Δt , мин. по зависимости:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta C_{\text{CO}_2 \text{ppm}}}{\Delta t, \text{мин}} = \frac{230}{20} = 11,5 \text{ ppm/мин. (1);}$$

Удельную скорость прироста с учетом количества обучающихся можно получить по зависимости:

$$V_{\text{CO}_2 \text{уд.}} = \frac{\Delta C_{\text{CO}_2 \text{ppm}}}{\Delta t, \text{мин} \cdot n \text{ чел}} = \frac{230}{20 \cdot 11} = 1,05 \text{ ppm/мин.} \cdot \text{чел. (2);}$$

Значения концентраций углекислого газа и динамика формирования температуры и относительной влажности для исследуемых аудиторий представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Динамика формирования углекислого газа и параметров микроклимата в аудитории 1-31 (объем 215 м³) в течении 90 мин. (11 обучаемых, гр. СКП-СПБ-11)

Время, т, ч., мин.	C _{CO₂} , ppt	C _{CO₂} , %	t, C ⁰	φ%	V _{CO₂} ppt/мин., скорость прироста CO ₂	V _{CO₂уд} ppt/мин. чел., удельная скорость прироста CO ₂
8.00	903	0.09	20	35	11,50	1,05
8.20	956	0.095	20			
8.40	1210	0.12	21.3			
9.00	1445	0.144	21.8			
9.20	1640	0.164	22.1			
9.00	1735	0.173	21.2			

Примечание. C_{CO₂}, ppt – концентрация углекислого газа в ppt и % объемных; t, C⁰ и φ% – осредненная температура и относительная влажность газовой среды; V_{CO₂} – ppt/мин., скорость прироста концентрации углекислого газа; V_{CO₂уд} ppt/мин. чел., удельная скорость выделения углекислого газа человеком с учетом тяжести выполняемой работы. Концентрация углекислого газа равная 803 ppt на 8.00 объясняется неполным вентилированием помещения после последнего занятия предыдущего дня.

По результатам анализа измерений в учебной аудитории 1-31 получены эмпирические зависимости скорости роста углекислого газа при 11 обучающихся.

$$V_{CO_2} = A + Bt \quad (3);$$

где A и B – эмпирические коэффициенты. Для табл. 1: A=903; B=9,5; Для табл. 2 значения коэффициентов составили A=1220 и B=8,5. Проверка на сходимость результатов по эмпирическим зависимостям дал хорошие результаты.

Полученные эмпирические зависимости позволяют осуществлять прогнозирование формирования концентрации углекислого газа в учебных помещениях во времени и тем самым проводить профилактические мероприятия в виде вентилирования до наступления критических значений концентрации углекислого газа, что в конечном итоге снизит утомляемость обучаемых и повысит усвоение учебного материала, а следовательно и эффективность обучения.

Таблица 2

Динамика формирования углекислого газа и параметров микроклимата в аудитории 405 (объемом 400м³) в течении 90 мин. (68 обучаемых, группы лекционного потока факультета социально-коррекционной педагогики)

Время, т, ч., мин.	C _{CO₂} , ppt	C _{CO₂} , %	t, C ⁰	φ%	V _{CO₂} ppt/мин., скорость прироста CO ₂	V _{CO₂уд} ppt/мин. чел., удельная скорость прироста CO ₂
13.20	1860	0.18	24.4	35	12,66	0,19
13.40	2370	0.23	26.5			
14.00	2680	0.27	26.9			
12.30	2860	0.28	26.9			
14.20	2990	0.29	27.0			
14.40	3000	0.30	28.0			

Анализ динамики формирования концентрации углекислого газа в аудитории 405 на момент начала занятия в 13.10 показывает на завышенный порог по концентрации углекислого газа, равный C_{CO_2} , ppm=1860, что приводит к потере работоспособности и указывает на недостаточное вентилирование помещения после предыдущих трех занятий и представляется некомфортным уровнем негативности более 1200 ppm (см. табл. 3) [4, 5].

Таблица 3

Нормирование углекислого газа в учебном помещении

Вид уровня негативности	Концентрация углекислого газа, ppm	Концентрация углекислого газа, % об.
Комфортный уровень	400–700	0,04–0,07
Не комфортный уровень	800–1200	0,08–0,12
Потеря работоспособности	более 1200	более 0,12
Недопустимый уровень	более 2500	более 0,25

В дальнейшем наблюдается интенсивный рост концентрации углекислого газа C_{CO_2} , ppm значения которого через 40 мин. занятия достигают недопустимого уровня равного 2680 ppm (более 2500 ppm), который приводит к потере работоспособности обучающихся.

В процессе обучения студенты выполняют работу легкого класса, в течении которой один человек выделяет в среднем 22,6 л/ч. углекислого газа. Значения фоновой концентрации в чистом воздухе колеблется от 300 до 400 ppm (0,03–0,04%) углекислого газа. Зная количество обучающихся в учебном помещении, длительность обучения, например, два академического часа составляет 90 мин. или 1,5 ч. и объем помещения в метрах кубических или литрах ($1 \text{ м}^3=10^3 \text{ л}$ воздуха) можно определить количество углекислого газа, выделяемого обучающимися в аудитории по зависимости:

$$C_{CO_2} = V_{CO_2 \text{ уд.}} * n * 1,5 \quad (4);$$

где C_{CO_2} – концентрация углекислого газа, ppm;

$V_{CO_2 \text{ уд.}}=22,6 \text{ л/ч.}$ – удельная скорость выделения углекислого газа одним человеком при выполнении легкой работы; n – количество обучающихся; 1,5 ч. занятий (90 мин.).

В связи с тем, что фоновые значения концентраций углекислого газа в учебных помещениях могут принимать различные значения и отличаться от его содержания в чистом воздухе. Это связано с недостаточной вентиляцией помещений после окончания занятия. В силу названной причины концентрация CO_2 может принимать значения больше фоновых концентраций, которые формируются в чистом воздухе 300–400 ppm.

Таким образом, прогноз концентрации CO_2 углекислого газа в помещении с учетом количества обучающихся и объема учебных помещений можно осуществлять по зависимости:

$$C_{CO_2} = A + \frac{(C_{CO_2 \text{ уд.}} * n * 1,5) * 100\%}{V * K} [\%] \quad (5);$$

где A – фоновое значение концентрации углекислого газа в учебном помещении на момент начала занятий, % об.; $K=0,2$ – коэффициент, учитывающий неравномерность перемешивания газовой среды за счет естественной циркуляции. Для помещений 1-31 и 1-29 коэффициенты $K=0,2$ и $K=0,25$, соответственно, а для помещения 405 – $K=0,5$; V – объем учебного помещения, л.

Сравнительные значения измеренных и расчетных концентраций углекислого газа представлены в табл. 4 (см. на с. 7).

Таблица 4

**Измеренные и расчетные значения концентраций
углекислого газа в учебных аудиториях ВГСПУ по истечению 90 мин. занятий**

Аудитория, Объем, м ³	Номер пары	Количество обучаемых, п	Фон, C _{CO2} ppт/% об.	Эксперимент, C _{CO2} , ppт/% об.	Расчет, C _{CO2} , % об.	Величина ошибки, ppт/%
1-31; 215	1	11	903/0,09	1735/0,173	1688/0,168	-47/2,7
1-29; 250	3	12	1030/0,1	1600/0,16	1680/0,168	+80/5,0
405; 400	4	68	1680/0,16	3000/0,16	3012/0,30	+12/0,4

Выводы и предложения:

1. Сравнение результатов прогноза концентрации C_{CO2} показал на высокую сходимость экспериментальных и расчетных значений концентрации углекислого газа по полуэмпирической модели (3), полученных в результате экспериментальных и расчетных значений. Погрешность варьирует от 0,4 до 5,0%, что говорит о достаточно высоком уровне достоверности.

2. Эмпирические зависимости прогноза формирования углекислого газа в помещениях 1-31, 1-29 и 405 позволяют достоверно отслеживать динамику его накопления с учетом существующего фона (5).

3. При прогнозе динамики роста концентрации углекислого газа в учебном помещении необходимо учитывать фоновые значения на момент начала занятия. Которые зачастую выше концентраций углекислого газа в чистом воздухе, что говорит о недостаточном вентилировании помещений перед началом занятия (содержания углекислого газа в атмосферном воздухе составляет не более 300–400 ppт).

4. В процессе исследований содержания углекислого газа во всех помещениях на момент окончания занятия достигают значений выше 1200 ppт, что соответствует шкале негативности, связанной с потерей работоспособности.

5. В помещениях, в которых проводятся занятия с большими лекционными потоками, концентрации углекислого газа могут достигать критических значений более 2500 ppт, что по шкале негативности соответствуют недопустимому уровню.

6. Наиболее активно происходят изменения параметров микроклимата и концентрации углекислого газа в учебных помещениях с лекционными потоками в небольших по объему помещений до 200 м³ с количеством обучаемых 25–30 чел. Рост концентрации углекислого газа при этом сопровождается изменением параметров микроклимата в учебном помещении: происходит увеличение температуры до 27 С⁰ и изменением относительной влажности до значений 30–40%.

7. Десятиминутного перерыва недостаточно для полного вентилирования учебных помещений через окна и достижения минимальной концентрации углекислого газа равного атмосферному (300–400 ppт.).

Предложения и организационно-технических мероприятий:

1. Для приведения газовой среды по параметрам микроклимата и содержанию углекислого газа требованиям санитарных норм и правил целесообразно учебные помещения оборудовать системами измерения температуры и относительной влажности (датчиками углекислого газа), а также системами принудительной вентиляции.

2. Службе охраны труда высшего учебного заведения необходимо осуществлять мониторинг газовой среды учебных помещений на предмет содержания концентрации углекислого газа и обеспечения эффективного их вентилирования системами принудительной вентиляции. Особое вни-

мание необходимо обращать на лекционные аудитории с большим количеством обучаемых, в которых на момент начала первого занятия целесообразно поддерживать концентрацию углекислого газа, равного атмосферному.

3. Системы принудительной вентиляции целесообразно оборудовать устройствами автоматического пуска при достижении концентрации углекислого газа в учебном помещении более 1200 ppm (0,12%).

4. Пластиковые евроокна необходимо оборудовать специальными клапанами для приточной вентиляции (приточные бризеры) учебных помещений и снижения концентрации углекислого газа.

Литература

1. Быховская М.С., Гинзбург С.Л., Хализова О.Д. Методы определения вредных веществ в воздухе. М.: ЭНАС, 2003.
2. Гурина И.В. Безопасный уровень углекислого газа требует ревизии // Экологический вестник России. 2008. № 10. С. 18.
3. Нормы содержания углекислого газа в помещении. [Электронный ресурс]. URL: <https://4handsmaster.com/normy-soderzhaniya-uglekislogo-gaza-v-pomeschenii/> (дата обращения: 12.02.2020).
4. Углекислый газ в помещении. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.beloveshkin.com/2015/04/uglekislyj-gaz-v-pomeshhenii.html> (дата обращения: 20.01.2020).
5. Школьный экологический мониторинг: учебно-методич. пособие. М.: АГАР, 2000.