

КОНЦЕНТРАЦИЯ НА ВЪГЛЕРОДНИЯ ДИОКСИД В АТМОСФЕРАТА НА ЛЕКЦИОННА ЗАЛА С ЕСТЕСТВЕНА ВЕНТИЛАЦИЯ

Калинка Величкова, Майя Вацкичева, Пламен Савов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, k.velichkova@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Въглеродният диоксид е един от важните параметри, определящи качеството на въздуха във вътрешната среда на помещенията, включително учебните и лекционните зали. Повишаването му два и понякога доста повече пъти над приетата норма (400 ppm - 1000 ppm, съгласно DIN-1946-6) влияе неблагоприятно върху концентрацията на вниманието и умствена работа на обучаваните и преподавателя. За осигуряване и поддържане на приемливо ниво на концентрацията на CO₂ във въздуха на учебни зали и работни помещения е необходимо да бъде осъществявана постоянно или периодично вентилация на въздуха. В настоящата работа са показани резултатите от изследването на пространственото разпределение на концентрацията на въглеродния диоксид и температурата в две лекционни зали с обем 103 m³ и 300 m³. Освен това е проследена еволюцията на тези параметри в зависимост от броя на хората в залата и интензивността на естественото проветряване.

Ключови думи: Въглероден диоксид, качество на въздуха, естествена вентилация, вътрешна училищна среда

INDOOR CARBON DIOXIDE CONCENTRATION OF A LECTURE HALL WITH NATURAL VENTILATION

Kalinka Velichkova, Maya Vatzkicheva, Plamen Savov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, k.velichkova@mgu.bg

ABSTRACT. Carbon dioxide (CO₂) is one of the important parameters determining air quality in indoor rooms including classrooms and lecture halls. Its raising twice and sometimes a lot more times than the accepted norm (400 ppm - 1000 ppm, according to DIN-1946-6) adversely affects the concentration of attention and mental work of the students and the teacher. To provide and maintain an acceptable level of CO₂ concentration in the air in classrooms and workplaces it is necessary to performed continuously or periodically air ventilation. In the present work the results of the study of the spatial distribution of the carbon dioxide concentration and temperature in two lecture halls with a volume of 103 m³ and 300 m³ were presented. Furthermore, the evolution of these parameters depending on the number of people in the hall and the intensity of natural ventilation was tracked.

Keywords: Carbon dioxide, indoor air quality, natural ventilation.

Въведение

Качеството на въздуха в затворени помещения се определя като необходимия на човек свеж и приятен въздух, който да не вреди на здравето му, да има положително въздействие и да стимулира работата му и да повишава производителността му (Fanger, 2006).

Влиянието на състава на въздуха в закрити помещения върху човешкото здраве е бил обект на целенасочени научни изследвания от преди 150 години, още с възникването на науката за хигиената (Sundell, 2004; Бояджиев, 1990). Чистотата на въздуха в помещения и офиси оказва въздействие и върху качеството на дейността, която работещите в тази среда извършват (Wargocki et al., 2006; Liu et al., 2010; Satish et al., 2012).

Съвременните изисквания за енергийно ефективно ново строителство и обновяване на стари сгради с оглед намаляването на консумацията на енергия и свързаните с това разходи свеждат до минимум естествената обмяна на въздух чрез инфилтрация. Това налага необходимостта от допълнително проветряване на помещенията.

Основните замърсители на атмосферата във вътрешната среда на помещенията имат източници, намиращи се предимно в самите сгради. Това са най-вече обитателите, които издишат обогатен на въглероден диоксид (CO₂) въздух. Съдържанието на въглеродния диоксид в околната среда варира между 0,03 % (300 ppm) и 0,06% (600 ppm) в зависимост от района. В издишания от човек въздух то е около 4,5% (<http://solbulgaria.eu/safe/L%20CO2.pdf>). Други замърсители са емисиите от строителните материали, мебелировката, бои, разтворители и т.н., интензивността на които намалява до нула в рамките на няколко месеца.

Скоростта, с която човек генерира CO₂, зависи от продължителността и интензивността на физическата и мозъчната активности, както и от стреса (Lazović et al., 2015). Продължителното излагане на атмосфера с повишена концентрация на въглероден диоксид причинява влошаване на вниманието, влияе негативно върху степента и продължителността на концентрацията, увеличава разсеяността, води до главоболие и по-бърза уморемост на обитателите (Wargocki et al., 2006).

Поради тази причина концентрацията на въглероден диоксид широко се използва като един от показателите на качеството на вътрешната атмосфера в офиси, работни помещения и особено в училища.

Голямата плътност на обитаване на класните стаи, възрастта на обитателите и целта, за която те са там, прави проблемът за качеството на въздуха във вътрешната среда на училищата изключително важен. Продължителното излагане на замърсен въздух може да доведе до трайни здравословни проблеми. Освен това, качеството на въздуха във вътрешната среда на училищата трябва да подобрява качеството на обучението на учащите се (Fanger, 2006), т.е. способността им да възприемат, разбират и научават преподавания материал, а също и постиженията им. Резултатите от изследванията на Hescong Mahone Group, California Energy Commission (2003) потвърждават положителното влияние на въздух с добри параметри върху здравето на децата и училищната им активност във всички форми.

Концентрацията на CO_2 в атмосферата на затворени помещения може да се намали чрез естественото им или механично им проветряване (вентилация). Естествено проветрени помещения са тези помещения, в които топлинните условия се регулират предимно от самите обитатели чрез отваряне и затваряне на прозорци.

Интензивността на проветряване силно влияе върху темпа на изменение на качеството на въздуха в обитаемото пространство, а също така и на топлинния комфорт на обитателите (Celis et al., 2009).

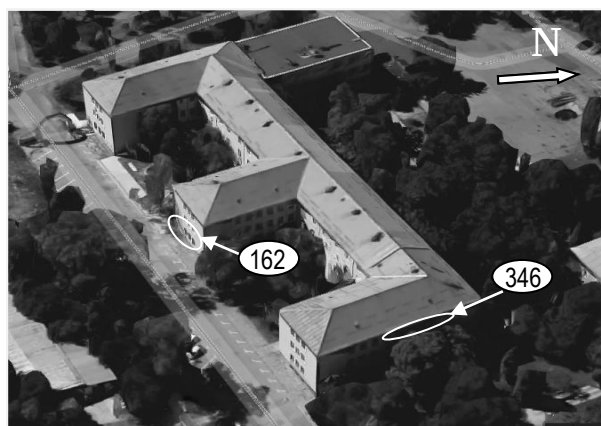
На фона на големия брой изследвания върху факторите и начините, по които те влияят върху качеството на атмосферата във вътрешната среда на училищата, подобни изследвания за качеството на въздуха във висшите учебни заведения липсват.

Целта на настоящата работа е да се анализира качеството на въздуха в две лекционни зали, с различна големина, различно изложение и различна обкръжаваща среда, в продължение на 90 минути при нормални условия (по време на лекция) и в условия на психически стрес (при провеждане на изпит) чрез измерване на концентрацията на въглеродния диоксид и зависимостта ѝ от наличието и интензивността на проветряването и броя на студентите в залата.

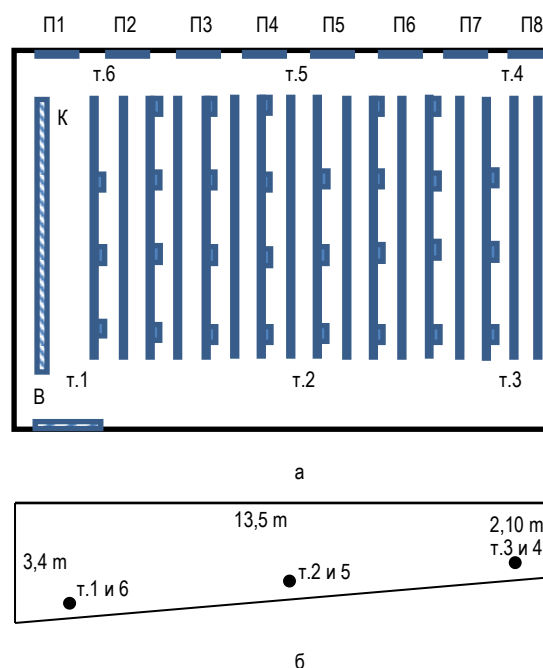
ЕКСПЕРИМЕНТ

Лекционни зали

За експеримента са избрани две лекционни зали на МГУ "Св. Иван Рилски" – зала 162 и 346 на Геолого-проучвателния факултет, които се различават по големина, по изложение, по височина над земното ниво, както и по вида на терена, с който са в съседство. На Фиг. 1 е показано тяхното разположение.



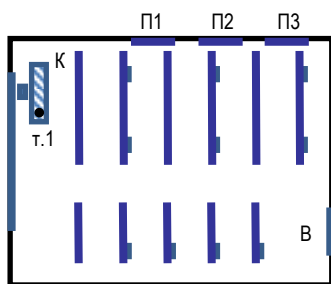
Фиг. 1. Разположение на залите, използвани в експеримента. (<https://www.google.bg/maps>)



Фиг. 2. а) Схема на лекционна зала 346 с означение на заетите места: П1 до П8 – прозорци, К – катедра, В – врата; 1, 2, 3, 4, 5, 6, – точки на измерване; б) профил на залата.

Зала 346 се намира на трети етаж, ориентирана е на североизток, прозорците ѝ гледат към вътрешния двор на Минно-геоложкия университет, с обилна дървесна растителност. Размерите ѝ са: ширина 8,20 m, дължина 13,50 m, височина в мястото на катедрата 3,40 m, височина в срещупложния край на залата 2,10 m. Подът има денивелация 1,30 m. Обемът на стаята е 304 m³. Има 8 прозореца, всеки с отваряема площ 1,2 x 1,2 m². Схема на залата с точките за измерване на концентрацията на въглеродния диоксид е показана на Фиг. 2 а, б.

Лекционна зала 162 се намира на първия етаж и е ориентирана югозападно. Пред трите прозореца (1,2 x 1,2 m² отваряема площ) на залата има асфалтирана улица, която се използва и като паркинг през деня. Зала 162 е три пъти по-малка от зала 346 с размери: ширина 4,80 m, дължина 5,80 m, височина 3,70 m и обем 103 m³. Залата няма денивелация. Схемата ѝ с разпределението на студентите е показана на Фиг. 3.



Фиг. 3. Схема на лекционна зала 162 с означение на заетите места: П1 до П3 - прозорци, К - катедра, В - врата; 1 - точка на измерване.

Използвани уреди и метод за обработка на данните

Измерването на концентрацията на въглероден диоксид е проведено с портативен анализатор-логер на въздуха TROTEC BZ30. Устройството едновременно измерва и записва концентрацията на CO_2 ($0 \div 9999 \text{ ppm}$, с точност $\pm 5 \%$), температурата T ($-5 \div +50^\circ\text{C}$, с точност $\pm 0,1^\circ\text{C}$) и относителната влажност RH ($0,1 \div 99,9 \%$, $\pm 0,1\%$). Беше направена проверка на стойностите на концентрацията на CO_2 , получена чрез осредняване на измерванията върху триминутен и едноминутен интервали. За двата интервала се получиха достатъчно близки стойности. Затова се прие концентрацията на CO_2 да е осреднената върху едноминутен интервал стойност.

Динамичните (времените) зависимости са записани в т.6 в зала 346 и в т.1 за зала 162 (Фиг. 2 и Фиг. 3).

Условия на провеждане на експеримента

Най-напред беше проведено предварително изследване на концентрацията на CO_2 в зала 346 (празна) в 16 различни точки (3 до дъската, по 3 на първата, деветата и шестнадесетата банки и 2 в двата ъгъла в най задната част на залата). Освен това, предварителните измервания покриваха четири различни нива в измерителните точки: под, на височини 45 cm, 85 cm и 190 cm над пода. На базата на анализ на стойностите от тези измервания и изводите от работата на Shuzhao et al. (2010) височината 85 cm над пода на залата (нивото на издишания от присъстващите въздух) бе избрана като подходяща за провеждане на експеримента и шестте точки, показани на Фиг. 2.

Измеренията в зала 346 са направени при следните условия (режими): празна зала и затворени прозорци (M1); празна зала и всички прозорци отворени (M2); 31 човека в залата и затворени прозорци (M3); 31 човека и проветряване само с осми (П8) отворен прозорец (M4); 27 човека и проветряване с първи (П1) и осми прозорец (M5); 25 човека и проветряване с първи, четвърти (П4) и осми прозорец (M6). Две изследвания са проведени по време на лекция през март (15.03.2016 г. и 18.03.2016 г.) и две – по време на изпит през май (31.05.2016 г.) и юни (06.06.2016 г.). През март времето беше топло и сухо ($T = 21 \div 22^\circ\text{C}$, RH = $28 \div 29 \%$), а през май-юни – топло, с по-висока влажност ($T = 23 \div 24^\circ\text{C}$, RH = $55 \div 56 \%$).

Поведението на концентрацията на CO_2 във времето е проследено след започването на часа (изпит, лекция) в

отсъствие на вентилация и при вентилация с различна интензивност – при условие M4, M5 и M6.

В 162 зала е изследвано само времевото поведение на концентрацията на CO_2 по време на изпит при проветрявана зала само с един (П3) отворен прозорец. Експериментът е проведен на 01.06.2016 г. ($T = 23^\circ\text{C}$, RH = 56%).

Студентите са разпределени равномерно по време на изпит (Фиг. 2, а, Фиг. 3) а по време на лекция бяха заети първите банки.

Метод на обработка

При анализа на експерименталните данни допуснахме, че въздухът в залите е добре смесен (хомогенен). Концентрацията на CO_2 в началото на измерването е отбелязана с C_0 . Въглеродният диоксид в залите се определя от издишания от обитателите CO_2 , характеризирани чрез скоростта на генерация (G); въглеродния диоксид, който се втича в стаята отвън, характеризирани с концентрацията C_v , и въглеродния диоксид, който изтича от стаята навън, характеризирани с концентрацията C . Уравнението за масовия баланс е

$$VdC = Gdt + QC_vdt - QCd t, \quad (1)$$

където Q е обмененият с външната среда въздушен поток за време една секунда.

Разгледани са два частни случая:

1. В залата има студенти и не се проветрява ($Q = 0$). Уравнението на масовия баланс има вида

$$VdC = Gdt. \quad (2)$$

Ако приемем, че скоростта на генериране на CO_2 не се променя с фактори, зависещи от времето, решението е

$$C = C_0 + \frac{G}{V}t. \quad (3)$$

2. Залата се проветрява ($Q \neq 0$). Тогава концентрацията на въглеродния диоксид ще се изменя експоненциално с времето

$$C = C_v + \frac{G}{V} - \left(C_v + \frac{G}{V} - C_0 \right) e^{-\frac{Q}{V}t}. \quad (4)$$

Чрез апроксимация на експерименталните данни в режим M3 може да се оцени скоростта на генериране G на CO_2 , а в режим M4, M5 и M6 – скоростта на обемния поток Q .

Резултати и дискусия

Измервания на CO_2 в измерителните точки

Резултатите от измерванията на CO_2 в различни точки на зала 346 са представени в Таблица 1.

Таблица 1.

Концентрация на CO₂ в шестте точки на измерване. Условията на експеримента и съответните им означения са описани в текста.

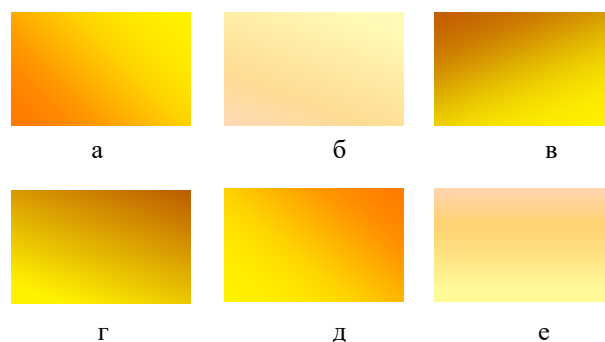
31.05.2016 г., зала 346, 11-13 h, 15 човека, изпит						
Точка на измерване	CO ₂ , ppm					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	581	-	929	956	722	-
2	516	-	922	991	712	-
3	544	-	911	908	721	-
4	550	-	858	792	701	-
5	515	-	849	740	692	-
6	516	-	894	735	639	-
средно	537	-	893	854	698	-
отвън	450					
06.06.2016 г., зала 346, 10 -12 h, 31 човека, изпит						
1	520	452	854	960	612	493
2	510	446	881	993	622	504
3	485	432	928	1012	666	515
4	467	427	981	1116	691	535
5	467	434	1018	1107	664	546
6	471	435	1040	1048	622	537
средно	487	438	950	1039	646	523
отвън	400					

Разпределението на CO₂ от опита на 31.05 е сравнително равномерно в залата. Ако всеки присъстващ отделя при нормално състояние по 200 ml/min, както е показано от Дубровский (2002), и този издишан CO₂ се разпределя равномерно в залата, то изменението в концентрацията на отделните места ще се повиши от 364 ppm до 483 ppm. Както се вижда, това е повече от изменението в съответната измерителна точка, които са в интервала 308 – 406 ppm. Следователно хората отделят малко по-малко от посоченото в литературата. Това показва, че в рамките на грешката нямаме друг източник на CO₂, освен присъстващите в залата хора. От данните се вижда също, че след отварянето на П8 за 13 минути става преразпределение на CO₂ в залата, при това в местата, близки до външната стена, тя намалява, а в другите точки слабо нараства, т.е. по-замърсени се оказват местата до вътрешната стена. Отварянето на още един (П1) прозорец допълнително намалява концентрацията на CO₂ с 9% до 14%.

За нагледност разпределението на концентрацията на CO₂ в измерителните точки, отчетени на 06.06, е показано качествено на Фиг. 4. От сравняването на стойностите в Табл. 1 ясно се вижда, че нарастването на концентрацията на CO₂ в залата е по-силно, отколкото това в експеримента от 31.05, където броят на обитателните е два пъти по-малък. Втората основна разлика е в динамиката на разпределението на CO₂. Да отбележим, че поради малкия брой студенти на 31.05, макар и равномерно разпределени, те са настанени до 9 банка включително, докато на 06.06 – те заемат местата до 16 банка включително, т.е. цялата зала.

Разпределението на CO₂ в залата преди началото на часа е близко до равномерното, подобно на отчетеното за

31.05, но с малко по-ниски стойности, поради по-ниската концентрация на CO₂ във външната среда. По-високо е съдържанието на CO₂ в ниската вътрешна страна на залата, към стената (т.1). Намаляването на CO₂ към двата съседни ъгъла е с около 10%, като концентрацията на газа покрай външната стена (в т.4, т.5 и т.6) слабо намалява в посока към по-високия край на залата. Това е логично, като се вземе предвид, че CO₂ е по-тежък от въздуха и се утаява в по-ниските места на помещението. Началното проветряване на залата не променя пространственото разпределение на концентрацията на CO₂, а само понижава стойността ѝ, като все пак тя остава с около 10 % по-висока от външната. Най-голяма е разликата на съдържанието на CO₂ (до 5,5 %) между т.1 и т.5, която е наполовина от случая на непроветрената зала (11 %).



Фиг. 4. Качествено представяне на концентрацията на CO₂ и изменението ѝ при промяна на условията: а) М1; б) М2; в) М3; г) М4; д) М5; е) М6. По-тъмните участъци отговарят на по-високи стойности на CO₂.

По време на 21-минутната работа на студентите в невентилираната зала концентрацията на CO₂ силно нараства за всяка от измерителните точки (от 1,5 пъти за т.1 до 2,4 пъти за т.6), а пространственото ѝ разпределение се променя, като по-високата концентрация е в по-ниската част на стаята, но до прозорците (Фиг. 4, в). Неравномерното нарастване на концентрацията CO₂ в различните точки и промяната на разпределението ѝ спрямо началото на часа е свързана с по-високата температура на издишания въздух от тази в залата и причинената от температурната разлика и различната концентрация на CO₂ циркуляция.

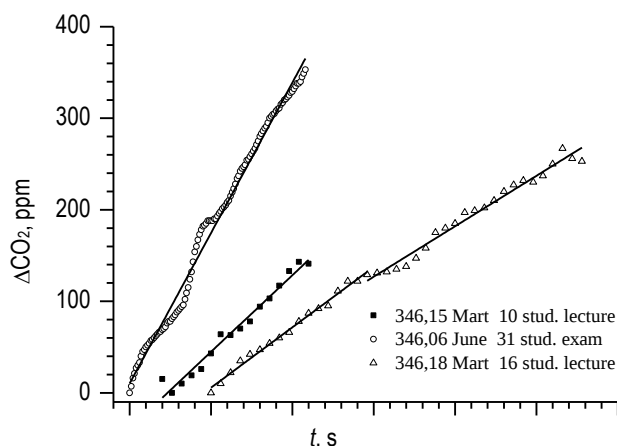
Първото не много интензивно проветряване на залата при непроменен брой студенти променя отново пространственото разпределение на CO₂, като по-замърсени се оказват местата до външната стена (т.4, т.5 и т.6) и най-замърсено е мястото в близост до отворения прозорец – т.6 (Фиг. 4, г), където концентрацията на въглеродния диоксид достига с 16% по-висока стойност. Разпределението на температурата в залата повтаря това на CO₂, а интервалът, в който тя се изменя, е до 0,7°C. Освен това, температурата в залата става по-висока от тази на външния въздух. Разликата във вътрешната и външната температури води до възникването на движение на въздуха поради т.н. коминен ефект. Отварянето и на П1 12 минути по-късно води до намаляване на концентрацията на CO₂ с 34 – 40 %, по-силно изразено в местата до външната стена на залата, като не променя разпределението ѝ. Температурата има почти равномерно

разпределение, с $0,2 - 0,3^{\circ}\text{C}$ е по-висока до външната стена и горният външен ъгъл на залата. Известно е, че максималната дълбочина, до която въздухът прониква в залата, при едностранен отвор е два пъти височината ѝ на мястото където е прозорецът, т.е. около 4 m (http://www.eneffect.bg/images/upload/GV-4_MP_zmg.pdf). Тъй като основата на П8 е на пода, по-студеният ($T = 23^{\circ}\text{C}$) и свеж външен въздух достига близките до вътрешната стена места, а по-топлият и обогатен на CO_2 въздух, издишан от обитателите, се изтласква към отворения прозорец и навън. Тези движения много добре се съгласуват с експерименталните данни за разпределението на температурата и концентрацията на CO_2 в режим М4 и М5. Отварянето на средния (П4) прозорец не променя характерът на разпределението на CO_2 в залата, но допълнително понижава концентрацията му с още 14 – 23 % - стойностите на концентрацията на въглеродния диоксид достигат нива с около 10% по-високи от тези в режим М2 и такова, каквото е било след началното отваряне на залата – режим М1.

Като използваме средните стойности на C_v , C и уравнението на масовия баланс сме оценили коефициента на генерация G - 506 $\text{ml}/(\text{min.p})$ за 31.05 и 236 $\text{ml}/(\text{min.p})$ за 06.06; скоростта на въздушния поток Q в режим М4 - съответно 22,6 $\ell/(\text{s.p})$ и 3,9 $\ell/(\text{s.p})$; в режим М5 - съответно 31 $\ell/(\text{s.p})$ и 30 $\ell/(\text{s.p})$; и режим М6 - 42 $\ell/(\text{s.p})$. Оценките показват, че в експеримента на 06.06, когато плътността на обитаване е два пъти по-голяма, проветряване само с един прозорец е абсолютно недостатъчно за осигуряване на свеж въздух. Режимите М5 и М6, обаче, осигуряват достатъчно добро освежаване, тъй като са 4-6 пъти над необходимата норма от $7 \div 10 \ell/(\text{s.p})$ (ASHRAE 62-1989).

Динамични измервания при условие М3

Поведението на концентрацията на CO_2 с времето в режим М3 е показано на Фиг. 5.



Фиг. 5. Изменение на концентрацията на CO_2 (над фона) в режим М3. За прегледност, кривите са отместени по оста на времето. Едно деление по оста на времето е равно на 100 s.

Както и трябва да се очаква, концентрацията на CO_2 нараства с по-висока скорост, когато броят на обитателите в залата е по-голям (в случая 2 - 3 пъти). Прави впечатление, че нарастването на CO_2 е по-голямо за 15.03 при плътност $0,03 \text{ m}^{-3}$, отколкото за 18.03 с плътност $0,053 \text{ m}^{-3}$. Това може да се дължи на факта, че 15 - 20

минути след начална лекция студентите са започнали да решават задачи. Възможно е по-интензивната дейност на мозъка на студентите по време на изпит да дава малко по-голям принос в нарастването на CO_2 в залата и на 06.06. Изчислените стойности на скоростта на генерация на CO_2 са представени в Таблица 2.

Таблица 2

Температура, влажност и скорост на генериране на CO_2 в режим М3 за зала 346.

Дата	час	$T, ^{\circ}\text{C}$	$\text{RH } \%$	$G, \text{ ml}/(\text{min.p})$
15.03.16, лекция, неравномерно разпределени, повече долу	10:00- 10:15	23,5 - 22,4	25,8 - 28,4	299
18.03.16 лекция	9:15 - 9:30	21,0 - 21,1	26,8 - 28,7	167
неравномерно разпределени, повече долу	9:31 - 9:52	21,1 - 22,5	28,7- 29,3	140
06.06.16 изпит (31 човека) равномерно разпределени	10:00 - 10:21	23,4 - 24,3	55,6 - 55,4	188

Отличието в стойностите на G на различните дати според нас са свързани главно с различния начин на разпределение на студентите в залата, динамиката на температурата и движението на издишания CO_2 в резултат на температурния градиент и дифузията, и в по-малка степен с разпределението на CO_2 преди началото на часа. Високата стойност на G на 15.03 може да се дължи на факта, че по време на лекция студентите заемат по-предните банки, разположени в ниската част на залата, където е поставен уредът.

Както се вижда от Фиг. 5 скоростта на генериране на CO_2 намалява след 15-тата минута, в случая на провеждане на лекция на 18.03. Това може да се дължи на понижаване на мозъчната активност на обучаваните по време на лекция – те са предимно пасивни участници в учебния процес и не са умствено ангажирани. Освен това, получената скорост на генерация е осреднената по всички хора, така че вероятно относителният дял на активните в часа студенти е сравнително малък. За нас, преподавателите, това означава да търсим начини, даже по време на лекция, да активираме студентите в процеса на тяхното обучение.

Експериментите на 15.03 и 06.06 в режим М3 са с по-малка продължителност (15 – 20 минути). Както се вижда от Табл. 2, отчетената скорост на генерация на 18.03 за такъв интервал също не се променя. Така че е възможно изменение в G да не може да се установи и поради късия интервал от време, в който се провежда изследването.

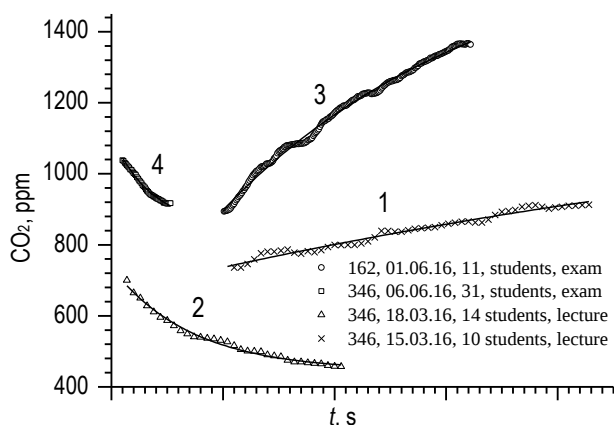
Считаме, че $G = 188 \text{ ml}/(\text{min.p})$ е представителна, тъй като тя е определена при равномерно разпределение на студентите в залата, при това с достатъчно висока плътност. Тази стойност е много сходна с тази, показана от Дубровский (2002). Отличието от нея може да се дължи на

неравномерното разпределение на концентрацията CO_2 и занижената ѝ стойност в мястото, където е измерена времевата зависимост. За това свидетелства и разликата между стойностите на G ($236 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{p})$), получени от нединамичните и динамичните измервания.

Възможно е G да се променя с времето и поради други фактори. Обаче, както бе установено по-горе, единственият източник на CO_2 са хората в залата, така че каквато и промяна да става с G е поради процеси, които протичат в хората.

Динамични измервания при условие М4

Времевата зависимост при един отворен прозорец (режим М4) за всички изследвани случаи е показана на Фиг. 6.



Фиг. 6. Времева зависимост на концентрацията на CO_2 в пълна зала в режим М4. За прегледност, кривите са отместени по оста на времето. Едно деление на оста на времето е равно на 100 s.

Първото което се вижда от сравнението на криви 1 и 3 е, че при равен брой студенти концентрацията на CO_2 в малката зала достига близо 1,5 пъти по-високи стойности и при това нараства 7 пъти по-бързо. Това е логично като се вземе предвид, че плътността на студентите в зала 162, $0,107 \text{ m}^{-3}$, е 3 пъти по-висока от тази на студентите в зала 346 с плътност $0,033 \text{ m}^{-3}$. Принос може да има и по-високата скорост на генерация на CO_2 от студентите в 162 зала, които са на изпит.

Подобна зависимост от плътността на обитателите може да се види и от двете намаляващи линии на CO_2 (криви 2 и 4). Концентрацията на CO_2 в по-плътно обитаваната зала ($0,103 \text{ m}^{-3}$) е с около 30 % по-висока и намалява по-бързо, вероятно поради по-високия градиент на CO_2 . Независимо от ниската интензивност на вентилацията, продължителното проветряване понижава стойностите на CO_2 до нормалното и както ясно се вижда от крива 2, дори има тенденция към установяване на стационарна стойност.

Фактът, че зависимостта на CO_2 е нарастваща в два от експериментите (криви 1 и 3) показва, че обмененият CO_2 с външната среда е по-малък от генерирания от обитателите. Но и тук може да се очаква (по-ясно при крива 1), че при продължително проветряване в режим М4 нарастването на CO_2 се забавя и се стреми към някаква

постоянна стойност, при което издишаният въглероден диоксид компенсира намаляването му в резултат на обменения с външната среда въздушен поток. Все пак стойностите на CO_2 в 162 зала остават високи, 1400 ppm, и режим на проветряване чрез само един отворен прозорец за тази зала, заета с 30% от капацитета си, е абсолютно неподходящ.

Стойностите на въздушните потоци, изчислени от времевите зависимости, са показани в Таблица 3.

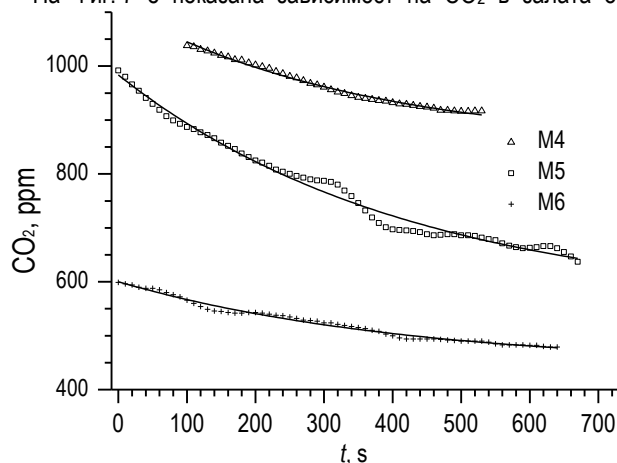
Таблица 3

Температура, влажност и обменен въздушен поток Q

Дата	час	$T, ^\circ\text{C}$	$\text{RH}\%$	$Q, \text{l/s}$
15.03.16, 346 лекция, П8, М4	10:35- 11:25	22,6 - 21,7	27,5 - 30,9	36,3
18.03.16, 346 лекция, П8, М4	9:52- 10:34	21,8- 19,7	29,3 -26,7	417
01.06.16, 162 изпит, П3, М4	11:45- 12:21	22,8- 24,0	55,9- 55,5	44
06.06.16, 346 изпит, П8, М4	10:00- 10:21	25,1- 25,2	55,6- 55,4	847
06.06.16, 346 изпит, П1 и П8, М5	10:49- 11:00	25,7- 24,7	53,7- 53,3	704
06.06.16, 346 изпит, П1, П4, П8, М6	11:07- 11:19	25,1- 24,4	53,0- 56,1	706

Влияние на интензивността на отваряне върху концентрацията на CO_2

На Фиг. 7 е показана зависимост на CO_2 в залата от



интензивността на проветряването.

Фиг. 7. Времева зависимост на концентрацията на CO_2 при различна интензивност на проветряване.

Логично с увеличаване на броя на отворените прозорци концентрацията на CO_2 намалява и при максималната вентилация (режим М6) достига стойности, подобни на тези в началото на часа. Потокът, пресметнат в този случай, 706 l/s , е равна на потока в режим М5, което показва, че при плътност на зала 346 от $0,103 \text{ m}^{-3}$ режим М5 се оказва подходящ за осигуряване на среда с добро качество на въздуха. Вероятно този режим би бил подходящ и за зала 162, която има подобна плътност, $0,107 \text{ m}^{-3}$.

Заклучение

Осигуряването на атмосфера с добро качество в учебните заведения е необходимо условие за приятна и ефективна работа на студентите по време на учебния процес. Нашето изследване показва, че естествената вентилация при обичайната заетост на изследваните лекционни зали е напълно подходяща за тази цел, стига да е съобразена с броя на студентите. Режим М4 с поне 25 минутна вентилация е добро решение за зала 346, при плътност на зала около $0,05 \text{ m}^{-3}$ (това е само 10% от капацитета на залата) и неравномерно разпределение на студентите, както е по време на лекции. С увеличаване на броя на обитателите (критична плътност на обитаване повече от $0,1 \text{ m}^{-3}$, 20% от капацитета на залата), е необходимо да се отвори и втори прозорец. За зала 162, заета с 40 % от капацитета си, режим М4 не е достатъчен. Затова би било добре, ако се използва и друга механична вентилация, особено вземайки предвид, че се намира близо до пътя и нивото на шума е по-високо.

Необходимо е по-детайлно изследване на динамиката на разпределението на температурата и въглеродния диоксид, за да се отчете влиянието ѝ при изчисляването на скоростта на генерация. Също така е необходимо динамичните измервания на концентрацията на CO_2 да се провеждат за по-голям интервал от време, за да се види дали намаляването на скоростта на генерация G при по-продължителните измервания е реално. По-точното отчитане на скоростта на генерация би дало възможност да се установят промени в интензивността на мозъчната дейност при нормални условия (лекция) и условия на стрес (изпит).

Възможността намаляването на скоростта на генерация да се дължи на намаляването на мозъчната активност на обучаваните по време на лекция, налага необходимостта от прилагане на нови методи, чрез които да направим студентите активни участници в процеса на тяхното обучение.

Предвиждаме в бъдеще да проведем подобно изследване през зимата, когато проветряването по време на часа е значително по-слабо от съображения за по-добър топлинен комфорт на обучаваните.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на Фонд научни изследвания за финансовата подкрепа чрез договор ДФНИ 02/19.

Литература

- Бояджиев, В. *Ръководство за практически упражнения по хигиена*. С., МФ, 1990. – 175 с.
- Дубровский В. И. *Спортивная медицина*. Изд. 2-ое доп. М., Владос, 2002. – 512 с.
- СОЛ България” ЕАД. *Информационен лист за безопасност*, <http://solbulgaria.eu/safe/L%20CO2.pdf>.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). *Ventilation for acceptable indoor air quality*. ASHRAE-Standard 62-1989, Atlanta, 1989.
- Celis M. S., Potvin A., Tardif M. Air Temperature and CO_2 Variations in a Naturally Ventilated Classroom under a Nordic Climate. In: *Architecture, Energy and Occupant's Perspective. Proceeding of the 26th International Conference on Passive and Low Energy Architecture - PLEA2009*. (Ed. Claude Demers and André Potvin). Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada, 2009.
- Fanger P. O. What is IAQ. *Indoor Air*, 16, 2006. - 328-334.
- Lazović I., M. Jovašević-Stoqnović, M. Živković, V. Tasić, Ž. Stefanović. PM and CO_2 variability and relationship in different school environments. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 21, 1, 2015. – 179-187.
- Liu S., H. Yoshino, A. Mochida. Measurement of temperature distribution and CO_2 concentration in a space-heated classroom. In: *Proceedings of 2010 AIVC International Conference*, 2010. – 800-814.
- Sundell J., On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*. 14, 2004. – 51-58.
- Satish U., M. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert, W. Fisk. Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO_2 concentrations on human decision-making performance. *Environ. Health Perspect.* 120, 2012. – 1671-1677.
- Liu S., H. Yoshino, A. Mochida. Measurement of temperature distribution and CO_2 concentration in a space-heated classroom. In: *Proceedings of 2010 AIVC International Conference*, 2010. – 800-814.
- Wargocki P., D. P. Wyon. Effects of HVAC on student performance. *ASHRAE Journal*, 2006. – 22-28.
- <https://www.google.bg/maps>
- http://www.eneffect.bg/images/upload/GV-4_MP_zmg.pdf

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Физика“.