MATERIAŁY INFORMACYJNE

OCHRONA DRÓG ODDECHOWYCH PRZY PODWYŻSZONYM STĘŻENIU CO_2 I SPECYFICZNYCH WARUNKACH ŚRODOWISKA

AGNIESZKA BROCHOCKA, ALEKSANDRA NOWAK

Zrealizowano w ramach VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej.
Zadanie nr 1.ZS.08,

pt. Opracowanie kryteriów, metod badań i czasu bezpiecznego stosowania dla filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego w zależności od stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wdychanym i specyficznych warunków środowiska pracy i życia
Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorki:
1. dr hab. inż. Agnieszka Brochocka
2. mgr inż. Aleksandra Nowak

Projekt okładki: Agnieszka Brochocka
Opracowanie redakcyjne: Kamil Jach
Opracowanie graficzne: Aleksandra Nowak, Agnieszka Brochocka, Kamil Jach
DOI: 10.54215/
Ochrona_drog_oddechowych_przy_podwyzszonym_stezeniu_CO2_i_specyficznych_warunkach_srodowiska_Brochocka_Nowak

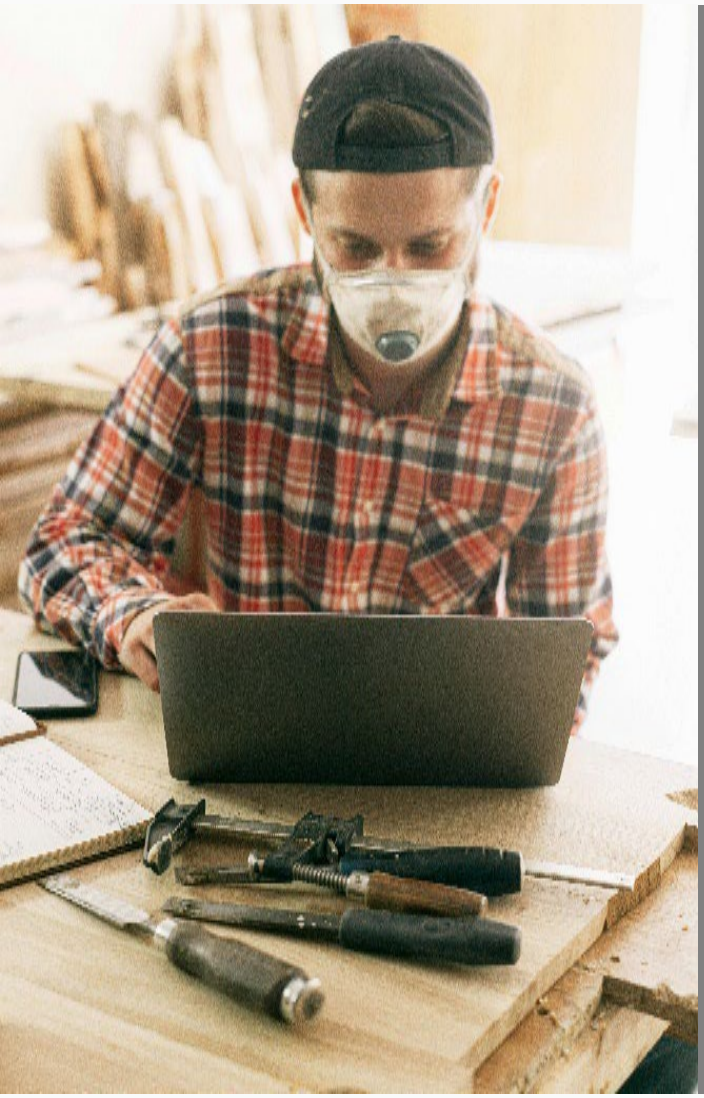
© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2025

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16,
00-701 Warszawa
tel. (22) 623 36 98,
www.ciop.pl

WPROWADZENIE

Wzrost stężenia dwutlenku węgla (CO_2) w atmosferze, obserwowany codziennie od 1958 r., dzięki zaangażowaniu prof. Charlesa Keelinga (a teraz jego syna) z Obserwatorium Scripps w Mauna Loa (Hawaje, USA), będący jednym z głównych wyzwań ekologicznych naszych czasów, ma również mniej oczywiste skutki zdrowotne, związane ze wzrostem jego zawartości w naszym bezpośrednim otoczeniu (czyli na ulicach miast, w mieszkaniach szkołach czy biurach). Badania naukowe wskazują, że poziom dwutlenku węgla w pomieszczeniach może wielokrotnie przekraczać wartości powszechnie uznawane za bezpieczne.

Według europejskich i amerykańskich norm, **dopuszczalne stężenie dwutlenku węgla w pomieszczeniach zamkniętych wynosi 1000 ppm (0,1%)**, co stanowi wymóg tzw. minimum higienicznego. Już w 1858 r. Max von Pettenkofer proponował 1000 ppm jako akceptowalny limit dobrej jakości powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych i użyteczności publicznej. W Polsce najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) w środowisku pracy określono na 5000 ppm (9000 mg/m³), a chwilowe (NDSCh) na 15000 ppm (27000 mg/m³). Te ustawowe normy mają na celu ochronę przed trwałymi, ujemnymi zmianami o stanie zdrowia pracownika przy wykonywaniu nieskomplikowanych czynności.



CO_2 NIE MA ZAPACHU. ZAGROŻENIE JEST NIEWIDZIALNE!

FIZJOLOGICZNE WYZWANIA

Coraz liczniejsze badania wskazują na obniżoną zdolność percepcji i sprawność intelektualną, gdy zawartość CO_2 w pomieszczeniach przekracza 1400 ppm. Badania eksperymentalne wykazały, że stężenie CO_2 na poziomie 3000-5000 ppm miało niekorzystny wpływ na czytanie ze zrozumieniem.

W bardziej kontrolowanych eksperymentach, już przy stężeniu 1000 ppm zarejestrowano obniżenie zdolności intelektualnych, a przy 2500 ppm inicjatywa i myślenie strategiczne uczestników zmniejszyły się do poziomu dysfunkcjonalnego. Badania sugerują, że krótkotrwała ekspozycja na CO_2 w stężeniu powyżej 0,1% wpływa na zdolności poznawcze, w tym podejmowanie decyzji i rozwiązywanie problemów.

Nawet umiarkowanie podwyższone stężenie dwutlenku węgla (do około 5000 ppm) może powodować przejściowy dyskomfort, bóle głowy, złe samopoczucie i niepokój. Stężenia w wykrytym zakresie (prawdopodobnie odnoszą się do stężeń pod częścią twarzową np. maską, półmaską) ogą powodować niepożądane objawy, takie jak zmęczenie, ból głowy i utrata koncentracji.

PODWYŻSZONY CO_2
=
MNIEJ O_2 DLA MÓZGU
=
WIĘKSZE RYZYKO BŁĘDÓW

ŚRODOWISKO PRACY

Gdy w miejscach przebywania ludzi występują zagrożenia inhalacyjne w postaci pyłów, aerozoli z patogenami lub substancjami szkodliwymi, których nie da się usunąć innymi metodami, konieczne jest stosowanie **środków ochrony indywidualnej**, w tym **sprzętu ochrony układu oddechowego**. Zalicza się do niego m.in. półmaski filtrujące, półmaski i maski skompletowane z elementami oczyszczającymi w postaci filtrów, pochłaniaczy i filtropochłaniaczy, oczyszczającego sprzętu z wymuszonym lub wspomaganym przepływem powietrza. Użytkowanie tego typu sprzętu, poza oczywistymi korzyściami ochronnymi, może wiązać się z pewnymi skutkami ubocznymi. Jednym z nich jest **gromadzenie się wydychanego powietrza pod częścią twarzową**, co może prowadzić do wzrostu stężenia dwutlenku węgla i pary wodnej (tworzy się tzw. „przestrzeń martwa"). Stężenie CO_2 w tej przestrzeni wzrasta z każdym kolejnym wydechem. Oddychając, człowiek wdycha tlen (O_2) i wydycha dwutlenek węgla (CO_2). Organizm w stanie spoczynku wytwarza ok. 0,2 litra CO_2 na minutę, a objętość powietrza przepływającego przez płuca (tzw. wentylacja minutowa) zależy od rodzaju pracy. W normalnych warunkach atmosferycznych zawartość CO_2 w powietrzu wynosi ok. 0,04% (400 ppm) i jest zupełnie bezpieczna.
Jeśli jednak w otoczeniu stężenie CO_2 wzrasta (np. w tunelu, zbiorniku, piwnicy, studzience, komorze fermentacyjnej), wdychane powietrze zaczyna zawierać istotną ilość CO_2, który nie może być skutecznie wydalany z organizmu.

W rezultacie CO_2 kumuluje się we krwi, prowadząc do wzrostu ciśnienia parcjalnego CO_2 (pCO_2), co z kolei powoduje objawy zatrucia. Podczas oddychania w półmasce część wydychanego CO_2 pozostaje w tzw. martwej przestrzeni oddechowej, a przy kolejnym wdechu ta porcja CO_2 jest ponownie wdychana.

Zbyt podwyższone stężenie dwutlenku węgla pod częścią twarzową często powoduje zmiany fizjologiczne, takie jak **uczucie zmęczenia, spadek koncentracji czy bóle głowy**. Problem zwiększonego stężenia CO_2 pod częścią twarzową został naukowo udowodniony w wielu badaniach, szczególnie w przypadku półmasek charakteryzujących się większą „przestrzenią martwą" i większym oporem oddychania. Podwojona objętość martwej przestrzeni i ponad dwukrotnie zwiększony opór oddychania prowadzą do ponownego wdychania CO_2 przy każdym cyklu oddechowym. Ten efekt występuje głównie w półmaskach filtrujących bezzaworowych.

W związku z powyższym, niezwykle istotne jest ustalenie zasad bezpiecznego użytkowania filtrującego SOUO w zależności od stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wdychanym i specyficznych warunków środowiska pracy i życia.

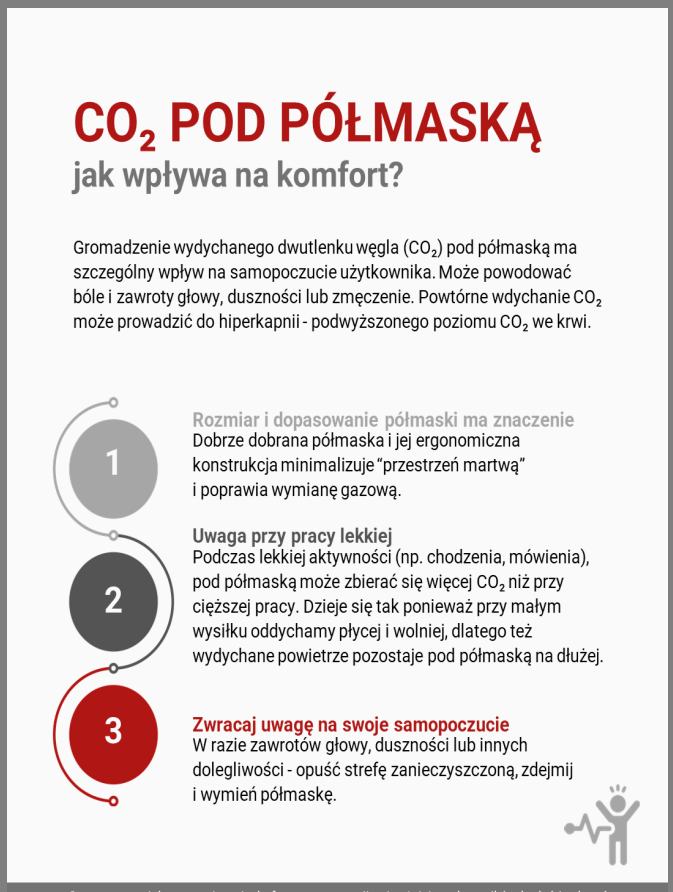
NAUKA

DLA TWOJEGO BEZPIECZEŃSTWA

CIOP-PIB realizuje zadanie mające na celu ustalenie zasad bezpiecznego użytkowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego w zależności od stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wdychanym i specyficznych warunków środowiska i życia. Celem pośrednim jest poprawa bezpieczeństwa użytkowników poprzez wdrożenie narzędzia informatycznego – **modułu do aplikacji mobilnej** – pozwalającego określić czas bezpiecznego użytkowania sprzętu w zależności od stężenia CO_2 w powietrzu wdychanym.

Aby to osiągnąć, w ramach projektu opracowano metodykę badań i zbudowano stanowisko do wyznaczania zawartości CO_2 w powietrzu wdychanym z uwzględnieniem zmiennego stężenia CO_2 w otoczeniu. Badania te obejmowały zarówno testy laboratoryjne, jak i badania z udziałem ludzi.

BADAMY, BYŚ MÓGŁ ODDYCHAĆ BEZPIECZNIE !



CO_2 POD PÓŁMASKĄ

jak wpływa na komfort?

Gromadzenie wydychanego dwutlenku węgla (CO_2) pod półmaską ma szczególny wpływ na samopoczucie użytkownika. Może powodować bóle i zawroty głowy, duszności lub zmęczenie. Powtórne wdychanie CO_2 może prowadzić do hiperkapnii - podwyższonego poziomu CO_2 we krwi.

1 **Rozmiar i dopasowanie półmaski ma znaczenie**
Dobrze dobrana półmaska i jej ergonomiczna konstrukcja minimalizuje "przestrzeń martwą" i poprawia wymianę gazową.

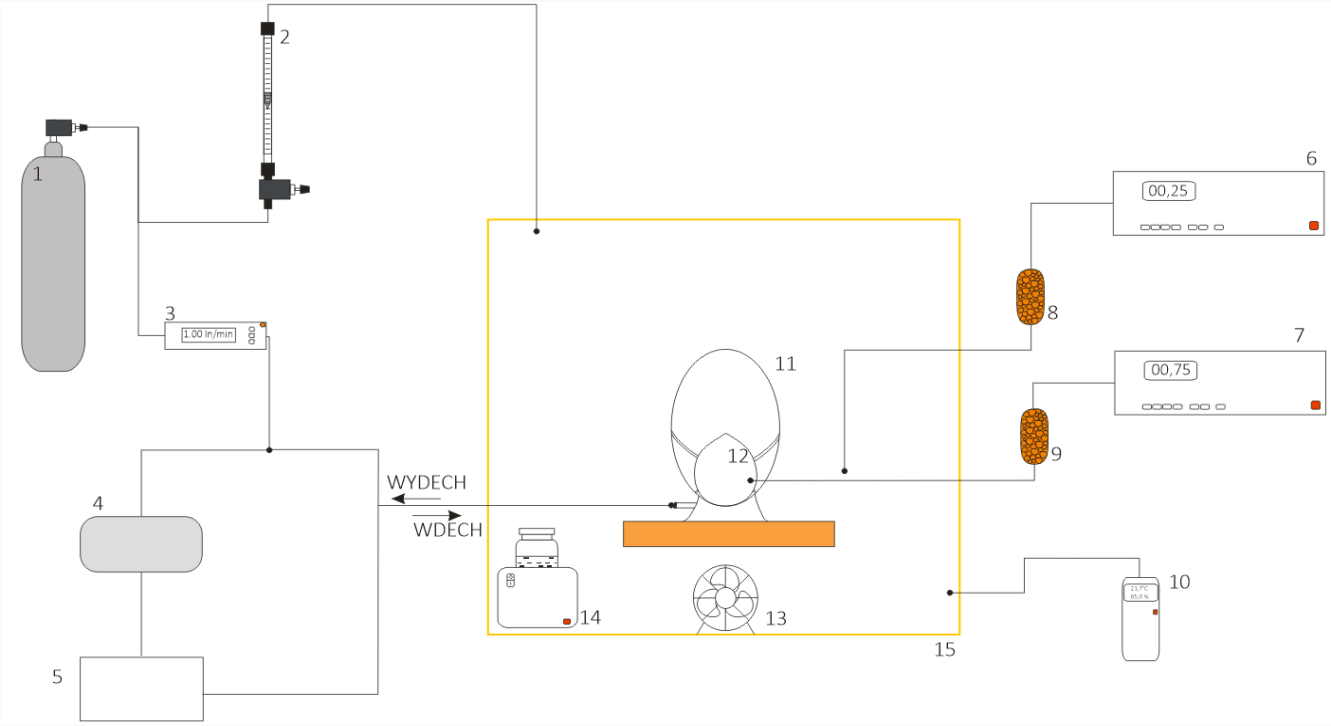
2 **Uwaga przy pracy lekkiej**
Podczas lekkiej aktywności (np. chodzenia, mówienia), pod półmaską może zbierać się więcej CO_2 niż przy cięższej pracy. Dzieje się tak ponieważ przy małym wysiłku oddychamy płycej i wolniej, dlatego też wydychane powietrze pozostaje pod półmaską na dłużej.

3 **Zwracaj uwagę na swoje samopoczucie**
W razie zawrotów głowy, duszności lub innych dolegliwości - opuść strefę zanieczyszczoną, zdejmij i wymień półmaskę.

Gotowe materiały stanowią zwięzłą formę prezentacji najważniejszych wyników badań i zaleceń dotyczących stosowania filtrujących półmasek ochronnych.

METODYKA
BADAŃ

Badania zawartości dwutlenku węgla (CO_2) w powietrzu wdychanym przez użytkowników filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczo-pomiarowym. Celem było odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy, w których stężenie CO_2 w otoczeniu, temperatura i wilgotność mogą się zmieniać, co nie jest uwzględniane w dotychczas obowiązujących normach, takich jak EN 13274-6:2001. Stanowisko badawcze obejmowało m.in. komorę pomiarową, sztuczne płuca symulujące oddychanie, model głowy z założoną półmaską, analizatory gazowe do pomiaru CO_2, a także układ podający CO_2 do komory. Sztuczne płuca pracowały w trybie 35 l/min i generowały powietrze wydychane o stężeniu CO_2 na poziomie ok. 4%, co odpowiada fizjologicznemu poziomowi tego gazu u człowieka. Jednocześnie do komory doprowadzano CO_2 w stałym przepływie, by uzyskać otaczające stężenie do 0,5%. Pomiar zawartości CO_2 w powietrzu wdychanym (pod półmaską) oraz w otoczeniu komory prowadzono przez 30 minut, wykonując odczyty co 2 minuty. Przed badaniem przeprowadzano kalibrację analizatorów oraz wstępne przygotowanie warunków klimatycznych – badania wykonano w dwóch wariantach: przy umiarkowanej i wysokiej wilgotności powietrza. Opracowana metodyka pozwala na dokładną ocenę skuteczności ochrony dróg oddechowych w zmiennych warunkach środowiskowych, uwzględniając wpływ stężenia CO_2 w otoczeniu na jakość powietrza wdychanego przez użytkownika sprzętu ochronnego.



Stanowisko przeznaczone do wyznaczania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu wdychanym w odniesieniu do filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego: 1 – butla z gazem CO2, 2 – rotametr, 3 – masowy kontroler przepływu gazu, 4 – pochłaniacz CO2, 5 – sztuczne płuca, 6 i 7 – cyfrowe analizatory CO2, 8 i 9 – pochłaniacze wilgoci, 10 – termohigrometr, 11 – model głowy, 12 – badana półmaska filtrująca, 13 – wentylator, 14 – łaźnia wodna, 15 – komora badawcza.

PLANUJ CZAS OCHRONY

Kluczowe obserwacje badań
Badania potwierdziły, że w środowisku pracy ze stężeniem CO_2 na poziomie 0,5%, pod półmaską filtrującą może wystąpić stężenie przekraczające 1,4% obj. w zależności od typu półmaski, szczelności i intensywności oddychania.

1

- gromadzenie się CO_2: wzrost zawartości CO_2 pod częścią twarzową półmaski jest stały i proporcjonalny do wzrostu stężenia CO_2 w otoczeniu, niezależnie od konstrukcji sprzętu. Z badań wynika, że pod półmaską gromadzi się przeciętnie dodatkowe 0,7% CO_2. Oznacza to, że do obliczeń należy dodać tę wartość do stężenia CO_2 w otoczeniu.

2

- intensywność wysiłku fizycznego: w miarę wzrostu intensywności wysiłku (od lekkiej do ciężkiej pracy) nastąpił wyraźny spadek stężenia CO_2 w powietrzu wdychanym. Najwyższe wartości stężenia CO_2 uzyskano podczas pracy lekkiej. Wynika to z faktu, że bardziej intensywny wysiłek fizyczny przyczynia się do zwiększenia wentylacji oddechowej, co ułatwia szybszą eliminację CO_2. Przy niższym przepływie powietrza (praca lekka), wymiana gazowa jest mniej efektywna, a CO_2 kumuluje się blisko twarzy.

3

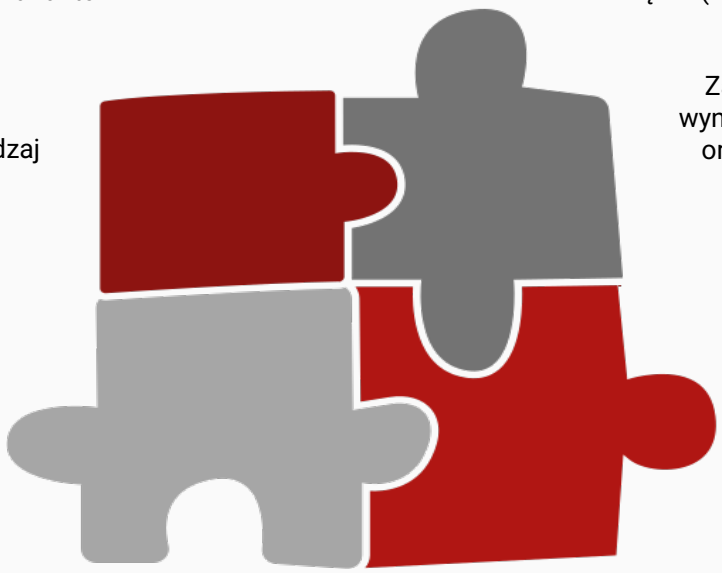
- dopasowanie i konstrukcja półmaski: zdecydowany wpływ na wyniki badań miało dopasowanie i kształt półmaski do modelu głowy. W sytuacji, gdy sprzęt był nieprawidłowo dopasowany (szczególnie na obrzeżach), powstawały nieszczelności, a zawartość stężenia CO_2 była wyższa. Dobre dopasowanie zapewnia minimalizację „przestrzeni martwej”, zmniejsza opór oddechowy i poprawia jakość wymiany gazowej. Półmaska o większej "przestrzeni martwej" może wykazywać wyraźnie wyższe wartości stężenia CO_2 w powietrzu wdychanym.

SUBIEKTYWNE ODCZUCIA

Przeprowadzone zostały **badania zmęczeniowe** z udziałem 10 osób (5 kobiet i 5 mężczyzn) w wieku 25-60 lat, **symulujące praktyczne użytkowanie półmasek** w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Celem było poznanie zawartości CO_2 pod półmaską podczas wysiłku oraz ocena wpływu półmasek na komfort, ergonomię, odczucia psychologiczne i parametry fizjologiczne.

Zmęczenie: stwierdzono istotny statystycznie wzrost wyników zmęczenia fizycznego i poznawczego w każdym z wariantów eksperymentu. Subiektywne odczucie zmęczenia było częste. Czynniki najbardziej wpływające na odczucie zmęczenia to najczęściej rodzaj aktywności i czas noszenia półmaski ochronnej.

Parametry fizjologiczne: stosowanie półmasek ochronnych wywołało wzrost tętna (zwłaszcza u kobiet noszących półmaskę gumową) i częstotliwości oddechowej. Zaobserwowane zmiany mogą wynikać z indywidualnych reakcji organizmu na wysiłek fizyczny.



Stężenie CO_2 pod półmaską: zmiany w stężeniu CO_2 pod półmaską są zauważalne w zależności od poziomu intensywności wysiłku. Wzrost stężenia dwutlenku węgla pod półmaską filtrującą następuje podczas wykonywania lżejszych czynności (marsz, ruchy głową, mowa). Tendencja ta jest związana z faktem, że badania odbywały się w przestrzeni zamkniętej (komora badawcza) bez dopływu świeżego powietrza. W przypadku półmaski gumowej skompletowanej z filtrami, najwyższe średnie stężenie CO_2 (0,80% obj.) zaobserwowano u mężczyzn, co może sugerować spokojniejszy, dłuższy oddech charakterystyczny dla pracy lekkiej. W przypadku zwiększonego wysiłku efektywność wymiany gazowej wzrasta, a wyższy przepływ powietrza ułatwia usuwanie CO_2.

Komfort i dopasowanie: uczestnicy często zwracali uwagę na trudności z wykonaniem pełnego oddechu, uczucie duszności i szybki oddech podczas intensywnego wysiłku z półmaską filtrującą. W przypadku półmaski gumowej skompletowanej z filtrami, większość wskazała na brak dolegliwości związanych z utrudnieniem oddychania. Subiektywne oceny wskazywały, że półmaski dobrze dopasowują się do twarzy użytkownika, co potwierdziły wyniki testu dopasowania, który wszyscy uczestnicy przeszli. Dopasowanie przeprowadzone w sposób indywidualny jest istotnym aspektem, umożliwiając precyzyjne dopasowanie do kształtu twarzy.

CZAS OCHRONNEGO

DZIAŁANIA

Oszacowanie czasu bezpiecznego stosowania filtrującego sprzętu ochrony układu oddechowego w zależności od stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wdychanym i warunków pracy. Ma charakter orientacyjny i stanowi jedynie szacunkową wartość. Rzeczywisty czas bezpiecznego stosowania półmaski może różnić się w zależności od warunków pracy, stężenia zanieczyszczeń, intensywności oddychania oraz innych czynników środowiskowych. Wynik kalkulacji nie powinien być traktowany jako gwarantowany czas ochrony, lecz jako wskazówka pomocnicza przy planowaniu wymiany filtra lub półmaski.
Oto kilka praktycznych wskazówek:

8 godzinny czas pracy – praca w bezpiecznych warunkach

- utrzymuj standardową wentylację i okresowo kontroluj poziom CO_2
- stosuj zasady ogólnego bezpieczeństwa i higieny pracy
- można prowadzić ciągłą pracę bez ryzyka dla zdrowia

Kilkugodzinny czas pracy – ok. 2-6 godzin

- wprowadź regularne przerwy na przewietrzenie miejsca pracy (np. 10-15 minut co 2-3 godziny)
- zwiększ wydajność systemu wentylacyjnego
- przeprowadzaj okresowe pomiary kontrolne (raz na zmianę), zamontuj czujnik z alarmem ostrzegawczym

Ograniczony czas pracy – 1-2 godziny

- monitoruj stężenie CO_2 i zapewnij prawidłową wentylację
- nie przekraczaj dopuszczalnego czasu ekspozycji
- przewietrz po zakończeniu pracy pomieszczenie przed ponownym wejściem

Krótki czas pracy – 30-60 minut

- pracuj wyłącznie w dobrze wentylowanym środowisku
- zapewnij ciągły pomiar CO_2 w czasie rzeczywistym
- organizuj pracę w parach lub pod nadzorem.
- wietrz pomieszczenie – jeśli stężenie nie spada ewakuuj pracowników

Bardzo krótki czas pracy – poniżej 30 minut

- pracuj wyłącznie w sprzęcie izolującym (np. aparat powietrzny butlowy)
- zapewnij nadzór nad pracownikami przebywającymi w strefie zagrożonej
- opuść strefę zagrożenia po zakończeniu prac i przeprowadź pomiar kontrolny
- sporządź pełną dokumentację ekspozycji i zdarzeń

Brak bezpiecznego czasu pracy – praca zabroniona

- miejsce pracy uznane jest za strefę niebezpieczną
- wstęp tylko dla ekip ratowniczych ze sprzętem izolującym
- ewakuuj wszystkich pracowników
- przeprowadź analizę przyczyn i wdróż środki zapobiegawcze

ZALEŻNOŚĆ STĘŻENIA CO_2

POD CZĘŚCIĄ TWARZOWĄ OD OTOCZENIA

- Półmaska nie usuwa CO_2, a wręcz zwiększa jego poziom we wdychanym powietrzu.
- Dodatkowe 0,7% CO_2 z wnętrza półmaski może istotnie skrócić dopuszczalny czas pracy, szczególnie w warunkach słabej wentylacji.
- W miejscach, gdzie stężenie CO_2 w otoczeniu przekracza wartość 1,5–2%, półmaski nie zapewniają wystarczającego bezpieczeństwa.

W takich przypadkach należy stosować izolujący sprzęt ochrony układu oddechowego

NIE IGNORUJ RYZYKA –

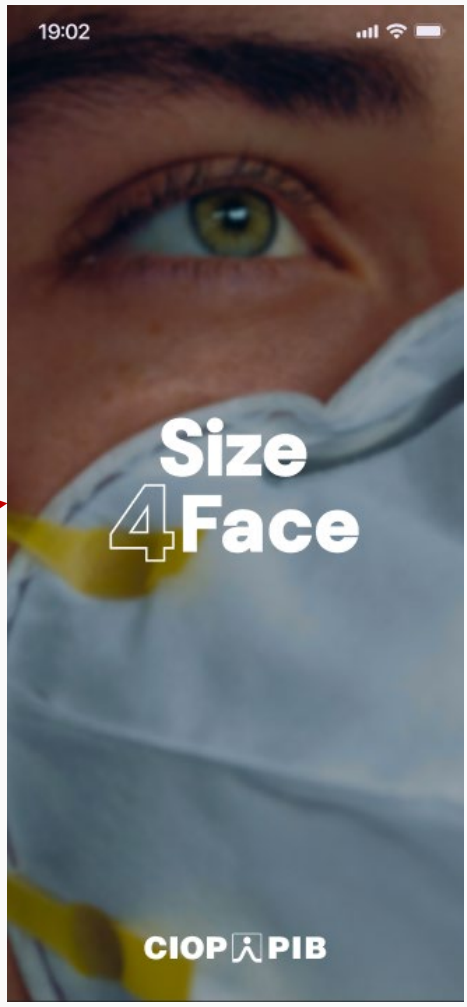
CO_2 NIE OSTRZEGA

Dobór sprzętu, stężenia CO_2, zalecenia dla praktyków i nie tylko – **WSZYSTKO W JEDNYM MIEJSCU !**

Aplikacja **Size4Face** to nowoczesne narzędzie wspomagające dobór sprzętu ochrony układu oddechowego do indywidualnych cech użytkownika – takich jak kształt i rozmiar twarzy.

W aplikacji znajdziesz proste wskazówki, jak długo można bezpiecznie używać półmaski w zależności od stężenia CO_2 i warunków pracy – a także bazę modeli półmasek oraz informacje o ich dezynfekcji, konserwacji.

WEJDŹ. SPRAWDŹ. ODDYCHAJ BEZPIECZNIE.



NIE RYZYKUJ – wejdź na stronę i sprawdź, jak się chronić skutecznie!

https://www.ciop.pl/nos-polmaske/materialy-tematyczne

ODDYCHAJ BEZPIECZNIE

MY ZADBAMY O RESZTĘ

Czy wiesz, jak jakość powietrza wpływa na Twoje zdrowie, koncentrację i efektywność? W świecie, w którym coraz więcej uwagi poświęcamy zdrowiu, środowisku i ergonomii pracy, nie możemy ignorować jednego z najważniejszych czynników – czystości powietrza, którym oddychamy, szczególnie pod półmaską ochronną.

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB) zaprasza do współpracy wszystkich zainteresowanych tematyką bezpiecznego użytkowania sprzętu ochrony układu oddechowego.

Wspólnie możemy:

- wdrażać nowoczesne rozwiązania w zakresie ochrony układu oddechowego,
- opracowywać aplikacje i narzędzia wspierające użytkowników sprzętu filtrującego,
- prowadzić dalsze badania, analizy i ekspertyzy,
- dzielić się wiedzą podczas konferencji, warsztatów i publikacji.

Szukasz partnera do projektu?
Jesteś producentem, pracodawcą, naukowcem, edukatorem, a może użytkownikiem sprzętu ochronnego?

Skontaktuj się z nami
Chętnie podejmiemy współpracę badawczo-rozwojową, edukacyjną lub wdrożeniową.

Kontakt:
Zespół badawczy
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
no1@ciop.lodz.pl | +48 42 648 02 25
www.ciop.pl