

Ю. С. Юркевич, О. Т. Возняк, О. О. Савченко, Х. В. Миронюк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теплогазопостачання та вентиляції

## ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ В ПРИМІЩЕННЯХ КЛАСІВ

© Юркевич Ю. С., Возняк О. Т., Савченко О. О., Миронюк Х. В., 2018

Дослідження стану повітряного середовища в приміщеннях класів є дуже актуальним, оскільки близько 20 % загальної кількості населення проводить значну частину свого часу в дошкільних та шкільних закладах. Недотримання допустимих параметрів мікроклімату у приміщеннях класів, зокрема, внаслідок високої концентрації CO<sub>2</sub>, призводить до погіршення самопочуття та зниження працездатності учнів, а також до недостатнього засвоєння ними навчального матеріалу. Внаслідок перевищення допустимої концентрації CO<sub>2</sub> у зовнішньому повітрі великих міст продуктивність системи вентиляції приміщень, розрахована за асиміляцією CO<sub>2</sub>, досягає значних величин. Наведено результати аналітичних досліджень зміни концентрації CO<sub>2</sub> в приміщеннях класів протягом всього періоду перебування в них учнів при трьох схемах організації повітрообміну. Встановлено, що лише механічна припливно-витяжна вентиляція з нормою повітрообміну 30 м<sup>3</sup>/год на особу забезпечує належні санітарно-гігієнічні умови в приміщеннях класів.

Ключові слова: діоксид вуглецю, приміщення класу, повітрообмін, механічна система вентиляції, оптимальні параметри мікроклімату.

Yu. Yurkevych, O. Voznyak, O. Savchenko, Kh. Myroniuk  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Heat, Gas Supply and Ventilation

## DETERMINATION OF CARBON DIOXIDE CONCENTRATION IN CLASSES

© Yurkevych Yu., Voznyak O., Savchenko O., Myroniuk Kh., 2018

In the last decade, modernization of school buildings in Ukraine is being carried out. Thermorenovation measures such as thermal insulation of exterior walls and replacement of existing windows are most often used. Installing hermetic metal-plastic windows significantly reduces the heat loss of premises, but leads to disturbance of air regime, as outdoor air infiltration is often the only source of external fresh air supply. The study of the air environment in the classrooms is very relevant, since about 20 % of the total population spends a significant part of their day in preschool and school settings. Failure to comply of microclimate parameters in classrooms, in particular due to the increase of CO<sub>2</sub> concentration, leads to deterioration of the state of health and workability of students, as well as insufficient mastering of the educational material. Due to the deterioration of the environmental state of the environment, the concentration of CO<sub>2</sub> in the outside air of large cities often exceeds the permissible values. This leads to an increase in the productivity of ventilation systems, designed to assimilate CO<sub>2</sub>. The article presents the results of analytical studies of changes in

**CO<sub>2</sub> concentration in classrooms during the entire period of their stay in the students under the three schemes of organization of air exchange, namely when closed windows during the entire training period and without ventilation; when ventilated class during each breaks and in the presence of inflow and exhaust ventilation in the classrooms. The analysis of the air environment was carried out for the most unfavorable conditions at negative external air temperatures. As a result of the research, it was established that only in the presence of mechanical inflow and exhaust ventilation with an air exchange rate of 30 m<sup>3</sup>/hour per person provides adequate sanitary and hygienic conditions in the classrooms.**

**Keywords – carbon dioxide, classroom, air exchange, mechanical ventilation system, optimal microclimate parameters.**

**Вступ.** За даними Держстату України станом на 2017–2018 навчальний рік в Україні налічувалося 16200 загальноосвітніх шкіл, в яких навчалося понад 3,9 млн учнів (без урахування тимчасово окупованих територій Криму та Донецької і Луганської області) [1].

У школі діти проводять значну частину часу, тому підтримання належних умов мікроклімату, які б забезпечували добре самопочуття, є важливим соціальним завданням.

Протягом останнього десятиліття в Україні значні кошти було вкладено в ремонт та модернізацію шкільних будівель. Передусім увагу звертали на термомодернізацію шкіл, яка передбачала як додаткове утеплення зовнішніх стін, так і заміну старих вікон сучасними металопластиковими. Проте заміна старих вікон на герметичні металопластикові призводить до порушення повітряного режиму приміщень класів, оскільки за відсутності механічної припливно-витяжної системи вентиляції інфільтрація зовнішнього повітря є єдиним джерелом надходження свіжого зовнішнього повітря.

За кордоном діоксид вуглецю разом з оксидами азоту, оксидом вуглецю, діоксидом сірки та леткими органічними сполуками є типовою забруднювальною речовиною, яка підлягає врахуванню під час проектування систем вентиляції та кондиціонування повітря [2]. Що більше вуглекислого газу у повітрі, то важче зосередитися та виконати навчальне навантаження. Знаючи про це, уряд США рекомендує школам підтримувати рівень CO<sub>2</sub> не вище ніж 600 ppm. У Росії відповідно до ГОСТ оптимальною для дитячих закладів концентрацією CO<sub>2</sub> повинна бути не більше ніж 800 ppm [3]. Проте на практиці не лише американській, але і російській рекомендований рівень є недосяжним для багатьох шкіл. Натурні дослідження, проведені у школах Німеччини, показали, що більшу частину навчального періоду кількість вуглекислого газу у повітря перевищує 1500 ppm, а деколи наближається до 2500 ppm [4, 5].

У Державних санітарних правилах і нормах щодо влаштування, утримання загальноосвітніх навчальних закладів та організації навчально-виховного процесу [6] йдеться про необхідність проведення лабораторних досліджень. Під час цих досліджень слід проводити у приміщеннях вимірювання температури повітря, відносної вологості, швидкості руху повітря, радіаційної температури, концентрації CO<sub>2</sub>, CO, формальдегіду та інших речовин. Лабораторні дослідження та інструментальні виміри слід проводити у динаміці навчального дня, а саме – перед першим уроком і в кінці останнього уроку. Проте конкретні значення допустимої концентрації CO<sub>2</sub> і CO не наводяться. У цьому ж документі вказується, що приміщення класів і кабінети слід провітрювати на перервах, а рекреації – під час уроків. Співвідношення площі фрамуг і квартир до площі підлоги навчального приміщення повинна бути не менше 1/150. Фрамугами і квартирками слід користуватися протягом всього року.

**Огляд наукових джерел і публікацій.** Відповідно до [6], до початку занять і після їх закінчення необхідно здійснювати наскрізне провітрювання навчальних приміщень. Тривалість наскрізного провітрювання визначається погодними умовами згідно з табл. 1.

Під час розрахунку продуктивності системи вентиляції важливе значення має концентрація CO<sub>2</sub> не лише у внутрішньому, але й у зовнішньому повітрі.

Європейський стандарт EN 13779 “Ventilation for residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems” [7] як загальної базової рекомендації пропонує приймати концентрацію вуглекислого газу у сільській місцевості 350 ppm, у невеликих містах 400 ppm, у центральній частині міст 450 ppm. Насправді ця концентрація є вищою.

Таблиця 1

**Тривалість провітрювання шкільних приміщень [6]**

Температура зовнішнього повітря, °С	Тривалість провітрювання приміщень, хв	
	на малих перервах	на великих перервах та між змінами
від +10 до +5	4–10	25–35
від +5 до 0	3–7	20–30
від 0 до -5	2–5	15–25
від -5 до -10	1–3	10–15
нижче -10	1–1,5	5–10

Значення ГДК вуглекислого газу у повітрі робочої зони шкільних приміщень у різних країнах світу суттєво різняться (табл. 2) та дозволяють оцінити інтервал концентрацій диоксиду вуглецю від комфортного до незадовільного.

Таблиця 2

**Рекомендована концентрація диоксиду вуглецю у шкільних приміщеннях [8]**

Країна	Норма	Рівень CO <sub>2</sub>
Фінляндія	Стандарт міністерства охорони здоров'я та соціального розвитку, 2003 р.	Якість повітря, ppm: висока – 700; середня – 900; задовільна – 1200
США	Рекомендації по якості повітря у школах департаменту відділу охорони здоров'я США	Граничний рівень 1000 ppm
США	Норми ASHRAE 62-1989 “Вентиляція для нормальної якості повітря”	1000 ppm
США	Рекомендація Американської асоціації промислових гігієністів (ACGIH), 1998 р.	600 ppm
Росія	ГОСТ 30494	500–800 ppm
США	Рекомендація Управління по техніці безпеки та гігієні праці (OSHA), 1994 р.	800 ppm
Великобританія	“Вентиляція у шкільних спорудах. Керівництво по стандартам та проектуванню”, 2006 р.	1500 ppm – гранична норма для навчального дня з 9.00 до 15.30
Нідерланди	Гігієнічні норми “Огляд норм по якості повітря для дитячих садків у Нідерландах”	1000 ppm – гігієнічна норма для дитячих садків; 1200 ppm – гігієнічна норма для шкіл
Естонія	Норми Міністерства по соціальним питанням	1000 ppm – гігієнічна норма для шкіл

У санітарно-гігієнічних рекомендаціях [9] відзначається, що згідно з санітарно-гігієнічними дослідженнями, за концентрації CO<sub>2</sub> менше ніж 800 ppm у людини ідеальне самопочуття, вона є бадьорою. На рівні 1000 ppm кожен другий відчуває духоту, млявість, зниження концентрації, головний біль. За концентрації CO<sub>2</sub> 1000–1400 ppm люди відчувають млявість, проблеми з уважністю і опрацюванням інформації, важке дихання, проблеми з носоглоткою.

**Мета дослідження** полягає у визначенні зміни концентрації CO<sub>2</sub> у приміщеннях класів протягом усього періоду перебування в них учнів за різних способів організації повітрообміну та різній продуктивності системи вентиляції.

**Теоретичні дослідження.** Для визначення концентрації CO<sub>2</sub> використано диференційне рівняння, що запропонував Е. Ленц, а для розрахунків вентиляційних систем впровадив А. Н. Селівестров [10].

Концентрація шкідливих речовин у вентилязованому приміщенні в довільний момент часу може бути визначена за формулою:

$$q = q_{np} + \frac{\bar{G}}{K_p} + \left( q_t - q_{np} - \frac{\bar{G}}{K_p} \right) \cdot e^{-t \cdot K_p}, \quad (1)$$

де  $q$  – концентрація в цей момент часу, мг/м<sup>3</sup>;  $q_{np}$  – концентрація шкідливої речовини у припливному повітрі, мг/м<sup>3</sup>;  $q_t$  – концентрація в початковий момент режиму, що розглядається, мг/м<sup>3</sup>;  $K_p$  – дійсна кратність повітрообміну у приміщенні, 1/год;  $\bar{G}$  – питомі годинні газовиділення на 1 м<sup>3</sup> приміщення, мг/(м<sup>3</sup>·год),  $t$  – час від початку заданого режиму, год.

Питомі годинні газовиділення на 1 м<sup>3</sup> приміщення визначаються як:

$$\bar{G} = \frac{G}{V}, \quad (2)$$

де  $G$  – кількість шкідливої речовини, що виділяється у приміщення, мг/год;  $V$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>.

При розрахунку концентрації CO<sub>2</sub> в якості вихідних приймалися величини, рекомендовані санітарними нормами [6]:

- тривалість уроку – 45 хв;
- тривалість перерв між уроками – 10 хв, перерва після другого уроку – 30 хв;
- заповнення класу – 25 учнів;
- площа класної кімнати при нормі площі на одного учня 2,4 м<sup>2</sup> –  $F = 60$  м<sup>2</sup>;
- об'єм класної кімнати –  $V = 180$  м<sup>3</sup>.

Виділення CO<sub>2</sub> одним учнем дорівнює 14,25 л/год або 27860 мг/год (з розрахунку 19 л/год за легкої праці в аудиторії дорослою людиною з понижуючим коефіцієнтом 0,75 для учнів [11]).

Розрахунки проводилися для шкіл, розташованих у сільській місцевості та великих містах, концентрація CO<sub>2</sub> в зовнішньому повітрі для яких приймалася відповідно 350 ppm та 450 ppm.

Аналіз стану повітряного середовища проводився для найнесприятливіших умов за від'ємних температур зовнішнього повітря. У такому разі розглядалися такі три режими організації вентиляції приміщень класів.

**I режим.** Вікна зачинені протягом усього періоду навчання, провітрювання не проводиться. Кратність фонові вентиляції становить  $K = 0,1$  1/год. У цьому випадку концентрація CO<sub>2</sub> вже в кінці першого уроку буде становити 1773 ppm, що істотно перевищує рекомендовану величину у 800 ppm, а до кінця сьомого уроку досягне неприпустимого значення у 9985 ppm, яке у 12,5 разів перевищує норму (див. рис 1).

**II режим.** Кратність фонові вентиляції становить  $K = 0,1$  1/год. Під час кожної з перерв проводиться провітрювання, всі учні виходять з класу. Кратність вентиляції під час провітрювання становить  $K = 3,0$  1/год. За такого режиму роботи стан повітряного середовища у кімнаті класу є кращим, ніж у попередньому випадку (рис. 2). Проте концентрація CO<sub>2</sub> залишається високою, вона суттєво перевищує рекомендовані значення (табл. 2). Максимальні значення концентрації CO<sub>2</sub> досягаються в кінці цього періоду навчання і становлять 3466 ppm для сільської місцевості і 3565 ppm для міста.

Треба звернути увагу на те, що при розрахунку приймалося припущення, що провітрювання здійснювалося протягом усієї перерви. Якщо тривалість провітрювання приймати згідно з рекомендаціями [6] (табл. 1), то концентрація CO<sub>2</sub> у приміщенні класу буде ще вищою.

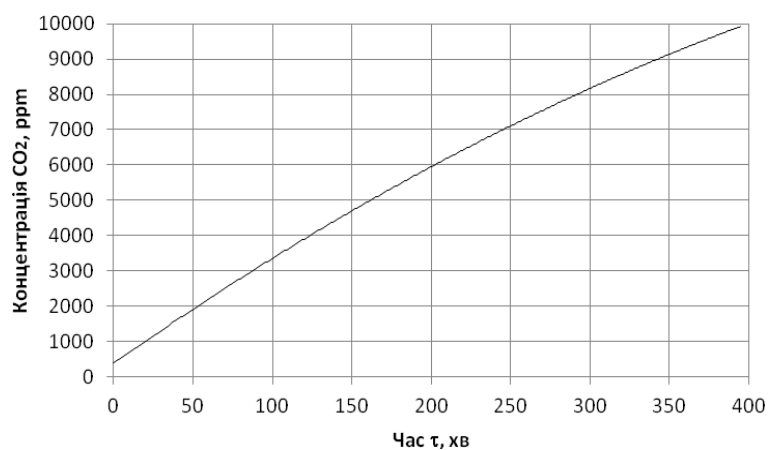


Рис. 1. Зміна концентрації диоксиду вуглецю в приміщенні класу протягом періоду навчання для I режиму вентиляції

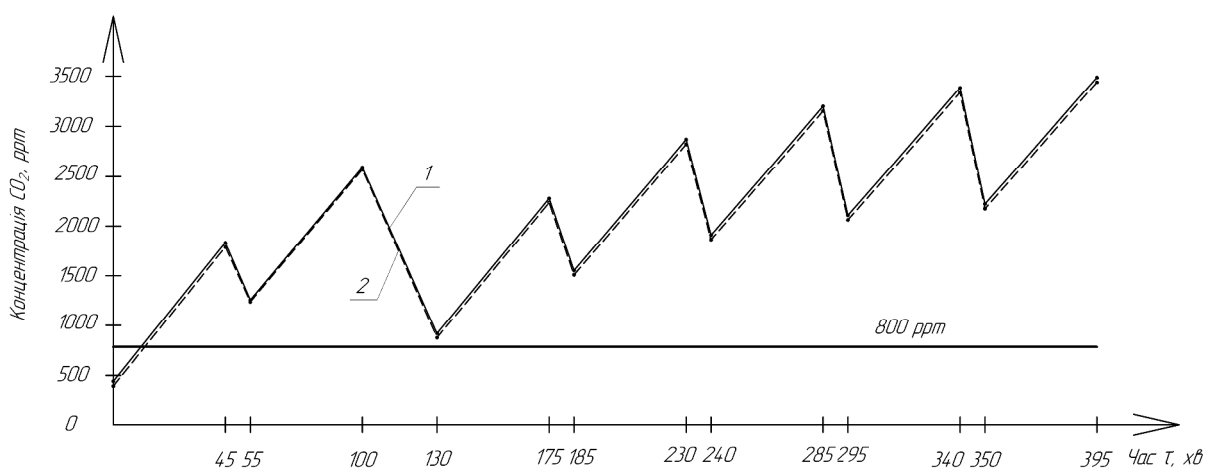


Рис. 2. Зміна концентрація диоксиду вуглецю при II режимі організації повітрообміну: 1 – при концентрації  $CO_2$  у зовнішньому повітря 450 ppm; 2 – при концентрації  $CO_2$  у зовнішньому повітря 330 ppm

Таблиця 2

**Концентрація диоксиду вуглецю в момент часу при II-му режимі вентиляції**

Час $\tau$ від початку заняття, хв	Сільська місцевість		Велике місто	
	мг/м <sup>3</sup>	ppm	мг/м <sup>3</sup>	ppm
0	685	350	880	450
45	3470	1773	3665	1872
55	2372	1212	2568	1312
100	5036	2573	5232	2673
130	1655	845	1850	945
175	4371	2233	4566	2333
185	2919	1491	3114	1591
230	5544	2832	5738	2932
240	3630	1855	3823	1954
285	6204	3170	6395	3268
295	4029	2059	4222	2157
340	6574	3359	6767	3458
350	4254	2173	4448	2273
395	6723	3466	6976	3565

III режим. Приміщення класів обладнані припливно-витяжною вентиляцією, яка забезпечує розрахункову витрату припливного повітря  $20 \text{ м}^3/\text{год}$  на особу, що відповідає вимогам ДБН В.2.2-3 [12]. Ця витрата припливного повітря відповідає для прийнятих умов кратності  $K = 2,78 \text{ 1/год}$ . Як видно з графіку на рис. 3, навіть при початковій концентрації  $\text{CO}_2$  у  $350 \text{ ppm}$  (що відповідає умовам сільської місцевості) вже з 25 хвилини від початку занять концентрація  $\text{CO}_2$  в класі перевищує рекомендоване значення у  $800 \text{ ppm}$ , а через 100 хв концентрації  $\text{CO}_2$  набуває асмптитичного характеру і до кінця занять досягає значення у  $1060 \text{ ppm}$ .

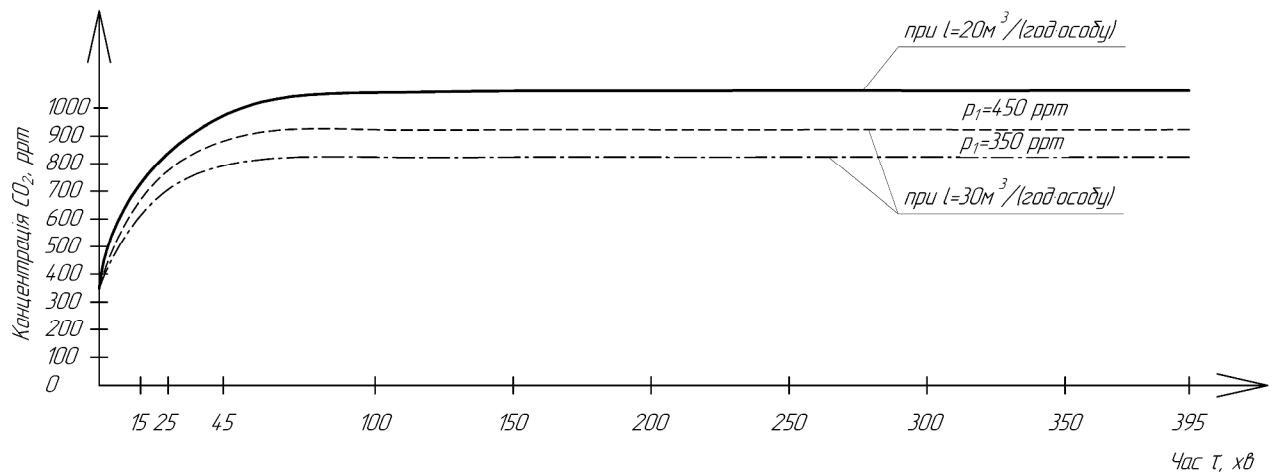


Рис. 3. Зміна концентрація диоксиду вуглецю при III режимі вентиляції

Якщо ж припливно-витяжна вентиляція буде забезпечувати розрахункову витрату припливного повітря у  $30 \text{ м}^3/\text{год}$  на особу, що відповідає вимогам ряду норм Євросоюзу, то кратність повітрообміну в класі повинна становити  $K = 4,17 \text{ 1/год}$ . У цьому випадку для умов сільської місцевості максимальна концентрація  $\text{CO}_2$  в кінці занять становитиме  $824 \text{ ppm}$  (рис. 3), що лише на 3 % перевищує рекомендоване значення. Для умов великих міст максимальна концентрація  $\text{CO}_2$  в кінці занять буде становити  $923 \text{ ppm}$ , а це вже на 15,5 % перевищує норму.

Для приміщення об'ємом  $180 \text{ м}^3$  розрахунковий повітрообмін при кратності  $K = 4,17 \text{ 1/год}$  буде становити  $750 \text{ м}^3/\text{год}$ . Такий повітрообмін може бути забезпечений не лише за наявності централізованої припливно-витяжної вентиляційної установки, але і за рахунок побутових припливно-витяжних установок.

**Висновки.** Проведені розрахунки показують, що для досягнення допустимої концентрації  $\text{CO}_2$  в приміщеннях класів недостатньо проводити провітрювання під час перерв між уроками. Навіть при роботі механічної вентиляції з продуктивністю, визначеною за нормою повітрообміну  $20 \text{ м}^3/\text{год}$  на особу, концентрація  $\text{CO}_2$  буде перевищувати допустимі значення. І лише повітрообмін, визначений за нормами країн Євросоюзу ( $30 \text{ м}^3/\text{год}$  на особу) забезпечує належні санітарно-гігієнічні умови в приміщеннях класів.

1. Державна служба статистики України. Загальноосвітні та професійно-технічні навчальні заклади. Статистичний збірник. – К., 2018. – 134 с. 2. Kapalo P., Vilcekova S., Vozniak O. Using Experimental Measurements of the Concentrations of Carbon Dioxide for Determining the Intensity of Ventilation in the Rooms // Chemical Engineering Transactions. – 2014. – Vol. 39. – P. 1789–1794. 3. ГОСТ 12.1.007-76\* ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. Москва. – 1977. – 10 с. 4. Steiger S., Noske F., Kersken M., Hellwig R. T. Untersuchungen zur Belüftung von Schulen // Tagungsband Deutsche Kalte-Klima-Tagung 2008. – 2008. – Ulm, 19. – Bis 21. – Beitrag IV. – 13 s. 5. Hellwig R. T., Antretter F., Holm A., Sedlbauer K. Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen // Bauphysik. – 2009. – 31. – Heft 2. – S. 3–12. 6. ДСанПіН

5.5.2.008-01 Влаштування, утримання загальноосвітніх навчальних закладів та організації навчально-виховного процесу. – К., 2001. – 49 с. 7. BS EN 13779:2007. Ventilation for non-residential buildings. Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems. 2008. – 76 p. 8. Рымаров А. Г., Савичев В. В. К определению требуемого воздухообмена в помещениях общественных зданий в зависимости от качества наружного воздуха // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2014. – Вып. 2 (33). – 4 с. 9. Сколько вешать в граммах: нормы CO<sub>2</sub> [Электронный ресурс] / Официальный сайт ТИОН. – Режим доступа <https://tion.ru/BLOG/NORMY-CO2/> – Назва з екрана. 10. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. – М.: Химия, 1980. – 288 с. 11. Жуковський С. С., Возняк О. Т., Довбуш О. М., Люльчак З. С. Вентилювання приміщень. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – 476 с. 12. ДБН В.2.2-3-97. Будинки та споруди навчальних закладів. – К., 1997. – 50 с.

## References

1. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. (2018) Zahalnoosvitni ta profesiino-tekhnichni navchalni zaklady. Statystychnyi zbirnyk. [State Statistics Service of Ukraine. General education and vocational schools. Statistical Collection.], Kiev, 134 p. [In Ukrainian]. 2. Kapalo P., Vilcekova S., Vozniak O. (2014) Using Experimental Measurements of the Concentrations of Carbon Dioxide for Determining the Intensity of Ventilation in the Rooms. Chemical Engineering Transactions, Vol. 39, pp. 1789–1794. 3. GOST 12.1.007-76\* SSBT. (1977) Vrednyie veschestva. Klassifikatsiya i obshchie trebovaniya bezopasnosti. [GOST 12.1.007-76 \* SSBT. Harmful substances. Classification and general safety requirements], Moskva, 10 p. [In Russian]. 4. Steiger S., Noske F., Kersken M., Hellwig R. T. (2008) Untersuchungen zur Beluftung von Schulen // [Investigations on the ventilation of schools] Tagungsband Deutsche Kalte-Klima-Tagung 2008, Vol. 19, Is. 21, Beitrag IV, 13 p. [In Deutsch]. 5. Hellwig R. T., Antretter F., Holm A., Sedlbauer K. (2009) Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen [Examinations of the indoor climate and window ventilation in schools]. Bauphysik, Vol. 31, Is. 2, pp. 3-12. 6. DSanPiN 5.5.2.008-01 (2001) Vlashtuvannia, utrymannia zahalnoosvitnikh navchalnykh zakladiv ta orhanizatsii navchalno-vykhovnoho protsesu. [SSanR&R 5.5.2.008-01. Arrangement, maintenance of general educational institutions and organization of educational process], Kiev, 49 p. [In Ukrainian]. 7. BS EN 13779:2007. (2008) Ventilation for non-residential buildings. Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems. 76 p. 8. Ryimarov A. G., Savichev V. V. (2014) K opredeleniyu trebuemogo vozduhoobmena v pomescheniyah obschestvennykh zdaniy v zavisimosti ot kachestva naruzhnogo vozduha. [To determine the required air exchange in the premises of public buildings, depending on the quality of outdoor air], Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya, Vol. 2 (33), 4 p. [In Russian]. 9. Skolko veshat v grammah: normyi CO<sub>2</sub>. (2016) [How much to hang in grams: CO<sub>2</sub> standards], <https://tion.ru/BLOG/NORMY-CO2/>. 10. Elterman V. M. (1980) Ventilyatsiya himicheskikh proizvodstv. [Ventilation of chemical plants], Moskva, 288 p. [In Russian]. 11. Zhukovskiy S. S., Vozniak O. T., Dovbush O. M., Liulchak Z. S. (2007) Ventyliuvannia prymishchen. [Ventilation of the premises], Lviv: Publishing House of the Lviv Polytechnic National University, 476 p. [In Ukrainian]. 12. DBN V.2.2-3-97. (1997) Budynky ta sporudy navchalnykh zakladiv. [Buildings and facilities of educational institutions], Kiev, 50 p. [In Ukrainian].