

Wydajność systemów DCV dla utrzymania stężenia dwutlenku węgla w pomieszczeniach

DCV systems air volume to maintain indoor carbon dioxide concentrations

MARIA KOSTKA, KAMIL BORDAKIEWICZ

DOI 10.36119/15.2022.1.2

Komfort użytkowników przebywających w pomieszczeniach nie polega wyłącznie na zachowaniu odpowiedniej temperatury i wilgotności względnej. W pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi niezwykle ważne jest także utrzymanie parametrów jakościowych, wpływających na bezpieczne i efektywne funkcjonowanie ludzkiego organizmu. W ostatnich latach najczęstszym dodatkowym parametrem monitorowanym w pomieszczeniach użytkowych jest stężenie CO₂. Dotyczy to zwłaszcza popularyzujących się obecnie w Polsce systemów DCV, które w sposób ciągły dostosowują swoją wydajność do bieżących potrzeb pomieszczeń.

W niniejszym artykule przedstawiono metodę określania antropogenicznej emisji dwutlenku węgla oraz zestawiono minimalne strumienie powietrza wentylującego wymaganego do utrzymania klas środowiska wewnętrznego przywołanych w normie PN-EN 16798-1:2019-06 [1]. Jest to zagadnienie kluczowe na etapie projektowania systemu wentylacyjnego, gdyż może decydować o jego ostatecznej wydajności.

Słowa kluczowe: wentylacja, strumień powietrza, DCV, VAV, CO₂, IAQ, wentylokonwektory

The comfort of rooms occupants does not only consist in maintaining the appropriate temperature and relative humidity. In rooms intended for people, it is also extremely important to maintain quality parameters that affect the safe and effective functioning of the human body. In recent years, the most common additional parameter monitored in human occupied spaces has been CO₂ concentration. This is especially true of DCV systems which are currently getting more and more popular in Poland, which constantly adjust their performance to the current needs of rooms. This article presents a method for determining anthropogenic carbon dioxide emissions and summarizes the minimum ventilation air volumes required to maintain the indoor environment classes referred to in the PN-EN 16798-1: 2019-06 standard [1]. This is a key issue at the stage of designing the ventilation system as it may determine its final performance.

Keywords: ventilation, air volume, DCV, VAV, CO₂, IAQ, fan coil

Wprowadzenie

Jeszcze kilka lat temu, praca tradycyjnych systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych oparta była głównie o wskazania czujników temperatury oraz wilgotności względnej. Czujniki te, umieszczone w strefie przebywania ludzi lub w instalacji wywiewnej, informowały o zachowaniu lub przekroczeniu warunków termicznych i wilgotnościowych w pomieszczeniach. Parametry te stanowiły główne wskaźniki komfortu wewnętrznego. W ostatnich latach znacznie większą uwagę przykłada się do dwóch dodatkowych kwestii – do ograniczenia zużycia energii w systemach wentylacyjnych, ale i całych budynkach oraz do poprawienia parametrów jakościowych środowiska wewnętrznego. Jest klika przyczyn zwiększenia wagi tych dwóch zagadnień. Przede wszystkim zaostreniu ulegają

wymogi prawne dotyczące parametrów energetycznych budynków, ale także coraz większa jest świadomość społeczeństwa, które chce żyć w przyjaznym i bezpiecznym otoczeniu oraz ograniczać swój wpływ na środowisko naturalne. Jakość środowiska wewnętrznego oraz oszczędność energii są ważne także na rynku inwestycyjnym, gdyż budynki coraz częściej poddawane są kompleksowej ocenie w certyfikacji np. LEED, BREEAM czy TAJL [2], a na zagadnienie to położony jest tam duży nacisk.

Powyższe przesłanki przyczyniają się do coraz większej popularyzacji systemów z grupy tzw. DCV („demand control ventilation”) czyli „wentylacji na żądanie” lub też „wentylacji sterowanej według potrzeb”. Rozwiązania te zaliczyć można również do grupy systemów VAV („variable air volume”), w których strumień objętości powietrza wentylującego dostosowy-

wany jest do bieżących potrzeb użytkowników. Pozwala to zachować wysoką jakość środowiska wewnętrznego, przy jednoczesnej minimalizacji potrzeb energetycznych. Sygnałem sterującym dla takiego systemu są współcześnie czujniki temperatury, wilgotności względnej, stężenia dwutlenku węgla czy rzadziej lotnych związków organicznych. Co ważne, czujniki te mogą być łączone w różnych konfiguracjach, w zależności od potrzeb pomieszczenia oraz konfiguracji systemu wentylacji. Przykładowo w systemach dwustopniowych opartych o pracę np. wentylokonwektorów lub klimatyzatorów, powietrze zewnętrzne ma najczęściej temperaturę ustawioną centralnie, niezmienną mimo wahających się obciążeń cieplnych pomieszczeń. Za komfort termiczny odpowiadają tu indywidualne urządzenia wewnętrzne, ale stężenie CO₂ wynika z ilości doprowadzonego

dr inż. Maria Kostka – <https://orcid.org/0000-0002-3511-744X>, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska. Amgr inż. Kamil Bordakiewicz – absolwent PWR. Adres do korespondencji/Corresponding author: maria.kostka@pwr.edu.pl

powietrza zewnętrznego. W systemach centralnych, tj. w klasycznych systemach CAV i VAV powietrze zewnętrzne ma jednocześnie za zadanie utrzymanie komfortu cieplnego oraz stężenia CO₂, a także wilgotności względnej jeśli jest to system klimatyzacyjny. Współczesne systemy DCV są w stanie kontrolować i zmieniać strumień powietrza, nawet jeśli jest to strumień wyłącznie higieniczny (jak ma to miejsce we wspomnianych systemach dwustopniowych czy nawet w obiektach mieszkalnych), co nie było dotąd powszechną praktyką w stosowanych w Polsce instalacjach wentylacji tego typu.

Strumień powietrza wynikający z przepisów

Jak wspomniano wcześniej, objętość strumienia wentylującego wymagana do utrzymania dobrej jakości powietrza we wnętrzach wynika z tzw. strumienia higienicznego. Polskie przepisy są dość ubogie w informacje dotyczące jego wymaganej objętości. Nie zawierają precyzyjnych wskazań jak strumień ten powinien się zmieniać np. w zależności od przeznaczenia pomieszczeń czy aktywności fizycznej ludzi, co powoduje znaczne rozbieżności w założeniach czynionych przez projektantów. Przykładowo, aktualne *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [3] (nazywane dalej *w warunkami technicznymi*) jako minimalny strumień higieniczny w mieszkaniach podaje 20m³/h na każdą osobę przewidzianą na pobyt stały w obiekcie. Dla pomieszczeń pracy natomiast odwołuje się do przepisów BHP. Aktualne *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy* [4] dość powierzchownie informuje, że w pomieszczeniach pracy wymiana powietrza powinna wynikać z potrzeb użytkowych i funkcji pomieszczeń, bilansu ciepła i wilgoci oraz zanieczyszczeń stałych i gazowych. Warunki techniczne [3] odwołują się także do części treści wycofanej (ale z tego powodu nadal wykorzystywanej) normy PN-83/B-03430 *Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania* [5]. Dzieli ona budynki na mieszkalne, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Dla budynków mieszkalnych oraz zamieszkania zbiorowego podaje strumień powietrza uzależnione od przeznaczenia pomieszczenia. Dodatkowo dla obiektów zamieszkania zbiorowego strumień

przypadający na jednego użytkownika powinien wynosić 20m³/h, przy czym w pomieszczeniach mieszkalnych wymiana powietrza nie powinna być mniejsza niż 1h⁻¹. W obiektach użyteczności publicznej pomieszczenia przeznaczone do stałego i czasowego pobytu ludzi powinny mieć zapewniony dopływ co najmniej 20 m³/h powietrza zewnętrznego dla każdej przebywającej osoby. Jeśli dozwolone jest palenie tytoniu, strumień powietrza powinien być większy i wynosić 30 m³/h. Dla pomieszczeń przeznaczonych do przebywania dzieci w żłobkach i przedszkolach, strumień powietrza zewnętrznego może być obniżony do 15 m³/h dla każdego dziecka. Widać zatem, że wymagania normy zostały częściowo przeniesione do warunków technicznych [3].

Aktualnym, ale dotychczas mało znanym w branży projektowej aktem prawnym, który także wspomina o minimalnych strumieniach wentylujących, jest norma PN-EN 16798-1:2019-6 [1]. Wyróżnia ona cztery kategorie pomieszczeń w zależności od oczekiwanej jakości środowiska wewnętrznego. Dla klasy najwyższej (II) jednostkowy strumień wymagany do usunięcia zanieczyszczeń pochodzących od człowieka dorosłego, przebywającego w pozycji siedzącej, nieprzystosowanego do warunków wewnętrznych, wynosi 36 m³/h (10 l/s), a dla najniższej (IV) 10 m³/h na osobę. Klasy II i III wymagają kolejno 25 m³/h i 15m³/h na użytkownika pomieszczenia. Ponadto, zgodnie z normą wydajność wentylacji powinna uwzględniać dodatkowo strumień pozwalający na usuwanie zanieczyszczeń pochodzących z budynku, różny w zależności od poziomu jego emisyjności.

We wszystkich przywołanych dokumentach brak jest precyzyjnych informacji, z których mogliby skorzystać projektanci systemów. Nie ma jasnych i czytelnych wskazań prawnych mówiących o konieczności uwzględnienia w projekcie charakteru pomieszczenia czy aktywności fizycznej ludzi. Tymczasem wysiłek fizyczny pełni często fundamentalną rolę, wpływając zarówno na strumień ciepła i wilgoci emitowany przez człowieka, jak i na emisję dwutlenku węgla. Innymi parametrami wpływającymi wyrażnie na emisję CO₂ są: wiek, wzrost i masa ciała, a nawet dieta.

Strumień powietrza wynikający z emisji CO₂

Pomiary i analizy koncentracji CO₂ w pomieszczeniach oraz badania jego wpływu na ludzki organizm prowadzone

są na całym świecie [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Wyniki wielu z tych badań wskazują na zbyt dużą jego koncentrację w pomieszczeniach oraz korelację pomiędzy jego stężeniem, a jakością korzystania z pomieszczeń deklarowaną przez użytkowników. Oznacza to konieczność położenia większego nacisku na stężenie CO₂ w trakcie projektowania oraz eksploatacji budynków.

Ostateczny strumień powietrza zewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi może być określany różnymi metodami w zależności od rodzaju przyjętego systemu wentylacyjnego. Niekiedy ma źródło w bilansie obciążeń cieplnych czy emisji wilgoci, a w innych przypadkach stanowi wyłącznie minimalny strumień higieniczny, wynikający z liczby użytkowników oraz nieprecyzyjnych przepisów. Określenie strumienia minimalnego w oparciu o emisję CO₂ było do tej pory w pomieszczeniach bytowych rzadko spotykane, co powinno ulec zmianie przy obecnym kierunku rozwoju systemów wentylacyjnych. Nie każdy rodzaj pomieszczeń wymagać będzie innych objętości powietrza niż wynika to z aktualnie stosowanych procedur, jednak część z nich, zwłaszcza przeznaczonych do większej aktywności ludzi lub wymagających wysokiej klasy jakości środowiska wewnętrznego, powinna mieć ten strumień zwiększony w stosunku do obecnych standardów.

O ile określenie strumienia powietrza wentylującego na podstawie emisji ciepła i wilgoci jest szeroko omawiane w literaturze branżowej i pospolicie stosowane przez projektantów, to dokładniejsze obliczenia związane z emisją dwutlenku węgla nie są już sprawą tak oczywistą. Polska literatura branżowa traktowała do tej pory to zagadnienie dość powierzchownie, nie skupiając się na przedstawianiu dokładniejszych danych obliczeniowych. Sama kalkulacja strumienia powietrza w oparciu o emisję CO₂ jest z pozoru zadaniem nieskomplikowanym. Wymagana jest w tym celu znajomość wewnętrznej emisji tego gazu oraz jego dopuszczalnego przyrostu w pomieszczeniu (Δs_{CO_2}).

$$\dot{V}_{CO_2} = \frac{K_{CO_2}}{\Delta s_{CO_2}} = \frac{K_{CO_2}}{s_2 - s_1} \cdot \frac{m^3}{s} \quad (1)$$

gdzie:

K_{CO_2} – sumaryczna emisja dwutlenku węgla od wszystkich źródeł w pomieszczeniu, g/h

s_1 – początkowe stężenie dwutlenku węgla w powietrzu wprowadzanym do pomieszczenia, mg/m³

s_2 – maksymalne oczekiwane stężenie dwutlenku węgla w pomieszczeniu, mg/m^3

Zazwyczaj powietrze wprowadzane do pomieszczeń jest w rzeczywistości powietrzem atmosferycznym, poddany filtracji i obróbce termicznej. Procesy te nie wpływają jednak na zawarty w nim CO_2 . Inaczej wygląda sytuacja w przypadku stosowania recyrkulacji, gdyż tam wtórne wykorzystanie zużytego powietrza powoduje najczęściej wzrost zawartości dwutlenku węgla w powietrzu doprowadzanym do wnętrza. Systemy takie wymagają dodatkowych obliczeń stężenia początkowego s_1 .

Stężenie początkowe CO_2 w powietrzu atmosferycznym nie ma wartości stałej. Zgodnie z polskim raportem Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska z roku 2016 [12] jego średnioroczne stężenie uległo w ostatnich latach wyraźnemu wzrostowi. Taki trend obserwowany jest również na całym świecie. Na rysunku 1

ków szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [13]. W aktualnie obowiązującym rozporządzeniu NDS dla CO_2 wynosi $9000 \text{ mg}/\text{m}^3$ (ok. 5000 ppm). Należy jednak zwrócić uwagę iż jest to stężenie, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego czasu pracy, przez okres jego aktywności zawodowej, nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń. Nie ma ona zatem nic wspólnego z komfortem wewnętrznym, a jedynie z bezpieczeństwem użytkowania pomieszczeń. Biorąc pod uwagę komfort to istotne informacje znajdują się w normie PN-EN16798-1:2019-6 [1]. Podaje ona dopuszczalny przyrost stężenia CO_2 powyżej stężenia w powietrzu zewnętrznym dla czterech kategorii pomieszczeń niemieszkalnych (przy standardowej emisji CO_2 wynoszącej $20 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{os})$) oraz mieszkalnych. Należy zaznaczyć, że dla pomieszczeń nowobudowanych i remontowanych standardowa

jest kategoria II., a kategoria I. to budynki w najwyższej klasie. W tabelach 1. i 2. zastawiono maksymalny przyrost oraz końcowe stężenia CO_2 w pomieszczeniach w zależności od ich kategorii, przy założeniu wentylowania pomieszczeń powietrzem zewnętrznym, bez recyrkulacji.

Kolejną trudnością na jaką napotkają można podczas obliczeń jest określenie antropogenicznej emisji CO_2 . Istnieje wiele czynników wpływających na zróżnicowanie ilości tego zanieczyszczenia wydzielanego przez człowieka do środowiska wewnętrznego, z czego najważniejszymi są: rodzaj aktywności fizycznej, wiek i powierzchnia ciała. W literaturze [14, 15] znaleźć można kilka zależności umożliwiających obliczenie ilości CO_2 emitowanej przez ludzi, m.in.:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{0,00276 \cdot A_D \cdot M \cdot RQ}{(0,23RQ + 0,77)} \cdot \frac{1}{s} \quad (2)$$

$$V_{\text{CO}_2} = RQ \cdot \text{BRM} \cdot M \cdot \frac{T}{P} \cdot 0,000211, \frac{1}{s} \quad (3)$$

gdzie:

A_D – powierzchnia ciała, wg Dubois [16], m^2

M – współczynnik tempa metabolizmu, met

RQ – współczynnik oddechowy, iloraz oddechowy,

BRM – wskaźnik podstawowej przemiany materii, $\text{MJ}/\text{dzień}$

T – temperatura, K

P – ciśnienie, kPa

Powierzchnia ciała może zostać obliczona na podstawie masy i wzrostu człowieka zgodnie równaniem [14]:

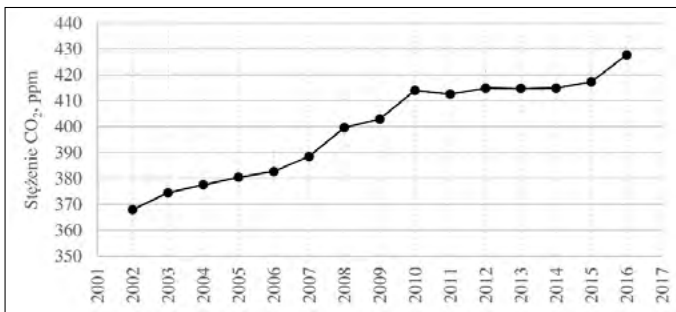
$$A_D = 0,202H^{0,725} \cdot W^{0,425}, \text{ m}^2 \quad (4)$$

gdzie:

H – wzrost człowieka, m

W – masa ciała, kg

Współczynnik oddechowy RQ , jest stosunkiem objętości dwutlenku węgla wydychanego w procesie oddychania do objętości wdychanego tlenu, a jego wartość zależy przede wszystkim od diety. Badania, oparte na danych dotyczących żywienia ludzi w USA [17] wykazały, że przeciętna wartość RQ wynosi ok. 0,85 i ma tendencję do wzrostu przy cięższej aktywności fizycznej (powyżej 2 met). Zależność ta nie jest prosta i nie została dokładnie opisana w literaturze, natomiast większy wpływ na wyniki wytwarzania CO_2 ma zmienność wartości M niż towarzysząca im zmiana RQ [14]. W tabeli 3. przedstawiono wartości współczynnika tempa metabolizmu M w zależności od wykonywanej aktywności fizycznej.



Rysunek 1. Średnie roczne stężenie dwutlenku węgla w stacji Puszcza Borecka w latach 2002 – 2016 [12]
Figure 1. Average annual carbon dioxide concentration at the Puszcza Borecka station in 2002-2016 [12]

przedstawiono wyniki pomiarów w stacji Puszcza Borecka w latach 2002 – 2016. W roku 2016 średnie roczne stężenie CO_2 wyniosło blisko 430 ppm i było wyższe o ok. 16% w stosunku do roku 2002. Chwilowe wartości ulegają dodatkowo większym wahaniom. Do obliczeń strumienia powietrza wynikającego ze stężenia CO_2 można z pewnym przybliżeniem założyć na ten moment stężenie w powietrzu atmosferycznym z zakresu ok. 410-420 ppm, co odpowiadać będzie wartościom w okresie stabilizacji w latach 2010 – 2015. Jest to równoznaczne z zakresem wartości ok. $740 - 755 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Maksymalne stężenie CO_2 jakiego oczekiwać możemy w pomieszczeniu (s_2) przyjmuje różne wartości, w zależności od tego czy wentylacja ma spełniać wymogi bezpieczeństwa czy komfortu. Tradycyjnie wykorzystuje się w takich obliczeniach najwyższe dopuszczalne stężenie danej substancji (NDS) podane w kolejnych nowelizacjach Rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynni-

Tabela 1. Przyrost stężenia CO_2 w pomieszczeniach niemieszkalnych i pomieszczeniach użytkowanych w mieszkaniach oraz maksymalne stężenie w pomieszczeniach dla $s_1 \approx 415 \text{ ppm}$

Table 1. Increase of CO_2 concentration in non-residential rooms and occupied living rooms and the maximum concentration in rooms for $s_1 \approx 415 \text{ ppm}$

Kategoria pomieszczenia	Przyrost stężenia CO_2 w pomieszczeniu [1]	Maksymalne stężenie CO_2 w pomieszczeniu	
		ppm	mg/m^3
-	ppm	ppm	mg/m^3
I	550	965	1735
II	800	1215	2185
III	1350	1765	3175
IV	1350	1765	3175

Tabela 2. Przyrost stężenia CO_2 w pomieszczeniach mieszkalnych oraz maksymalne stężenie w pomieszczeniach dla $s_1 \approx 415 \text{ ppm}$ – sypialnie

Table 2. Increase of CO_2 concentration in residential rooms and the maximum concentration in rooms for $s_1 \approx 415 \text{ ppm}$ – bedrooms

Kategoria pomieszczenia	Przyrost stężenia CO_2 w pomieszczeniu [1]	Maksymalne stężenie CO_2 w pomieszczeniu	
		ppm	mg/m^3
-	ppm	ppm	mg/m^3
I	380	795	1430
II	550	965	1735
III	950	1365	2455
IV	950	1365	2455

Tabela 3. Wybrane współczynniki tempa metabolizmu M [18]

Table 3. Selected coefficients of the metabolic rate M [18]

Aktywność fizyczna	M (met)
Sen	0,95
Pozycja leżąca, siedząca – odpoczynek	1,0 – 1,3
Pozycja stojąca – odpoczynek	1,3
Czytanie, pisanie, praca przy komputerze	1,3
Udział w nabożeństwach	1,3
Widz na imprezie sportowej	1,5
Praca siedząca, wysiłek lekki (np. biuro)	1,5
Wolny chód, poniżej ok. 3km/h, teren płaski	2,0
Opieka nad dzieckiem	2,0 – 3,0
Trening oporowy – wysiłek lekki	2,8
Praca stojąca lekka (np. sprzedawca)	3,0
Prace kuchenne	3,3
Umiarkowany chód, ok. 4,5-5km/h, teren płaski	3,5
Trening oporowy – wysiłek umiarkowany	3,8
Prace domowe, sprzątanie – wysiłek umiarkowany	3,8
Ćwiczenia zorganizowane w klubie fitness	5,0
Aerobik	7,3
Taniec	7,8
Trening oporowy – wysiłek ciężki	8,0

Zgodnie z równaniem (3) emisja CO₂ jest zależna także od wskaźnika podstawowej przemiany materii BRM. Na jego wartość wpływa wiek, masa ciała (m, kg) oraz płeć i można go obliczyć na podstawie informacji zawartych w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości wskaźnika podstawowej przemiany materii BRM [19, 20]

Table 4. Values of the basal metabolic rate [18, 19]

Wiek	BRM, MJ/dzień	
	Mężczyźni	Kobiety
< 3	0,249m – 0,127	0,244m-0,130
3 do 10	0,095m + 2,110	0,085m+2,033
10 do 18	0,074m+2,754	0,056m+2,898
18 do 30	0,063m+2,896	0,062m+2,036
30 do 60	0,048m+3,653	0,034m+3,538
≥ 60	0,049m+2,459	0,038m+2,755

Tabela 5. Szacunkowa emisja CO₂ od jednej osoby, w zależności od płci, wieku i aktywności fizycznejTable 5. Estimated CO₂ emissions per person, depending on sex, age and physical activity

Grupa wiekowa	Średnia masa ciała, kg	Średni wzrost, cm	Poziom aktywności fizycznej, met										
			0,95	1,3	1,5	2	3	4	5	6	7	8	
			Emisja CO ₂ , l/s										
Kobiety													
Żłobki	<1	7,7	69	0,0008	0,0012	0,0013	0,0018	0,0027	0,0036	0,0045	0,0054	0,0063	0,0071
	1 – <3	12	86	0,0012	0,0016	0,0019	0,0025	0,0038	0,0051	0,0063	0,0076	0,0089	0,0101
Przedszkola	3 – <6	17,5	107	0,0017	0,0023	0,0026	0,0035	0,0052	0,0070	0,0087	0,0104	0,0122	0,0139
Szkoły podstawowe	6 – <10	26	129	0,0022	0,0031	0,0035	0,0047	0,0071	0,0094	0,0118	0,0141	0,0165	0,0189
	10 – <15	43	155	0,0032	0,0043	0,0050	0,0067	0,0100	0,0133	0,0167	0,0200	0,0233	0,0267
Szkoły średnie	15 – 19	57	165	0,0037	0,0051	0,0059	0,0079	0,0118	0,0157	0,0197	0,0236	0,0275	0,0315
Dorośli	≥ 20	65	165	0,0040	0,0054	0,0062	0,0083	0,0125	0,0166	0,0208	0,0250	0,0291	0,0333
Mężczyźni													
Żłobki	<1	8,5	70	0,0009	0,0012	0,0014	0,0019	0,0028	0,0038	0,0047	0,0056	0,0066	0,0075
	1 – <3	13	90	0,0013	0,0018	0,0020	0,0027	0,0041	0,0054	0,0068	0,0081	0,0095	0,0108
Przedszkola	3 – <6	18	108	0,0017	0,0023	0,0027	0,0035	0,0053	0,0071	0,0089	0,0106	0,0124	0,0142
Szkoły podstawowe	6 – <10	28	130	0,0023	0,0032	0,0037	0,0049	0,0073	0,0098	0,0122	0,0147	0,0171	0,0196
	10 – <15	45	157	0,0033	0,0045	0,0051	0,0069	0,0103	0,0137	0,0172	0,0206	0,0240	0,0275
Szkoły średnie	15 – 19	67	177	0,0042	0,0058	0,0067	0,0089	0,0133	0,0177	0,0222	0,0266	0,0310	0,0355
Dorośli	≥ 20	83	177	0,0046	0,0063	0,0073	0,0097	0,0146	0,0194	0,0243	0,0291	0,0340	0,0389

Tabela 6. Jednostkowy strumień wentylujący wymagany do utrzymania przyrostu CO₂, pomieszczenia kategorii IITable 6. Individual ventilation air volume required to maintain the CO₂ concentration, II. category of room

Przeznaczenie pomieszczenia	Grupa wiekowa	Strumień minimalny, m ³ /(h.os)	
		Kobieta	Mężczyzna
Żłobek:			
– sala odpoczynku (0,95 met)	1 – <3	8	9
– sala zabaw (1,5 met)	1 – <3	9	9
Przedszkole:			
– sala odpoczynku (0,95 met)	3 – <6	11	11
– sala zabaw (2,0 met)	3 – <6	16	16
Szkoła podstawowa:			
– sala lekcyjna, aula (1,5 met)	10 – <15	23	24
– świetlica (2 met)	6 – <10	22	23
– sala gimnastyczna (7 met)	10 – <15	108 (64')	111 (66')
Szkoła średnia:			
– sala lekcyjna, aula (1,5 met)	15 – 19	27	31
– sala gimnastyczna (7 met)	15 – 19	127 (75')	143 (85')
Biuro (1,5 met)	≥ 20	29	34
Sala konferencyjna (1,3 met)	≥ 20	25	29
Kino (1 met)	≥ 20	19	22
Sala koncertowa			
– opera, filharmonia (1,3 met)	≥ 20	25	29
– muzyka rozrywkowa (3 met)	≥ 20	58	67
Pomieszczenia handlu (2 met)	≥ 20	38	45
Sale sportowe:			
– wysiłek lekki (3 met)	≥ 20	58 (34')	67 (40')
– wysiłek umiarkowany (5 met)	≥ 20	96 (57')	112 (66')
– wysiłek ciężki (8 met)	≥ 20	154 (91')	179 (106')
Pomieszczenia mieszkalne:			
– salon (1,3 met)	≥ 20	25 (36'')	29 (42'')
– spokoj dziecięcy (1,5 met)	10 – <15	34 (49'')	35 (50'')
– sypialnia dorośli (0,95 met)	≥ 20	27 (38'')	31 (45'')
* – wartość porównawcza dla pomieszczeń III. kategorii			
** – wartość porównawcza dla pomieszczeń I. kategorii			

Zależność umożliwiającą obliczenie emisji CO₂ przedstawiona równaniem (2), uwzględnia w sposób bezpośredni wielkość ciała ludzkiego i aktywność fizyczną, co w kolejnym wzorze (3) częściowo pojawia się także w postaci wskaźnika BRM

uzależnionego od wieku i wagi. Zależność (3) bierze pod uwagę także temperaturę oraz ciśnienie w otoczeniu człowieka. Ze względu na stosunkowo wąski zakres zmienności tych parametrów w pomieszczeniach przeznaczonych dla ludzi,

w wielu pozycjach literatury wykorzystywany jest wzór (2). Przykładowo dla mężczyzny o masie 80kg, pracującego zarówno lekko jak i ciężko, przy zmianie temperatury w granicach 20°C – 25°C i ciśnienia w granicach 980 hPa – 1020hPa, zmiana w wydzielaniu dwutlenku węgla wynosi poniżej 6%. Z powodu stosunkowo niewielkiego wpływu tych parametrów na wyniki, w dalszej części opracowania także skupiono się na zależności (2).

W tabeli 5. przedstawiono emisję CO₂ obliczoną na podstawie równania (2). Obliczenia wykonano dla różnych grup wiekowych, dla których średni wzrost i masa ciała oszacowane zostały na podstawie siatek centylowych (dla grup wiekowych do 20 roku życia) oraz w oparciu o raport „Statystyczny Polak” [21]. Należy zaznaczyć, iż obserwowana ogólniowa tendencja do zwiększania masy ciała powoduje, że uzyskane dalej wyniki również mają tendencję wzrostową.

Na podstawie powyższych informacji możliwe jest określenie jakie strumienie powietrza powinny być doprowadzane do pomieszczeń, aby spełnione były wymagania dotyczące ich klasy (wg tabeli 1. i tabeli 2.). W tabeli 6. przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla wybranych funkcji pomieszczeń. Wynik dotyczy strumienia doprowadzanego dla pojedynczego użytkownika, a grupy wiekowe i aktywność fizyczną dostosowano do przeznaczenia pomieszczenia. Aby możliwe było wykorzystanie danych w tabeli 5. konieczne jest przeliczenie emisji V_{CO₂} na K_{CO₂} przy czym należy wykazać się znajomością gęstości dwutlenku węgla. Do obliczeń przyjęto wartość dla 20°C wynoszącą ρ_{CO₂} = 1,84 g/dm³.

Na rysunku 2. przedstawiono zależność strumienia wentylującego wynikającego z emisji CO₂, wymaganego do utrzymania wszystkich kategorii pomieszczeń

wymienionych w normie PN-EN 16798-1:2019-06 [1] od aktywności fizycznej osób dorosłych. Należy wspomnieć, że poszczególne kategorie pomieszczeń mają w normie różne zakresy dopuszczalne, także dla innych parametrów powietrza. W przypadku CO₂ zarówno kategoria III. jak i IV. mają ten sam dopuszczalny przyrost jego stężenia, natomiast inne parametry w tych grupach mogą mieć już różne wartości (np. temperatura).

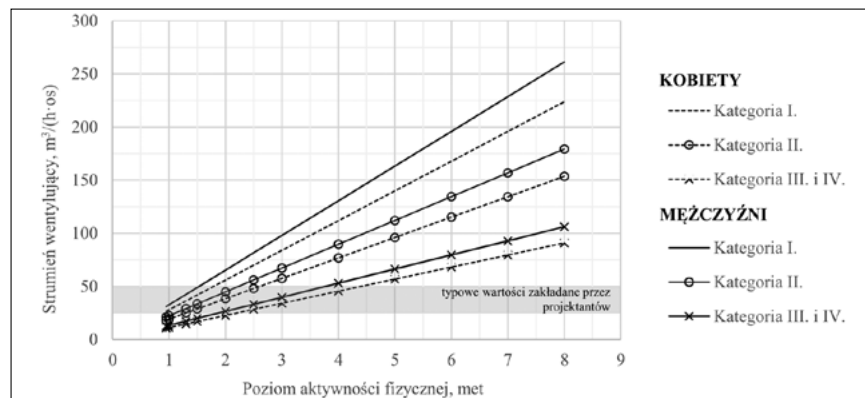
Wnioski i podsumowanie

Celem niniejszego artykułu było zwrócenie uwagi na swego rodzaju lukę obliczeniową oraz prawną dotyczącą określania strumienia powietrza wentylującego. Dotyczy to zwłaszcza systemów, w których pomieszczenia wentylowane są tzw. strumieniem higienicznym. Są to powszechnie spotykane na polskim rynku rozwiązania wykorzystujące indywidualne urządzenia wewnętrzne tj. klimatyzatory, klimakonwektory, wentylokonwektory czy belki chłodzące, ale także systemy centralne z recyrkulacją powietrza oraz systemy mieszkaniowe. Obecny trend projektowania instalacji wentylacji na całym świecie prowadzi do wzmacniania i rozwoju systemów DCV, w których strumień powietrza dostosowuje się do bieżących potrzeb pomieszczeń. Zmiana wydajności instalacji opiera się najczęściej na pomiarach temperatury, wilgotności względnej i/lub stężenia CO₂ w pomieszczeniach, przy czym w metodologii obecnie stosowanej w Polsce brakuje szczegółowych i zarazem prostych wskazówek, jak uwzględnić ostatni z wymienionych parametrów. Informacji takich nie dostarcza zarówno literatura, jak też powszechnie wykorzystywane i obowiązujące akty prawne.

Na polskim rynku konwencja bytowych systemów DCV była do tej pory realizowana niemal wyłącznie w central-

nych instalacjach VAV oraz w higrosterowanych rozwiązaniach mieszkaniowych, powszechnych w obiektach wielorodzinnych. Obecnie na świecie zmienny strumień powietrza stosowany jest także w rozwiązaniach z indywidualnymi urządzeniami wewnętrznymi, zwłaszcza wentylatorowymi. Stosowanie zmiennego strumienia w rozwiązaniach z urządzeniami indukcyjnymi oraz przy belkach pasywnych i chłodzeniu płaszczyznowym jest także możliwe, ale wymaga szczególnej ostrożności, gdyż zmiana ilości powietrza zewnętrznego wpływa na wydajność urządzeń wewnętrznych oraz możliwość odprowadzania wilgoci z pomieszczeń. Przy braku świadomości i zreczności projektanta może stać się to powodem wielu poważnych problemów eksploatacyjnych.

Zgodnie z wynikami obliczeń przedstawionymi w tabeli 6. i na rysunku 2. nie we wszystkich pomieszczeniach obliczenia oparte o emisję CO₂ zdezaktualizują obecnie powszechnie stosowane strumienie wentylujące. Minimalny strumień 15 m³/h przypadający na małe dziecko, wymagany przez warunki techniczne [3] jest odpowiedni dla utrzymania stężenia dwutlenku węgla w pomieszczeniu standardowym II. kategorii. Także typowe wartości przyjmowane często przez projektantów z zakresu 25 – 50 m³/(h-os) są odpowiednie dla wielu grup pomieszczeń cechujących się niewielką aktywnością ludzi jak np. szkoły, biura, kina (≤ 2 met). Problem uwidoczni się natomiast w pomieszczeniach przeznaczonych do większych aktywności fizycznych. Dla takich obiektów dodatkowo podano w tabeli strumień wymagany dla utrzymania III. kategorii, gdyż nierównomierność podejmowanego wysiłku może prowadzić jedynie do okresowego spadku jakości środowiska wewnętrznego. Już przy stosunkowo niewielkim wysiłku (M = 3 met) utrzymanie II. kategorii pomieszczenia typowymi strumieniami nie przekraczającymi 50 m³/h będzie możliwe tylko dla wysiłku nierównomiernego. Pomieszczenia II. kategorii do wysiłku średniego i ciężkiego, przeznaczone zarówno dla dzieci i dorosłych wymagają strumieni przekraczających 100m³/(h-os). Po uwzględnieniu nierównomierności wysiłku czy okresowego spadku jakości powietrza, zasadnym wydaje się stosowanie strumieni ok. 80 – 100m³/(h-os) dla wysiłku umiarkowanego dorosłych i dla dużej aktywności dzieci oraz ok. 100 – 140m³/(h-os) dla ciężkiego wysiłku dorosłych. Tymczasem żaden z polskich przepisów nie podkreśla konieczności tak znacznego zwiększenia jednostkowego strumienia powietrza. Nie wszyscy projektanci mają również świadomość tak dużych



Rysunek 2.

Jednostkowy strumień wentylujący wymagany do utrzymania przyrostu stężenia CO₂ w pomieszczeniu w zależności od aktywności fizycznej, płci i kategorii pomieszczeń – osoby dorosłe
Figure 2. Individual ventilation air volume required to maintain the increase in CO₂ concentration in the room depending on physical activity, sex and category of rooms – adults

rozbieżności w wymaganiach, a u wielu z tych świadomych, presja inwestorów prowadzi do projektowania tanich inwestycji i eksploatacji systemów. Ostatecznym efektem jest ograniczanie jednostkowych strumieni powietrza do nieracjonalnego poziomu, niebędącego jednak w bezpośredniej sprzeczności z przepisami. O tej niedorzeczności zaczęto mówić głośno dopiero w kontekście zanieczyszczenia powietrza patogenami, po wybuchu pandemii COVID-19. Światowe badania jednoznacznie wskazują, że większa ilość zewnętrznego powietrza doprowadzanego do pomieszczeń zmniejsza ryzyko zakażenia i że istnieje konieczność dostosowania istniejących systemów do obecnej sytuacji epidemicznej [22, 23, 24]. Wymiana powietrza wymagana emisją CO₂ i zanieczyszczeniami biologicznymi są tymczasem zagadnieniami równoległymi.

Biorąc pod uwagę wyniki obliczeń dla pomieszczeń mieszkalnych (tabela 6.) strumienie podawane przez warunki techniczne [3] nie pozwalają na spełnienie wymagań II. kategorii pomieszczeń. Pamiętać należy, że w wielu obiektach mieszkalnych dodatkowa emisja CO₂ pochodzi z procesu spalania podczas gotowania posiłków na kuchenkach gazowych. Obliczone strumienie nie uwzględniają tych procesów, a obecność kuchenki gazowej w obiekcie powodować będzie okresowe zwiększenie stężenia CO₂. W tabeli 6. podano dodatkowo wartości porównawcze strumienia wymaganego dla utrzymania pomieszczeń I. kategorii. W rzeczywistości projektowej tak duże objętości powietrza w obiektach mieszkalnych są praktycznie niespotykane. Powodowałyby znaczne przewymiarowanie centralnie sterowanych urządzeń wentylacyjnych z odzyskiem ciepła, gdyż indywidualna regulacja ilości powietrza w każdym pomieszczeniu w takich obiektach jest na ten moment niestosowana. Wyjątkiem są systemy wywiewne w budownictwie wielorodzinnym np. higrosterowane, ale tam strumienie są z kolei minimalizowane ze względu na straty energii wywołane koniecznością ogrzania powietrza napływającego z zewnątrz.

Dodatkową, problemową kwestią związaną z omawianym tematem jest nieszczelność budynków. Przedstawione w artykule strumienie stanowią objętość powietrza świeżego, które powinno wentylować pomieszczenie, aby możliwe było odpowiednie rozcieńczenie dwutlenku węgla wydzielanego przez ludzi. Zwykle wartość ta interpretowana jest jako strumień wynikający z pracy wentylacji mechanicznej. Tymczasem realia eksploatacyjne nie są tak proste i oczywiste, gdyż w wielu obiektach ujawni się pewna niedoskonałość metody, która nie rozgranicza strumienia pochodzącego z wentylacji wymuszonej od strumienia

infiltrującego, wynikającego z nieszczelności wszystkich istniejących budynków. W praktyce, nawet w obiektach o wysokiej klasie energetycznej, pomieszczenia posiadające przegrody zewnętrzne, zwłaszcza przeszklone i do tego z oknami umożliwiającymi ich otwieranie, wentylowane są dodatkowo strumieniem powietrza zmiennym w czasie i będącym poza kontrolą projektanta. Skutkuje to niższymi wskazaniami wartości pomiarowych CO₂ niż wynikałoby to z danych obliczeniowych. Pomieszczenia wewnętrzne, nieprzeszkolone są tymczasem odcięte od infiltracji powietrza świeżego, a ewentualne napływające do wnętrza strumienie niepożądane mogą cechować się już zwiększonym stężeniem CO₂ (powietrze częściowo zużyte, napływające z innych pomieszczeń), a więc jego możliwości asymilacji zanieczyszczeń mogą być już wyczerpane. Należy tutaj zaznaczyć, że zmiany wprowadzane od kilkunastu lat w polskim (i nie tylko) budownictwie, prowadzić mają do ograniczenia zużycia energii m.in. poprzez uszczelnienie budynków i maksymalne ograniczenie niepożądanych strumieni infiltrujących, co skutkować będzie wzrostem wydajności wentylacji wymuszonej, wymaganej do usuwania zanieczyszczeń wewnętrznych.

BIBLIOGRAFIA

- PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki – Moduł M1-6
- Bartkiewicz P., Wojtas K.: „Jakość środowiska wewnętrznego jako składnik systemów kompleksowej oceny budynków”, INSTAL 7-8/2021, s. 15-19, DOI: 10.36119/15.2021.7-8.2
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy
- PN-83/B-03430 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania
- Bekó G., Lund T., Nors F., Toftum J., Clausen G.: „Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children”, *Building and environment*, 2010, Vol.45 (10), s. 2289-2295, DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.04.014
- Franco A., Leccese F.: „Measurement of CO₂ concentration for occupancy estimation in educational buildings with energy efficiency purposes”, *Journal of Building Engineering*, 2020-11, Vol.32, s. 101714, DOI: 10.1016/j.job.2020.101714
- Asif A., Zeeshan M., Jahanzaib M.: „Indoor temperature, relative humidity and CO₂ levels assessment in academic buildings with different heating, ventilation and air-conditioning systems”, *Building and environment*, 2018-04, Vol.133, s. 83-90, DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.01.042
- Zhang X., Luo G., Xie J., Liu J.: „Associations of bedroom air temperature and CO₂ concentration with subjective perceptions and sleep quality during transition seasons”, *Indoor air*, 2021-07, Vol.31 (4), s. 1004-1017, DOI: 10.1111/ina.12809
- Mishra, A.K; van Ruitenbeek, A.M.: Loomans, M.G.L.C; Kort, H.S.M.: „Window/door opening-mediated bedroom ventilation and its impact on sleep quality of healthy, young adults”, *Indoor air*, 2018-03, Vol.28 (2), s. 339-351, DOI: 10.1111/ina.12435
- Amanowicz Ł., Ratajczak K., Szczechowiak E.: „Analiza możliwości stosowania systemu wentylacji zdecentralizowanej w budynkach edukacyjnych”, *INSTAL* 10/2019, s. 20-25, DOI: 10.36119/15.2019.10.3
- „Monitoring tła zanieczyszczenia atmosfery w Polsce dla potrzeb EMEP, GAW/WMO i Komisji Europejskiej. Raport syntetyczny 2016”, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Gdynia 2017
- Rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy
- Persily A., de Jonge L.: „Carbon dioxide generation rates for building occupants”, *Indoor air*, 2017-09, Vol.27 (5), s.868-879, DOI: 10.1111/ina.12383
- Kapalo P., Mečiarová L., Vilečková S. i in.: „Investigation of CO₂ production depending on physical activity of students”, *International Journal of Environmental Health Research*, 2019, vol. 29, no. 1, 31-44, DOI: 10.1080/09603123.2018.1506570
- Du Bois D., Du Bois E.F.: „A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known”, *Archives of Internal Medicine*, 17, s. 863-871, DOI: 10.1001/archinte.1916.00080130010002
- Wright JD, Wang C-Y.: „Trends in Intake of Energy and Macronutrients in Adults from 1999-2000 Through 2007-2008”, *NCHS data brief*, 2010-11 (49), s.1-8
- <https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home>, dostęp: 13.12.2021
- FAO. Human Energy Requirements. Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation Geneva: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Nutrition Technical Report Series 1; 2001
- Schofield WN. „Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work”. *Hum Nutr Clin Nutr*. 1985;39C(Suppl 1): 5-41
- Kusy M. „Statystyczny Polak – studium przypadku na podstawie wyników badań ankietowych”, *StatSoft Polska*, 2013, https://media.statsoft.pl/_old_dnn/update/downloads/statystyczny_polak_studium_przypadku.pdf dostęp: 07.12.2021
- Cepiński W., Szałtański P., Misiński J.: „Redukcja rozprzestrzeniania koronawirusa SARS-CoV-2 i choroby COVID-19 poprzez instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne”, *INSTAL* 6/2020, s. 28-36, DOI: 10.36119/15.2020.6.3
- Pease L.F., Wang N., Salisbury T. i in.: „Investigation of potential aerosol transmission and infectivity of SARS-CoV-2 through central ventilation systems”, *Building and environment*, 2021-06-15, Vol.197, s. 107633-107633, DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107633
- Borro L., Mazzei L., Raponi M. i in.: „The role of air conditioning in the diffusion of Sars-CoV-2 in indoor environments: A first computational fluid dynamic model, based on investigations performed at the Vatican State Children’s hospital”, *Environmental research*, 2021-02, Vol.193, s. 110343, DOI: 10.1016/j.envres.2020.110343