

WPLYW BŁĘDÓW TERMOMODERNIZACYJNYCH BUDYNKÓW UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ NA POZIOM JAKOŚCI POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO

Ryszard Marian JANKA*

Wydział Przyrodniczo-Techniczny, Uniwersytet Opolski, ul. R. Dmowskiego 7/9, 45-365 Opole

Streszczenie: Remonty obiektów użyteczności publicznej, a szczególnie budynków zabytkowych, powinny zapewniać, nie tylko poprawę ich stanu technicznego i obniżenie energochłonności, ale także stwarzać warunki do występowania w nich odpowiedniego poziomu jakości powietrza wewnętrznego. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zakresu modernizacji obiektów, obciążenia osobowego, czasu przebywania osób w pomieszczeniu oraz kubatury sal i rodzaju stosowanego systemu wentylacji naturalnej i mechanicznej na przebieg, a także szybkość zmian stężenia ditlenku węgla w powietrzu wewnętrznym. Badania te przeprowadzono w ośmiu pomieszczeniach zarówno administracyjnych, jak i audytoryjnych o różnej wielkości i przeznaczeniu w dwóch wyremontowanych XIX budynkach użyteczności publicznej. Zagadnie to powiązано z badaniami zmian wilgotności i temperatury powietrza. Wykazano, że przy dużym obciążeniu osobowym sal już po około 40-50 minutach, maksymalnie 1,5 godziny w powietrzu wewnętrznym występuje stężenie ditlenku węgla ponad dwu i trzy krotnie wyższe od poziomu progu higienicznego CO₂.

Słowa kluczowe: jakość powietrza wewnętrznego, stężenie ditlenku węgla, wentylacja, szybkość zmian stężenia CO₂.

1. Wprowadzenie

1.1. Mikroklimat a wentylacja pomieszczeń

Zdrowie człowieka determinowane jest przez czynniki biologiczne, chemiczne, fizyczne, psychiczne i społeczne środowiska, stąd też należy eliminować z środowiska te czynniki i zagrożenia, które mogą oddziaływać negatywnie na jego stan zdrowia. Zdrowie według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) jest stanem pełnego dobrostanu fizycznego, psychicznego i społecznego (WHO, 2000; ASHRAE, 2001). Duży wpływ na stan zdrowia ludzi ma więc środowisko, w którym ludzie przebywają lub spędzają bardzo dużo czasu. Zapewnienie odpowiedniej jakości powietrza w domach, biurach i innych zamkniętych pomieszczeniach staje się poważnym problemem zdrowotnym, szczególnie w krajach rozwiniętych, gdzie ludzie często spędzają ponad 80-90% czasu. Na poziom odczucia komfortu klimatycznego w budynku mają wpływ zarówno czynniki związane z fizjologią, odżywianiem, psychiką człowieka, czasem pobytu w danym pomieszczeniu, jak i związane z pomieszczeniem, to jest jego wyposażeniem, jakością i rodzajami użytych materiałów oraz zastosowanymi systemami wentylacyjnymi. Miarą czystości powietrza jest stopień jego zanieczyszczenia pyłami, gazami i parami, zanieczyszczeniami biologicznymi i mikrobiologicznymi

(grzybami, bakteriami, wirusami) oraz substancjami promieniotwórczymi.

Dążenie do obniżenia energochłonności nowo budowanych, a w szczególności już istniejących i eksploatowanych budynków, w tym budynków zabytkowych, a tym samym obniżenia emisji między innymi ditlenku węgla (CO₂) do atmosfery, powoduje często pogorszenie jakości występującego w nich powietrza wewnętrznego. Wynika to w głównej mierze z bezmyślnego hermetyzowania budynków wybudowanych w poprzednich dziesięcioleciach, a szczególnie budowli zabytkowych podczas prac określanych jako remontowe (konserwatorskie), a nie termomodernizacyjne, co pozwala dotychczas na omijanie wymogów wynikających z norm budowlanych (PN-EN 13779:2008; PN-EN 15251:2012), nie zawsze uwzględniających najnowsze wyniki badań w zakresie oddziaływania jakości powietrza wewnętrznego na stan zdrowia ludzi. Dotyczy to w szczególności braku zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego dostosowanego do wymogów higienicznych (zdrowotnych) przebywających w nich osób.

Podstawowym błędem popełnianym przy tego typu pracach remontowych najczęściej zabytkowych budowli, jest nieodpowiednia „kosmetyczna” modernizacja istniejących w nich systemów wentylacji naturalnych,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: rmjanka@gmail.com

najczęściej grawitacyjnych lub infiltracyjnych, nie zapewniających odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego. W przypadku, gdy wentylacja pomieszczeń odbywa się poprzez infiltrację, to wymienia się najczęściej istniejące okna lub drzwi na stolarkę z tworzywa PCV z szybami zespolonymi wyposażonymi w nawiewniki. Z kolei w części pomieszczeń, w których stosowana jest wentylacja grawitacyjna zastępuje się ją najczęściej wentylacją mechaniczną (nawiewno-wywiewną) czasami w połączeniu z wymiennikami ciepła (rekuperatorami). W obiektach zabytkowych użyteczności publicznej (na przykład w sądach) dodatkowo w korytarzach budynków wstawiane są przegrody – drzwi przeciwpożarowe bez zapewnienia dopływu odpowiedniej ilości świeżego powietrza zewnętrznego do pomieszczeń do nich przylegających. Tak przeprowadzone remonty – modernizacje budynków doprowadzają do ograniczenia w nich niezbędnej wymiany powietrza, a często powodują zakłócenie w jego obiegu. Tworzą się wówczas zamknięte, wydzielone obszary będące swoistymi „komorami gazowymi” o nieodpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego.

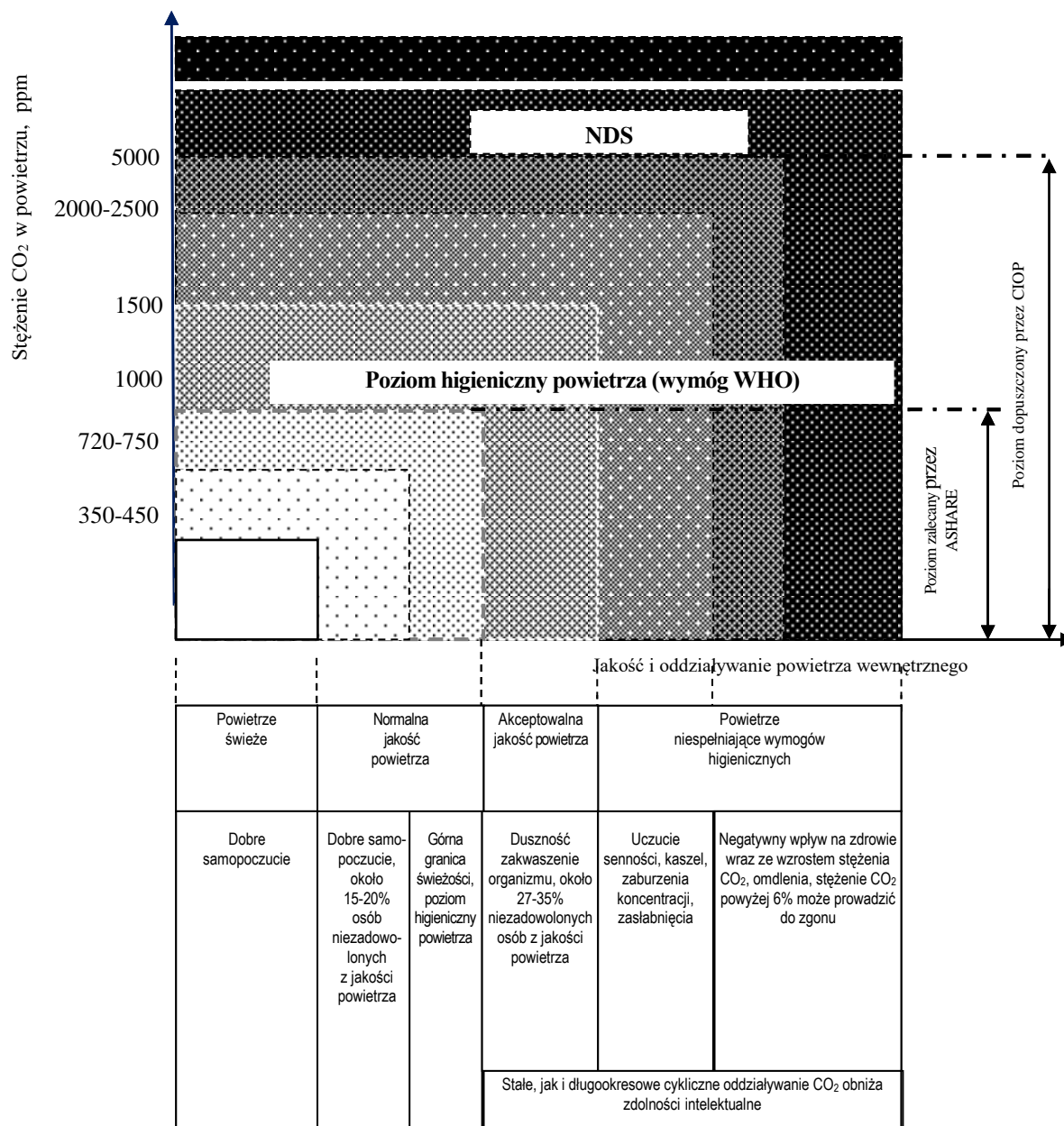
1.2. Wpływ ditlenku węgla na funkcjonowanie organizmu ludzkiego

Skutkiem ograniczenia ilości powietrza zewnętrznego doprowadzanego do pomieszczeń budynków, przy jednoczesnym występowaniu wewnątrz czynników szkodliwych i uciążliwych, spowoduje między innymi powstawanie zjawiska tak zwanego „syndromu chorego budynku” (*Sick Building Syndrome* – SBS), objawiającego się u ich użytkowników szeregiem niedyspozycji zdrowotnych oraz chorób. Jest on także przyczyną wystąpienia między innymi astmy, chorób nowotworowych, wieloczynnikowej nadwrażliwości chemicznej, w tym alergii, czy tak zwanego zespołu przewlekłego zmęczenia – CFS (Jankowska i Pośniak, 2009; Nantka, 2011).

Jedną z głównych przyczyn występowania u ludzi wymienionych powyżej dolegliwości są między innymi oprócz wspomnianych już zanieczyszczeń powietrza i czynników także niewłaściwe parametry powietrza (temperatura, wilgotność i prędkość) oraz stężenie ditlenku węgla (Greszka i in., 2002; Obwieszczenie MGPIPS, 2003, Lockwood i in., 2009). Dorosły człowiek podczas nieaktywnego odpoczynku (pozycji siedzącej bez pracy) i lekkiej pracy, na przykład biurowej, wydycha CO₂ średnio w ciągu godziny odpowiednio około 12-15 l/h oraz 18-25 l/h. Stężenie CO₂ w powietrzu wydychanym przez człowieka wynosi 4-5% (Robertson, 2006; Jankowska i Pośniak, 2009; Lockwood i in., 2009; Nantka, 2011). Wynikający stąd wzrost stężenia CO₂ w powietrzu zamkniętego pomieszczenia względnie w lokalu niewentylowanym lub wentylowanym w niedostatecznym stopniu powoduje bardzo szybkie, kilkukrotne przekroczenie jego zawartości w powietrzu zewnętrznym osiągając poziom rzędu 2500-3000 ppm i więcej (Nantka, 2011; Toftum i in., 2015; Zhang i in., 2016).

W powietrzu zewnętrznym na obszarach wiejskich i niezamieszkałych stężenie tego gazu wynosi około 350-400 ppm, a na obszarach miast i stref przemysłowych może osiągać poziom około 450 ppm, a nawet 500 ppm w zależności od lokalizacji punktów pomiaru (Greszta i in., 2002; Jankowska i Pośniak, 2009; Nantka, 2011). Taki poziom stężenia CO₂ w powietrzu nie jest szkodliwy dla ludzi (rys. 1), a co więcej jego obecność w atmosferze jest niezwykle ważna dla właściwego funkcjonowania organizmów żywych. Zbyt wysoki poziom ditlenku węgla we wdychanym przez człowieka powietrzu powoduje w zależności od jego stężenia, między innymi, bóle głowy, zaburzenie jego koncentracji, pojawienie się senności, osłabia się słuch, zwiększa się szybkość oddychania, powstają zaburzenia w równowadze kwasowo-zasadowej krwi, to jest obniżenie pH krwi, co powoduje występowanie tak zwanego stresu metabolicznego (Robertson, 2006). Wpływa to z kolei na szybkość pracy serca, występują zasłabnięcia i omdlenia (rys. 1). Przyczynia się do uszkodzenia komórek i tkanek (nerek i wątroby). Nieodpowiednia jakość powietrza wewnętrznego niekorzystnie wpływa, nie tylko na samopoczucie i stan zdrowia ludzi przebywających w tych pomieszczeniach, ale także na ich niższą sprawność fizyczną, a więc i wydajność pracy.

Wysokie stężenie ditlenku węgla w powietrzu (już powyżej 1000 ppm), przy stałym, jak i długotrwałym cyklicznym oddziaływaniu, przyczynia się także do obniżenia sprawności umysłowej ludzi (zdolności intelektualnych) oraz koncentracji umysłowej. Długotrwałe cykliczne przybywanie w takim środowisku powoduje ponadto obniżenie zdolności człowieka do przyswajania sobie nowych treści oraz uczenia się, a także obniża jego zdolności do wykorzystywania dostępnych informacji (Robertson, 2006; Fisk i in., 2013; Wargoocki i Wyon, 2013; Janka, 2014; Toftum i in., 2015; Zhang i in., 2016). W takich warunkach spadek inteligencji mierzony wskaźnikiem IQ może już występować po przekroczeniu stężenia 1500 ppm a nawet 1000 ppm CO₂ (Robertson, 2006; Lockwood i in., 2009; Hersoug i in., 2012; Fisk i in., 2013; Toftum i in., 2015). Przy oddychaniu powietrzem zawierającym ditlenek węgla na poziomie 2500 ppm obniża się także poziomu strategicznego planowania oraz inicjatyw człowieka (Fisk i in., 2013). Przy długotrwałym i wysokim poziomie tego gazu we wdychanym powietrzu następuje jego oddziaływanie na pracę oreksyny, to jest hormonu regulującego procesy metaboliczne organizmu ludzkiego, przyczyniając się prawdopodobnie do zwiększenia apetytu oraz wzrostu otyłości ludzi (Rice, 2004; Hersoug, 2016).

Rys.1. Zalecane poziomy stężenia CO₂ w powietrzu wewnętrznym oraz ich wpływ na organizm i funkcjonowanie ludzi

1.3. Jakość powietrza wewnętrznego

Poziom stężenia CO₂ w powietrzu pomieszczeniu, w którym przebywają ludzie nie powinien przekraczać tak zwanego wskaźnika Pettenkoffera, to jest 1000 ppm (WHO, 2000; Robertson, 2006; PN-EN13779:2008; Kaiser i Wolski, 2011; Nantka, 2011). Ten poziom stężenia ditlenku węgla zapewnia uczucie komfortu i świeżości powietrza wewnętrznego (rys. 1). Jeżeli jego stężenie przekracza wartości 1000-1500 ppm to wzrasta odsetek ludzi niezadowolonych z jakości powietrza wewnętrznego (Kaiser i Wolski, 2011; Nantka, 2011; Fisk i in., 2013). Także według norm i zaleceń europejskich (standardów UE CR EU 1752), amerykańskich (ASHARE 62-2001) oraz sformułowanych przez Światową Organizację Zdrowia (WHO), a także określonych przez Szwecję, Japonię czy Kanadę dopuszczalny poziom

ditlenku węgla występującego w powietrzu wewnętrznym nie powinien przekraczać wartości 1000-1500 ppm (0,1-0,15%) stanowiącego wymóg poziomu higienicznego (rys. 1).

W Polsce nie określa się dopuszczalnych stężeń ditlenku węgla w powietrzu zawartym w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego pobytu ludzi, to jest zarówno w budynkach użyteczności publicznej, jak i mieszkalnych. Istnieją tylko rozporządzenia dotyczące dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy – w zakładach przemysłowych – określające najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) i najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe – NDSch (Zarządzenie MZiOS, 1996; Rozporządzenie MPiPS, 2002 (ze zmianami z 2005) i 2010). Wartości tych wielkości wynoszą odpowiednio 9000 mg/m³ (to jest około 5000 ppm przy oddziaływaniu do około 8 godzin

dziennie) oraz 27 000 mg/m³ (przy oddziaływaniu nie dłużej niż 15 minut). Zła jakość powietrza wewnętrznego w obiektach budowlanych spowodowana jest między innymi zbyt małą ilością powietrza zewnętrznego doprowadzanego do pomieszczenia i przypadającego na jedną osobę. Wynikało to z obowiązującej jeszcze niedawno normy na przykład PN-B-03430:1983 *Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania oraz rozporządzeń ministerialnych i zaleceń określających dostarczenie, na przykład 20 m³/(h × osoba) powietrza do pomieszczeń, w których zakazane jest palenie tytoniu oraz 30 m³/(h × osoba) do pomieszczeń klimatyzowanych oraz wentylowanych o nie otwieranych oknach. Zalecana jeszcze niedawno ilość powietrza wentylowanego, to jest 20 m³/(h × osobę) biorąc pod uwagę objętość wydzielanego średnio CO₂ (20 l/h) przez jedną osobę w ciągu godziny przy wykonywaniu na przykład lekkiej pracy biurowej nie zapewniała odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego. Stąd też wprowadzono w Polsce normy PN-EN 13779:2008 *Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji* i PN-EN-15251:2012 *Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki**

energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę – dostosowane do zaleceń określonych w UE – określające odpowiednio jakości powietrza wewnętrznego i strumienie powietrza zewnętrznego przypadającego na jedną osobę w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi (tab. 1) oraz wprowadzające klasyfikację i opis środowiska wewnętrznego (tab. 2).

Pomimo wprowadzenie tych nowych wymogów (tab. 1) w działalności praktycznej z różnych względów są one często ignorowane, szczególnie przy modernizacji starych oraz zabytkowych obiektów użyteczności publicznej. Zaklasyfikowanie środowiska wewnętrznego w danym budynku do odpowiedniej kategorii, od I do IV (tab. 2), między innymi przy przeprowadzaniu ich termomodernizacji, wymaga spełnienia nie tylko odpowiednich wymogów dotyczących wentylacji i poziomu uzyskiwanego stężenia zanieczyszczeń w pomieszczeniach, ale i wymogów klimatycznych, termicznych, oświetleniowych oraz akustycznych. Z tego też względu istotne jest określenie wpływu najczęściej popełnianych błędów przy modernizacji tego typu budynków użyteczności publicznej na uzyskiwaną w nich jakość powietrza wewnętrznego oraz ilość dostarczanego powietrza wentylowanego.

Tab. 1. Klasyfikacja jakości powietrza wewnętrznego oraz zalecany strumień powietrza zewnętrznego przypadającego na jedną osobę w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi według PN-EN 13779:2008

| Kategoria | Opis jakości powietrza | Wartość standardowa przyrostu stężenia CO ₂ w powietrzu wewnętrznym powyżej poziomu w powietrzu zewnętrznym | Wartość standardowa strumienia objętości powietrza zewnętrznego przypadającego na jedną osobę niepalącą |
|-----------|------------------------------|--|---|
| | | ppm | m ³ /h × osoba |
| IDA 1 | Wysoka jakość powietrza | 350 | 72 |
| IDA 2 | Średnia jakość powietrza | 500 | 45 |
| IDA3 | Umiarkowana jakość powietrza | 800 | 29 |
| IDA4 | Niska jakość powietrza | 1200 | 18 |

Tab. 2. Klasyfikacja warunków środowiska wewnętrznego według PN-EN-15251:2012

| Kategoria | Charakterystyka |
|-----------|--|
| I | Warunki na wysokim poziomie – kategoria zalecana dla przestrzeni, w których przebywają osoby bardzo wrażliwe na warunki środowiska |
| II | Poziom normalny – kategoria zalecana dla budynków nowo wznoszonych lub remontowanych |
| III | Warunki na średnim, jeszcze akceptowalnym poziomie oczekiwań – kategoria może być przyjmowana dla istniejących budynków |
| IV | Warunki nie spełniające kategorii od I do III, mogą być akceptowane, gdy będą występować w ciągu roku w ograniczonych okresach czasu |

2. Opis badanych budynków i pomieszczeń

Badania wpływu stosowanego często w praktyce zakresu prac remontowych, w tym częściowej termomodernizacji budynków użyteczności publicznej – sądów oraz urzędów – wykonanych w technologii ceglanej na poziom zmian jakości ich powietrza wewnętrznego zostały przeprowadzone w dwóch zabytkowych, pięciokondygnacyjnych obiektach wolno stojących, wybudowanych w połowie XIX wieku. Budynki te osłonięte niewielką ilością drzew i krzewów są położone w odległości około 30-35 m od ruchliwej ulicy. Znajdują się w nich pomieszczenia administracyjne i sale audytoryjno-szkoleniowe oraz sale rozpraw sądowych. Budynki posiadają ściany zewnętrzne o grubości rzędu 55 cm. Grubość ścian wewnętrznych przedziałowych jest rzędu 25-45 cm. Proces termomodernizacji w tych obiektach obejmował przede wszystkim poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych, zastąpienie starej drewnianej stolarki okiennej szybami zespolonymi, wyposażenie drzwi zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych budynków w system uszczeltek, częściową poprawę systemów wentylacyjnych w wybranych częściach obiektów oraz dostosowanie budynków do wymogów przeciwpożarowych.

Poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych uzyskano poprzez wyłożenie ścian od wewnątrz izolacją styropianową pokrytą płytami kartonowymi. Korytarze budynków sądów zostały podzielony na oddzielne strefy pożarowe rozdzielone metalowymi, szczelnymi drzwiami przeciwpożarowymi. Pomieszczenia w badanych budynkach nie posiadały przed jak i po modernizacji jednolitego systemu wentylacji. Ponieważ są to budynki zabytkowe, stąd też około 50% pomieszczeń wyposażonych było i jest nadal w grawitacyjne systemy wentylacyjne, wykorzystujące do tego celu stare przewody kominowe o przekroju 14×22 cm. Część pomieszczeń zaopatrzona została w instalację wentylacyjną nawiewno-wywiewną oraz nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła. W budynkach znajdują się także pomieszczenia administracyjne nie posiadające żadnej z wymienionych powyżej instalacji wentylacyjnych poza wentylacją naturalną. Proces wymiany powietrza w tych ostatnich pomieszczeniach odbywa się nieszczelnościami, poprzez infiltracje i eksfiltracje, uchylanie okien oraz drzwi. Badane pomieszczenia miały powierzchnię 24, 36, 40 i 45 m² oraz wysokość od 2,6 m do 3,5 m. Każde z pomieszczeń miało od jednego do dwóch okien o powierzchni odpowiednio 1,2 m² i 2,4 m² wyposażonych jak już wspomniano w szyby zespolone. Część pomieszczeń, w których stosowana była wentylacja grawitacyjna zaopatrzona była w nawiewniki okienne, przez które napływało powietrze w ilości od około 4 do 20 m³/h (w skrajnym przypadku 30 m³/h) przy podciśnieniu 10 Pa. Podczas przeprowadzania pomiarów prędkość wiatru wynosiła od 3 do 5 m/s. Strumień objętości powietrze przenikającego do pomieszczeń przez nieszczelności okien przy występujących prędkościach wiatru dla pojedynczego okna wynosił od 1,3 do 4,4 m³/h oraz podwójnego

od 1,9 m³/h do 6,4 m³/h. System wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej zapewniał wymianę powietrza na poziomie 36 m³/h. We wszystkich objętych badaniami pomieszczeniach krotności wymian powietrza, w których stosowane były naturalne systemy wentylacji były niższe od wartości 0,5 h⁻¹, przy czym w pomieszczeniach w których wymiana powietrza odbywała się na zasadzie infiltracji wynosiła poniżej 0,3 h⁻¹.

3. Metoda badań i aparatura badawcza

Ocenę zmian jakości powietrza wewnętrznego w budynkach poddanych termomodernizacji przeprowadzono na podstawie analizy wpływu obciążenia osobowego i stosowanych systemów wymiany powietrza w badanych pomieszczeniach w funkcji stężenia ditlenku węgla, wilgotności i temperatury powietrza. Badania przeprowadzono poza tak zwanym sezonem grzewczym, a mianowicie w sierpniu oraz wrześniu, w ośmiu pomieszczeniach o różnej powierzchni i kubaturze w godzinach pracy urzędów, to jest od 7,30 do 15,00. Pomiary przeprowadzono w pomieszczeniach o identycznych oraz różnych obciążeniach osobowych, w których stosowane były trzy odmienne systemy wentylacji, a mianowicie wentylacji grawitacyjnej, infiltracji wspomaganą okresowo chwilowym otwieraniem drzwi i okien oraz mechanicznej nawiewno-wywiewnej.

Punkty pomiaru stężenia ditlenku węgla, wilgotności i temperatury usytuowane były w środkowej części każdego z pomieszczeń na wysokości głów pracujących urzędników, to jest około 25-30 cm powyżej blatu biurka (1,10-1,15 m od powierzchni podłogi). W badanych pomieszczeniach administracyjnych znajdowało się od jednego do czterech stanowisk pracy o pełnej oraz częściowej obsadzie osobowej. Z kolei w pomieszczeniach audytoryjnych podczas badań przebywało od 6 do 26 osób. Wyniki pomiarów badanych parametrów powietrza wewnętrznego były rejestrowane elektronicznie, a następnie ich wartości uśredniano dla 1-4 minutowych przedziałów czasowych w zależności od rodzaju i przeznaczenia pomieszczeń oraz ich obciążenia osobowego. Badania te przeprowadzono w różnych dniach tygodni biorąc pod uwagę tryb pracy urzędów i szkolenia urzędników. Dodatkowo dla celów porównawczych przeprowadzono także pomiary parametrów powietrza zewnętrznego przed budynkami, to jest stężenie ditlenku węgla, wilgotności względnej oraz temperatury i ciśnienie powietrza, na wysokości 1,5 m zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz. U. 2012, poz. 1052). Zmierzono także prędkości wiatru przed budynkiem. Wszystkie pomiary CO₂, wilgotności i temperatury powietrza prowadzono miernikiem High Performance Carbon Dioxide Meter – Aisko AZ 77535 umożliwiającym jednoczesny pomiar CO₂, temperatury i wilgotności względnej powietrza. Aparat ten posiada podstawowy zakres pomiarowy CO₂ wynoszący od 0 do 5000 ppm (rozszerzonym do 9999 ppm)

o rozdzielczości 1 ppm i dokładności pomiaru 30 ppm $\pm 5\%$, temperatury o zakresie od -20 do $+60^{\circ}\text{C}$, dokładności pomiaru $0,6^{\circ}\text{C}$ i rozdzielczości $0,1^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotności względnej powietrza od 0 do 99,9% i dokładności pomiaru $\pm 3\%$. Pomiar prędkości przepływającego powietrza zewnętrznego przeprowadzono termooanemometrem wyposażoną w sondę skrzydełkową Kimo LV 110 o rozdzielczości $0,01$ m/s i dokładności pomiaru $\pm 3\%$ w zakresie prędkości od $0,25$ do 3 m/s oraz dokładności $\pm 1\%$ przy przepływach powietrza z prędkością od $3,1$ do 35 m/s.

4. Wyniki i analiza wyników badań

Przeprowadzone badania wykazały, że w pomieszczeniach obiektów zabytkowych w niedostatecznym stopniu wentylowanych, w których przebywają ludzie, bardzo szybko zmienia się zawartość ditlenku węgla w powietrzu wewnętrznym. W czasie kilkudziesięciu minut przekraczany jest poziom wymogu higienicznego, to jest 1000 ppm (rys. 2-7). Jednocześnie, wraz ze wzrostem stężenia CO_2 , ulega podwyższeniu temperatura powietrza oraz następuje kumulacja poziomu wilgoci. Na wykresach (rys. 2-7) oprócz przebiegu zmian mierzonych wielkości (stężenia CO_2 , temperatury i wilgotności powietrza) zaznaczono także kategorie jakości powietrza wewnętrznego IDA_i (tab. 1) wynikające z oceny przyrostu stężenia ditlenku węgla (ΔS_{CO_2}) w pomieszczeniu ponad jego poziom w powietrzu zewnętrznym zgodnie z PN-EN 13779:2008

$$S_{i\text{CO}_2} = S_{z\text{CO}_2} + \Delta S_{i\text{CO}_2} \quad (1)$$

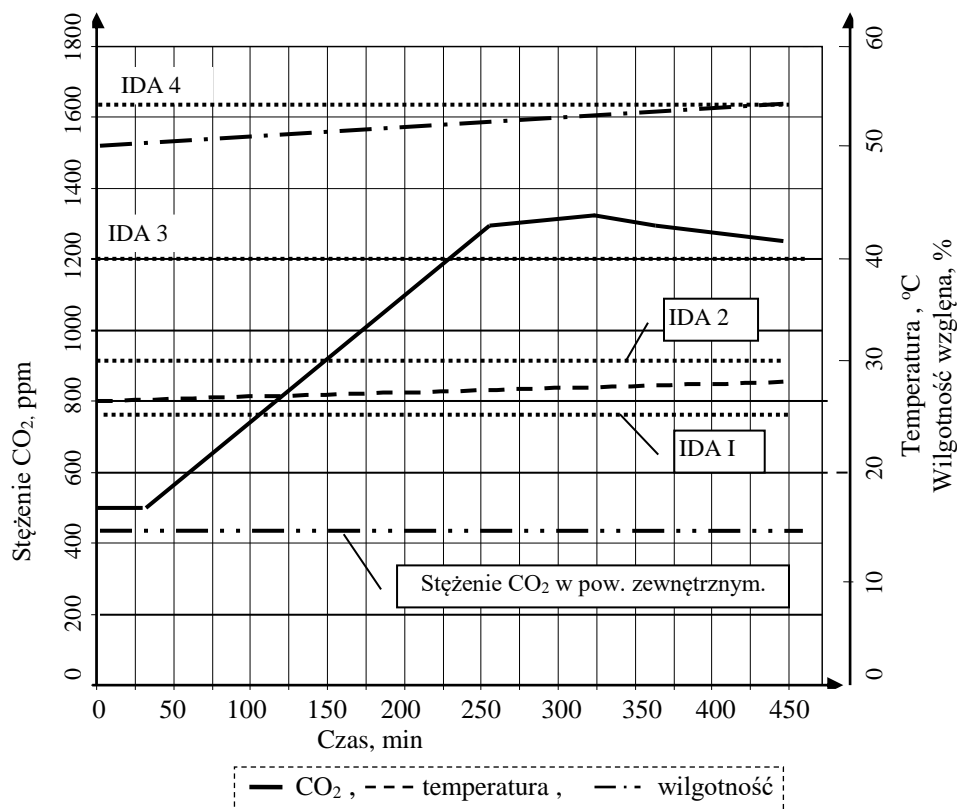
gdzie: $S_{i\text{CO}_2}$ jest maksymalnym poziomem stężenia CO_2 w powietrzu wewnętrznym odpowiadający i -tej kategorii jakości powietrza IDA_i w ppm, $\Delta S_{i\text{CO}_2}$ jest standardowym i -ty przyrostem stężenia CO_2 w pomieszczeniu ponad jego poziom w powietrzu zewnętrznym w ppm, a $S_{z\text{CO}_2}$ jest stężeniem CO_2 w powietrzu zewnętrznym w ppm.

Średnia stężenie ditlenku węgla w powietrzu wewnętrznym przed budynkami wynosiło w sierpniu i wrześniu, odpowiednio 420 i 440 ppm. Podczas przeprowadzania pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego wynosiła odpowiednio 33°C i 24°C , a wilgotność względna powietrza 44 i 49%.

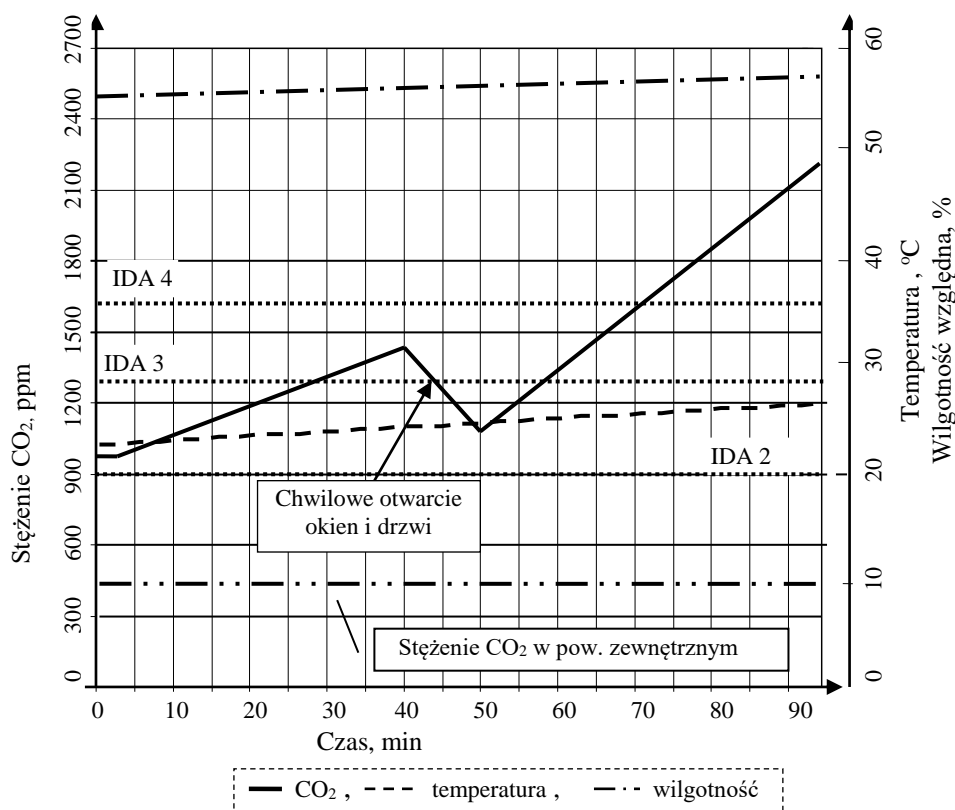
Przy tym samym obciążeniu czasowym i osobowym oraz wielkości pomieszczeń w tego typu obiektach użyteczności publicznej, decydujący wpływ na poziom stężenia ditlenku węgla w powietrzu wewnętrznym ma brak modyfikacji systemów wymiany powietrza, a mianowicie infiltracyjnych i grawitacyjnych (rys. 2-7). Podczas pracy umysłowej 3 osób w pomieszczeniach o powierzchni 36 m² (kubaturze 126 m³), w których wymiana powietrza odbywa się poprzez infiltrację poziom progu higienicznego stężenia CO_2 w powietrzu, to jest 1000 ppm (wskaźnik Pettenkoffera) zostaje przekroczony już po 3 godzinach (rys. 2). Przez większość czasu ich pracy powietrze w pomieszczeniu jest umiarkowanej i niskiej jakości (kategorii IDA 3 i 4). Wysoka jakość powietrza (kategorii IDA 1) występuje tylko przez okres

około 2 godzin. Wzrost obciążenia osobowego takiej sali podczas na przykład szkolenia czy prowadzenia rozprawy sądowej do poziomu 14 osób (rys. 3) względnie 16 osób (rys. 4) w nieznacznie większym pomieszczeniu, bo o powierzchni 40 m² i kubaturze 140 m³ powoduje, że już po około 40-50 minutach wartość wskaźnika Pettenkoffera zostaje przekroczona ponad dwukrotnie osiągając poziom 2400 ppm (rys. 4). Zjawisko to potęguje się, gdy pomieszczenie przed jego użytkowaniem nie jest przewietrzane (rys. 3). Tak szybki wzrost stężenia CO_2 w powietrzu w badanych pomieszczeniach spowodowany jest faktem, iż podczas procesu termomodernizacji tego typu budynków główny akcent położony został, tylko na ich ociepleniu, uszczelnieniu okien i drzwi oraz wstawieniu drzwi przeciwpożarowych przy jednoczesnym ograniczeniu zakresu modernizacji systemów wentylacyjnych. Wstawienie niezbędnych na korytarzach przegród – drzwi przeciwpożarowych przy jednoczesnym braku zastosowania odpowiedniego systemu wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej oraz należytej w ciągu dnia dbałości o poziom jakości powietrza wewnętrznego w tych pomieszczeniach powoduje, że w danym segmencie budynku wydzielonym drzwiami przeciwpożarowymi wytwarza się „komora gazowa”, w której przebywający ludzie już po krótkim okresie czasu, to jest około 30 minutach, oddychają powietrzem zaliczanym do najniższej kategorii IDA 4. Powietrze to jest bardzo złej jakości, której kategorii nie uwzględniono już nawet w PN-EN 13779:2008.

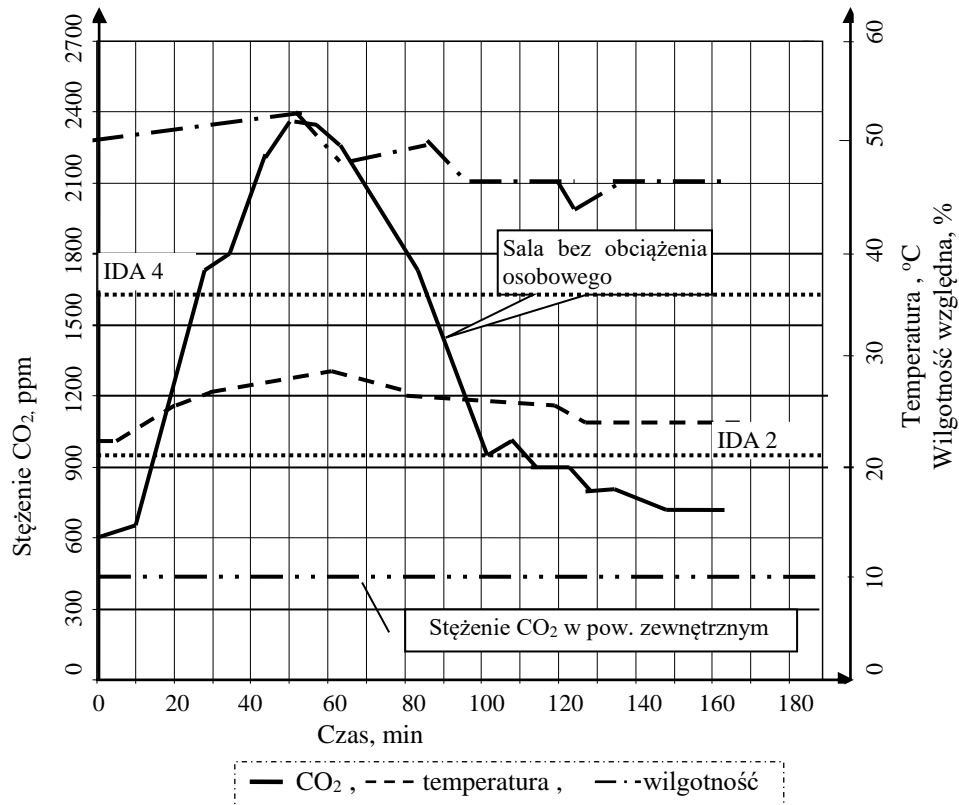
Także niska jakość powietrza wewnętrznego występuje także w pomieszczeniach, w których stosowane są systemy wentylacji grawitacyjnej. Nawet w bardzo dużych – audytoryjnych pomieszczeniach (sądowych) występuje szybki wzrost stężenia CO_2 w powietrzu (rys. 5 i 6). Odbywająca się za pośrednictwem dwóch kratki wentylacyjnych o wymiarach 14×22 cm grawitacyjna wymiana powietrza w dużym pomieszczeniu audytoryjnym bo o powierzchni 45 m² (kubaturze 157 m³) przy znacznym jej obciążeniu osobowym, to jest 26 osób (rys. 5) powoduje, że poziom progu higienicznego CO_2 w powietrzu (1000 ppm) zostaje już przekroczony po 25-30 minutach osiągając po około 100 minutach poziom 3200 ppm. Także ten system wentylacji stosowany z kolei w pomieszczeniu administracyjnym o stosunkowo dużej powierzchni bo 24 m² (kubaturze 62 m³) oraz przy stałym 4 osobowym obciążeniu (incydentalnie 6 osób przez okres około 1 godziny) wykonujących stałą pracę umysłową, także nie zapewnia odpowiedniej jakości powietrza przez cały okres ich urzędowania (rys. 6). Już po około 1 godzinie stężenie CO_2 w powietrzu przekracza poziom higieniczny (1000 ppm), a po dwóch godzinach w pomieszczeniu znajduje się powietrze, które zaklasyfikować należy do najniższej kategorii IDA 4. W piątej godzinie pracy 4 osobowego zespołu urzędników w pomieszczeniu o powierzchni



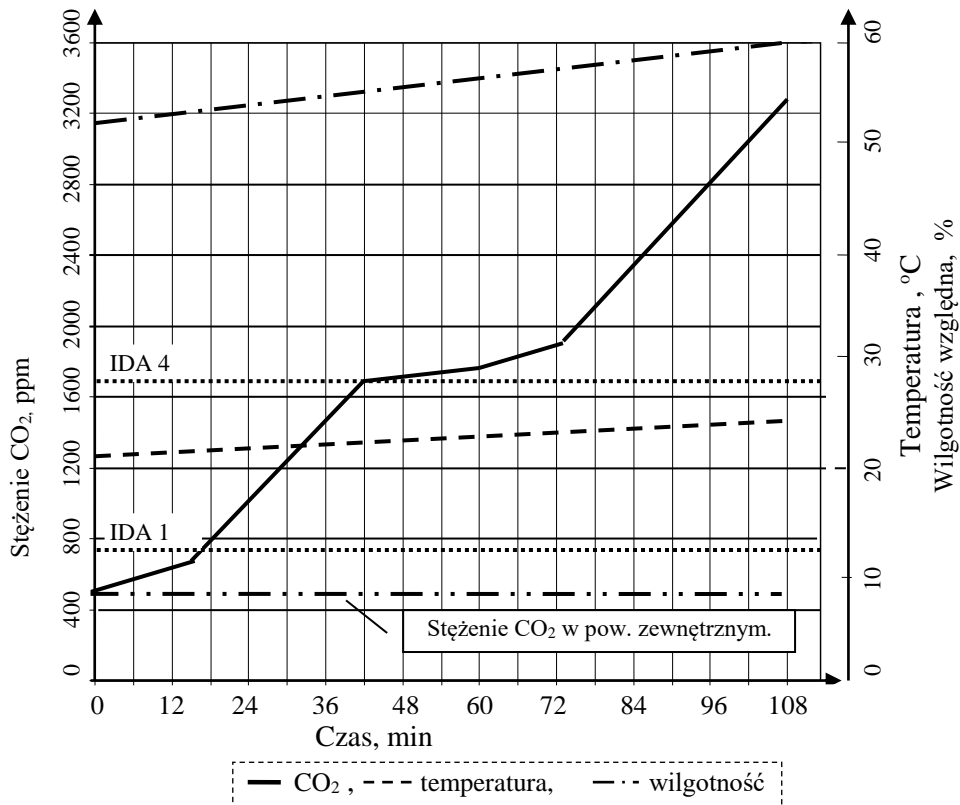
Rys. 2. Przebieg zmian stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego podczas pracy 3 osób w sali o powierzchni 36 m² (kubaturze 126 m³), w której wymiana powietrza odbywa się poprzez infiltrację (zamknięte okna i drzwi)



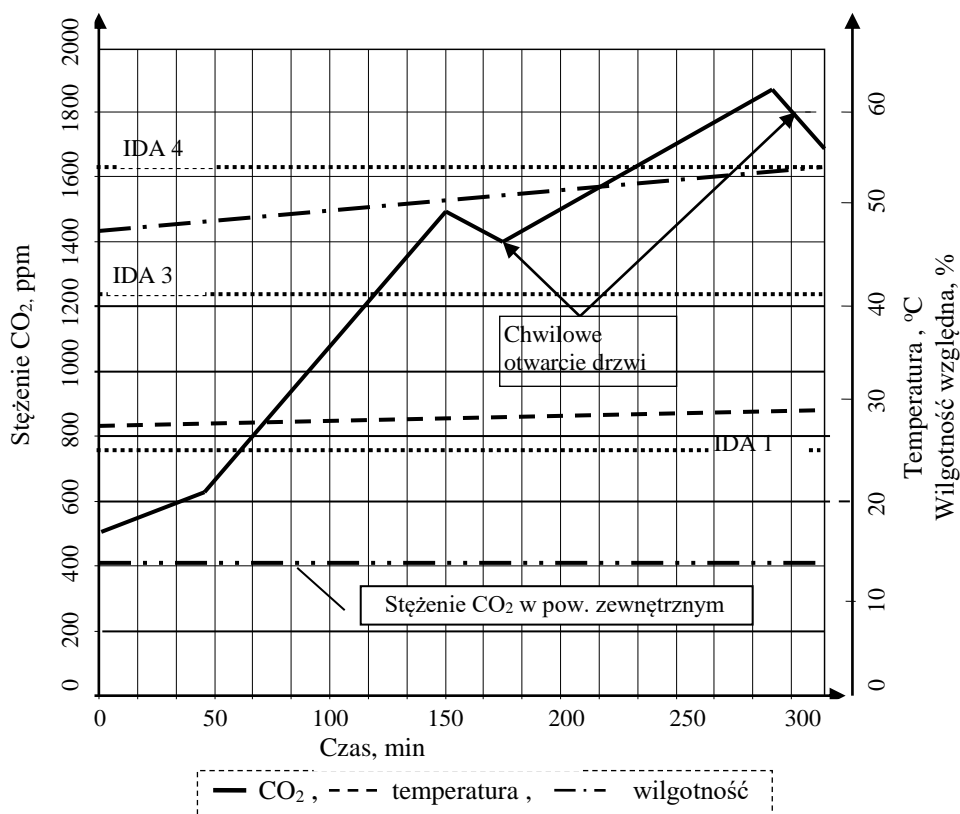
Rys. 3. Przebieg zmian stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego podczas obecności 14 osób w sali o powierzchni 36 m² (kubaturze 126 m³), w której wymiana powietrza odbywa się poprzez infiltrację (zamknięte okna i drzwi)



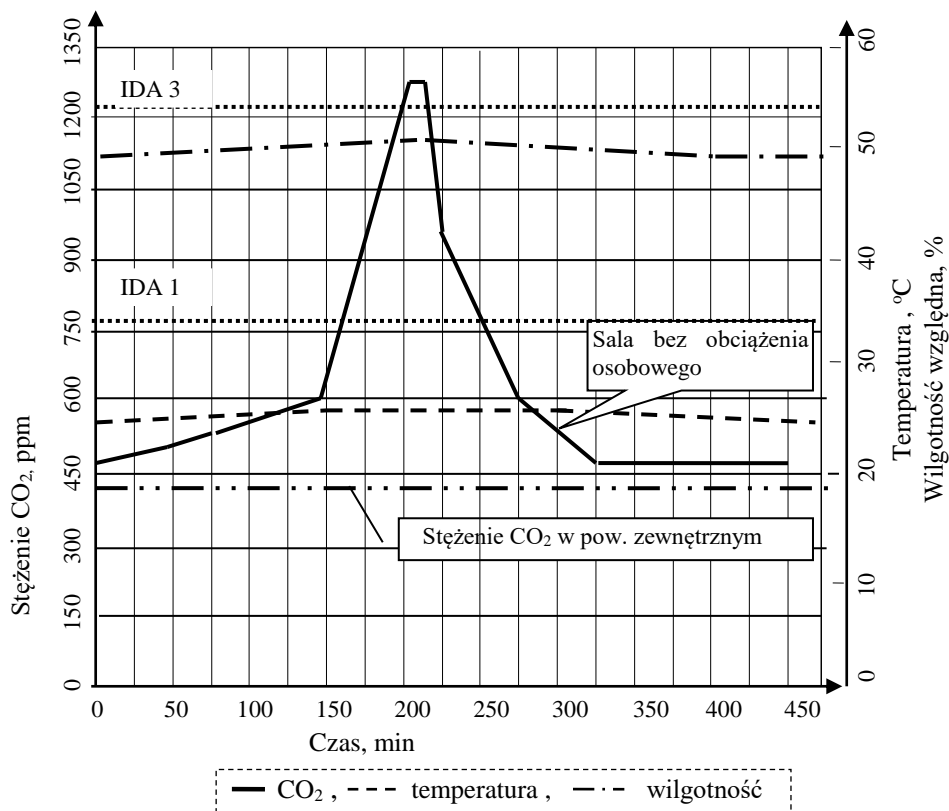
Rys. 4. Przebieg zmian stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego podczas zajęć szkoleniowych 16 osób w sali o powierzchni 40 m² (kubaturze 140 m³) i otwartych oknach (wentylacja poprzez infiltrację)



Rys. 5. Przebieg zmian stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego przy obecności 26 osób w sali o powierzchni 45 m² (kubaturze 157 m³) przy zamkniętych oknach i wyposażonej w system wentylacji grawitacyjnej



Rys. 6. Wpływ pracy 4 i incydentalnie 6 osób na przebieg zmian stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w sali o powierzchni 24 m² (kubaturze 62 m³) i zamkniętym oknie wyposażonej w system wentylacji grawitacyjnej



Rys. 7. Przebieg zmian stężenia CO₂ oraz temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego podczas pracy 3, w krótkim okresie czasu 6 osób, a następnie w pustej sali o powierzchni 24 m² (kubaturze 62 m³) wyposażonej w system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej

24 m² wyposażonym w system wentylacji grawitacyjnej stężenie CO₂ osiąga poziom prawie dwukrotnie większy od wskaźnika Pettenkoffera, bo rzędu około 1900 ppm. Na szybkie pogorszenie jakości powietrza w badanych salach wpływa ponadto ich usytuowanie. Przylegają one bowiem do korytarza zamkniętego drzwiami przeciwpożarowymi, w którym także występuje niskiej jakości powietrze.

Wysoka jakość powietrza zapewniona jest natomiast w pomieszczeniu o tej samej wielkości, co w powyżej analizowanym przypadku, to jest 24 m² (rys. 6) i zbliżonym obciążeniu osobowym (3 osób), gdy wyposażone jest ono w system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej o wydajności 36 m³/h (rys. 7). Poziom stężenia ditlenku węgla w powietrzu w tak wentylowanym pomieszczeniu osiąga poziom 600 ppm dopiero po ponad 2 godzinach. Tak więc w tej sytuacji, w pomieszczeniu występuje powietrze wysokiej jakości – kategorii IDA 1 (tab. 1). Dwukrotny, chwilowy wzrost stężenie tego gazu w powietrzu do poziomu około 1270 ppm wywołany jest okresowym dwukrotnym wzrostem obciążenia osobowego sali, to jest z 3 do 6 osób. W zaprojektowanych (i wykonanych) systemach wentylacji mechanicznej w badanych budynkach (między innymi także dla wyżej wymienionego pomieszczenia) nie uwzględniono sytuacji, że może występować okresowe zwiększanie obciążenia osobowego sal, a tym samym konieczność podwyższenia strumienia objętości wentylowanego powietrza. W przypadku obiektów użyteczności publicznej takie rozwiązanie konstrukcyjne winno być obowiązkowo wprowadzane w projektowanych lub modernizowanych systemach wentylacyjnych. Tego typu wymóg powinien być bezwzględnie egzekwowany przy projektowaniu systemów wentylacji dla wszystkich pomieszczeń w obiektach użyteczności publicznej, w których przyjmowani są petenci, a więc wszędzie tam, gdzie występuje znaczna zmiana w czasie obciążenia osobowego sal.

We wszystkich badanych pomieszczeniach i stosowanych systemach wentylacji występował niewielki w porównaniu do poziomu zmian stężenia CO₂ wzrost temperatury powietrza. W zależności od obciążenia czasowego i osobowego oraz stosowanego systemu wentylacji sali wynosił on rzędu 2-3°C maksymalnie 4°C. Znacznie większe zmiany w porównaniu z temperaturą występowały w wilgotności powietrza. Wzrost poziom wilgotności względnej powietrza wynosił od 3% do 8%.

5. Podsumowanie

Przeprowadzane remonty zabytkowych obiektów użyteczności publicznej oprócz podstawowego celu jaki jest poprawa ich stanu technicznego i obniżenie energochłonności, muszą także obejmować polepszenie istniejących dotychczas warunków sanitarno-higienicznych, a przede wszystkim podwyższenie jakości powietrza wewnętrznego. W obiektach użyteczności publicznej, a szczególnie budynkach sądowych, zarówno w pomieszczeniach administracyjnych, jak

i audytoryjnych oraz stosowanych w nich systemach wentylacji naturalnej (grawitacyjnej i infiltracyjnej) i dużym ciążeniu osobowym sal bardzo szybko przekraczany jest poziom progu higienicznego CO₂ w powietrzu, to jest 1000 ppm. W salach audytoryjnych o dużym obciążeniu osobowym już po czasie około 40-50 min, maksymalnie 1,5 godziny, występuje stężenie ditlenku węgla na poziomie rzędu 2400, a nawet 3200 ppm, a więc ponad dwu i trzy krotnie wyższe od poziom progu higienicznego CO₂ w powietrzu. Jakość powietrza wewnętrznego bardzo szybko ulegała pogorszeniu szczególnie w pomieszczeniach o wentylacji naturalnej, osiągając w bardzo krótkim okresie czasu najniższą kategorię. Proces ten pogłębia się gdy pomieszczenia te mają bezpośrednie połączenie z korytarzami, w których wstawione są przegrody przeciwpożarowe, ograniczające wymianę powietrza.

Systemy wentylacji w obiektach użyteczności publicznej powinny być tak zaprojektowane, by umożliwiały utrzymywanie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego wraz ze wzrostem obciążenia osobowego pomieszczeń. Niska jakości powietrza wewnętrznego występującego w tych pomieszczeniach może wywierać negatywny wpływ na poziom jakości i wydajności pracy urzędników, pogorszenie ich kondycji intelektualnej oraz stan zdrowia i bezpieczeństwo przebywających tam ludzi (zarówno pracowników, jak i petentów). Uwzględniając powyższe w Polsce należy jak najszybciej określić dopuszczalny, higieniczny poziom stężenia ditlenku węgla w powietrzu w obiektach użyteczności publicznej, biorąc także pod uwagę obiekty zabytkowe i mieszkalne. Przy jego opracowywaniu należy wziąć pod uwagę normy i zalecenia obowiązujące w różnych krajach europejskich, Stanach Zjednoczonych oraz Międzynarodowej Organizacji Zdrowia (WHO).

Literatura

- ASHRAE Standard 62-2001 (2001). Ventilation for acceptable indoor air quality. American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers. Atlanta, USA.
- Fisk W.J., Satish U., Mendell M.J., Hotchi T., Sullivan D. (2013). Is CO₂ an indoor pollutant? Higher levels of CO₂ may diminish decision making performance. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, Paper LBNL- 6148E.
- Greszta J., Gruszka A., Kowalkowska M. (2002). Wpływ emisji na ekosystem. *Wyd. Naukowe „Śląsk”*, Katowice.
- Hersoug L.G., Sjödin A., Astrup A. (2012). A proposed potential role for increasing atmospheric CO₂ as a promoter of weight gain and obesity. *Nutrition and Diabetes*, No 2, e31.
- Janka R.M. (2014). Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe. Podstawy obliczania i sterowania poziomem emisji. *WNT*, Warszawa.
- Kaiser K., Wolski A. (2011). Hałas i zanieczyszczenia w wentylacji pomieszczeń. *Wyd. IPP MASTA*.
- Lockwood A.H., Welker-Hood K., Rauch M., Gottlieb B. (2009). Coal's assault on human health. A report from physicians for social responsibility. *Physicians for social responsibility*, Washington, USA.
- Nantka M.B. (2011). Wentylacja z elementami klimatyzacji. *Wyd. PŚI*, Gliwice.

- Obwieszczenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej (2003) w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. Dz. U. nr 169, poz. 1650.
- Jankowska E., Pośniak M. (red.) (2009). Zespół chorego budynku – ocena parametrów środowiska. *CIOP-PIB*, Warszawa.
- PN-83/B-03430/Az3 (2000). Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania.
- PN-EN 13779 (2008). Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji.
- PN-EN 15251 (2012). Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę.
- Rice S.A. (2004). Human health risk assessment of CO₂: Survivors of acute high-level exposure and populations sensitive to prolonged low-level exposure. In: *Third Annual Conference on Carbon Sequestration*. Alexandria, Virginia, USA. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/04/carbon-seq/169.pdf>
- Robertson D.S. (2006). Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. *Current Science*, Vol. 90, No 12, 1607-1609.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej (2002) w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz. U. Nr 217, poz. 1833 ze zm. 2005 r., Dz. U. Nr 212, poz. 1769.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej (2010) zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz. U. Nr 141, poz. 950.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu. Dz. U. 2012, poz. 1032.
- Toftum J., Kjeldsen B.U, Wargocki P., Menå H. R., Hansen E.M.N., Clausen G.(2015). Association between classroom ventilation mode and learning outcome in Danish schools. *Building and Environment*, Vol. 92, 494-503.
- Wargocki P., Wyon D.P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, Vol. 59, 581-589.
- WHO Guideline Document (2000). Evaluation and use of epidemiological evidence for environmental health risk assessment. *World Health Organization Regional Office for Europe*, Copenhagen.
- Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej (1996) w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. *Mon. Pol.* nr 19, poz. 231.
- Zhang X., Wargocki P., Lian Z., Thyregod C. (2016). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality. Self-assessed acute health symptoms and cognitive performance. *Indoor Air*, E-pub ahead of print, doi:10.1111/ina.12284.

IMPACT OF THERMOMODERNISATION ERRORS OF PUBLIC BUILDINGS ON THE LEVEL OF INDOOR AIR QUALITY

Abstract: Renovation of public buildings, especially historic buildings, should ensure not only improve their condition and reduce the energy consumption, but also the appropriate level of indoor air quality. Inserting in the hallways of public buildings fire partitions without at the same time ensuring an adequate level of air exchange affects the deterioration of indoor air quality at these facilities. They arise areas where there is inadequate quality of indoor air. Air that they breathe, both employees of the institution taking up very often important decisions and the clients of these offices. The article presents a study on the impact of the scope of the modernization of selected public facilities, passenger load, the residence time of the meeting room and the volume and the type of ventilation system on the course and speed of changes in the concentration of carbon dioxide in the indoor air. These studies were conducted in eight areas both administrative and auditoriums of different sizes and purposes in two renovated nineteenth century public buildings. These buildings are the seats of the courts. This issue is related to research changes in humidity and air temperature. It has been shown that under high load passenger rooms after about 40-50 minutes up to 1.5 hours in the indoor air concentration of carbon dioxide is over two and three times higher than the threshold level of the sanitary CO₂.

Pracę wykonano na Uniwersytecie Opolskim w ramach realizacji badań statutowych pt. Analiza jakości powietrza na obszarach silnie zurbanizowanych. Składam serdeczne podziękowanie pani inż. Marii Berlik za znaczny wkład pracy przy przeprowadzeniu badań.