

Judyta Mews¹, Katarzyna Królikowska¹, Jacek Siewiera²,
Agata Wawrzyniak¹, Bolesław Kalicki¹

Otrzymano: 14.01.2019
Zaakceptowano: 07.02.2019
Opublikowano: 31.07.2019

Ocena skuteczności tlenoterapii hiperbarycznej u dzieci po zatruciu tlenkiem węgla

Assessment of hyperbaric oxygen efficacy in children with carbon monoxide poisoning

¹ Klinika Pediatrii, Nefrologii i Alergologii Dziecięcej, Wojskowy Instytut Medyczny, Warszawa, Polska

² Oddział Kliniczny Medycyny Hiperbarycznej, Wojskowy Instytut Medyczny, Warszawa, Polska

Adres do korespondencji: Judyta Mews, Klinika Pediatrii, Nefrologii i Alergologii Dziecięcej, CSK MON WIM, ul. Szaserów 128, 01-141 Warszawa, tel.: +48 261 817 217, faks: +48 261 816 763, e-mail: jmews@wim.mil.pl

Streszczenie

Zatrucie tlenkiem węgla (CO) stanowi istotny problem kliniczny. Objawy zatrucia są niespecyficzne, zwłaszcza w populacji dziecięcej. Obecnie uznaje się tym większą zasadność zastosowania tlenoterapii hiperbarycznej (*hyperbaric oxygen*, HBO), im cięższy jest stan kliniczny pacjenta i im krótszy czas upłynął od momentu przerwania ekspozycji na CO. **Cel pracy:** Celem niniejszej pracy była ocena skuteczności leczenia tlenem hiperbarycznym dzieci z objawami zatrucia tlenkiem węgla. **Materiał i metody:** Badanie zostało przeprowadzone jako analiza retrospektywna dokumentacji medycznej dzieci hospitalizowanych z powodu zatrucia tlenkiem węgla w Klinice Pediatrii, Nefrologii i Alergologii Dziecięcej Wojskowego Instytutu Medycznego w okresie od stycznia do grudnia 2018 roku. Analizie poddano informacje dotyczące wyników badań laboratoryjnych oraz okoliczności zatrucia CO, sposobu zgłoszenia się do Kliniki, liczby sprężeń w komorze hiperbarycznej niezbędnych do całkowitego ustąpienia objawów, występowania powikłań oraz okresu pobytu w Klinice po zakończonym leczeniu. **Wyniki:** Przeprowadzona analiza wyników nie wykazała związku między stężeniem karboksyhemoglobiny a prezentowanymi objawami zatrucia oraz stopniem ciężkości zatrucia CO. Wykazano natomiast istotną statystycznie dodatnią korelację pomiędzy stężeniem karboksyhemoglobiny a stężeniem HCO_3^- oraz ujemną pomiędzy stężeniem karboksyhemoglobiny a pH krwi włosniczkowej. Nie odnotowano istotnych statystycznie różnic między grupą dzieci z łagodnym zatruciem i z ciężkim zatruciem w zakresie wartości stężenia potasu, pH krwi włosniczkowej, stężeń HCO_3^- oraz glukozy. Jednocześnie wykazano, że terapia hiperbaryczna cechuje się wysoką skutecznością i dużym bezpieczeństwem. **Podsumowanie:** Niezależnie od przyczyn zatrucia CO w populacji dziecięcej terapia hiperbaryczna jest metodą wysoce skuteczną i bezpieczną. Jeden zabieg w komorze hiperbarycznej pozwala uzyskać całkowite ustąpienie objawów i zapobiega późnym następstwom zatrucia czy efektom ubocznym działania CO.

Słowa kluczowe: hiperbaria, zatrucie tlenkiem węgla (CO), dzieci, karboksyhemoglobina, komora hiperbaryczna

Abstract

Carbon monoxide (CO) poisoning is an important clinical problem. The symptoms of poisoning are non-specific, particularly in the paediatric population. Currently, the use of hyperbaric oxygen (HBO) is considered to be more justified with increasing severity of the patient's clinical status and with shorter time elapsed from CO exposure. **Aim of the study:** The aim of this study was to assess the efficacy of hyperbaric oxygen therapy in children with symptoms of carbon monoxide poisoning. **Material and methods:** The study was a retrospective analysis of medical records of children hospitalised for carbon monoxide poisoning at the Department of Paediatrics, Paediatric Nephrology and Allergology of the Military Institute of Medicine, Poland, between January and December 2018. The following data were analysed: laboratory test results, CO poisoning circumstances, the manner of reporting to the Department, the number of hyperbaric chamber sessions needed to relieve the symptoms completely, the occurrence of complications and the duration of stay at the Department after treatment completion. **Results:** The analysis of the results did not demonstrate any relationship between carboxyhaemoglobin level and poisoning manifestations and CO poisoning severity. However, a statistically significant positive correlation was demonstrated between carboxyhaemoglobin level and HCO_3^- level and a statistically significant negative correlation was found between carboxyhaemoglobin level and capillary pH. No statistically significant differences were found between children with mild poisoning and those with severe poisoning in terms of potassium level, capillary pH, and HCO_3^- and glucose levels. At the same time, it was demonstrated that hyperbaric therapy is a highly effective and safe method. **Conclusion:** Regardless of the causes of CO poisoning in the paediatric population, hyperbaric therapy is a highly effective and safe method. One session in a hyperbaric chamber is sufficient to relieve the symptoms completely and prevent delayed sequelae of poisoning and CO side effects.

Keywords: hyperbaric therapy, carbon monoxide poisoning (CO), children, carboxyhaemoglobin, hyperbaric chamber

WSTĘP

Tlenek węgla (CO) jest najczęstszą przyczyną zatruciwizwicznych na całym świecie⁽¹⁾. Zgodnie z danymi Państwowej Straży Pożarnej w sezonie grzewczym 2017/2018 w Polsce doszło do 4343 zdarzeń spowodowanych szkodliwym działaniem CO, w których poszkodowanych zostało 2659 osób i doszło do 71 zgonów⁽²⁾. Zatrucia CO występują głównie jesienią oraz zimą. Związane są najczęściej z niesprawną instalacją grzewczą i systemem wentylacji, występują też często u osób ewakuowanych z budynków objętych pożarem.

Tlenek węgla jest gazem bezbarwnym, bezwonnym oraz bezsmakowym. Powstaje wskutek niecałkowitego spalania produktów zawierających węglowodory. Jest produkowany przez organizm człowieka – stanowi produkt uboczny degradacji hemoglobiny. Fizjologicznie występuje u osób niepalących w stężeniu 1–3%, natomiast u palących wartość ta wzrasta nawet do 10–15%⁽³⁾. Tlenek węgla wnika do organizmu poprzez drogi oddechowe, a w mniejszej ilości przez skórę oraz błony śluzowe, choć droga przezskórna nie ma istotnego znaczenia w przebiegu intoksykacji. W większości jest wydalany z organizmu przez układ oddechowy jako CO, a jedynie w 1% jest utleniany do dwutlenku węgla (CO₂). Ilość CO absorbowana przez organizm człowieka zależy od wentylacji minutowej płuc, stopnia dyfuzji pęcherzykowo-włośniczkowej, czasu trwania ekspozycji oraz stężenia CO w środowisku. Gaz ten cechuje się około 250–300-krotnie wyższym powinowactwem do hemoglobiny niż tlen i tworzy z nią kompleks nazywany karboksyhemoglobiną (COHb). Szybkość wiązania się CO z hemoglobiną w początkowym okresie ekspozycji jest duża i narasta aż do momentu osiągnięcia równowagi między stężeniem COHb we krwi a stężeniem CO w skażonym powietrzu^(1,4).

Kliniczna manifestacja zatrucia CO może być niespecyficzna^(4–6). Najbardziej narażone na szkodliwe działanie tego gazu są komórki o względnie największej aktywności metabolicznej, a co za tym idzie – znacznej perfuzji. Dotyczy to więc najczęściej kardiomiocytów oraz komórek ośrodkowego układu nerwowego. Pacjenci skarżą się na ból oraz zawroty głowy, nudności, labilność emocjonalną, splątanie, a w cięższych przypadkach dochodzi do utraty przytomności. U niemowląt często występujące wymioty mogą być mylone z infekcją przewodu pokarmowego⁽³⁾. W wyniku działania CO może nastąpić uszkodzenie mięśni, w tym mięśnia sercowego. Mioglobina sercowa wiąże CO trzy razy silniej niż mioglobina mięśni szkieletowych, co uwidacznia się w elektrokardiogramie pod postacią obniżenia odcinka ST, migotania przedsionków lub komorowych zaburzeń rytmu. W wyniku uszkodzenia i rozpadu mięśni szkieletowych może dochodzić do mioglobinurii, a nawet ostrej niewydolności nerek na tle rhabdomyolizy. Znane są przypadki, w których miotonia występowała u osób

zatrutych CO zachowujących jeszcze przytomność, co niekiedy wtórnie utrudniało lub uniemożliwiało osobie zatrutej wydostanie się z pomieszczenia. Innymi opisanymi skutkami zatrucia CO mogą być przekrwienie narządów mięsaszowych, a także rozsiane wykrzepianie wewnątrznaczyniowe^(1,4,7).

W działaniach ratowniczych najważniejsze jest jak najszybsze opuszczenie pomieszczeń, w których doszło do ekspozycji. U poszkodowanych należy stosować tlenoterapię 100-procentowym tlenem przy użyciu maseczki z rezerwuarem tlenowym lub worka samorozprężalnego w ramach wentylacji wspomagananej. Wentylacja chorego 100-procentowym tlenem zwiększa gradient ciśnienia parcjalnych tlenu w powietrzu pęcherzykowym oraz krwi kapilarnej płucnej, co pozwala skrócić średni czas półtrwania COHb z około 5–6 godzin przy oddychaniu tlenem atmosferycznym do 30–90 minut. Współcześnie zalecanym standardem jest zastosowanie oksygenacji hiperbarycznej^(4,6,8). Znajduje ono tym większe uzasadnienie, im cięższy jest stan kliniczny pacjenta i im krótszy czas upłynął od momentu przerwania ekspozycji na CO.

W przypadku pacjentów dorosłych za próg wskazań do rozpoczęcia leczenia hiperbarycznym tlenem z powodu zatrucia CO uznaje się stężenie COHb powyżej 16 lub występowanie objawów klinicznych. W przypadku populacji pediatrycznej, podobnie jak u pacjentów geriatrycznych, kryteria zależą od obserwowanych objawów klinicznych, natomiast stężenie COHb ma znaczenie wyłącznie rokownicze^(4,6,9).

Sama idea wykorzystania metody ciśnieniowej pochodzi z XVII wieku. W 1662 roku Nathaniel Henshaw jako pierwszy skonstruował komorę ciśnieniową, która znalazła zastosowanie w terapii uzdrowiskowej zamiast wykorzystania w charakterze kesonu lub dzwonu nurkowego. W latach 30. XX wieku Edgar End jako pierwszy podjął próby leczenia zatrucia CO w komorze hiperbarycznej, jednak metodę tę udokumentowali dopiero w 1960 roku Smith i Sharp^(4,10). Od tego czasu konstrukcja komory hiperbarycznej została ulepszona, a jej zastosowanie wkracza na coraz nowsze pola medycyny.

CEL PRACY

Celem niniejszej pracy była ocena skuteczności leczenia tlenem hiperbarycznym dzieci z objawami zatrucia CO.

MATERIAŁ I METODA

Badanie zostało przeprowadzone jako analiza retrospektywna dokumentacji medycznej dzieci hospitalizowanych w Klinice Pediatrii, Nefrologii i Alergologii Dziecięcej Wojewódzkiego Instytutu Medycznego w okresie od stycznia do grudnia 2018 roku z powodu zatrucia CO.

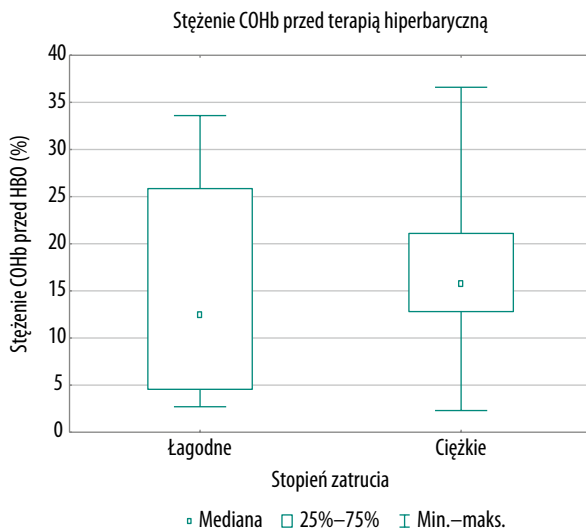
Do grupy badanej zakwalifikowano 17 dzieci, w tym 9 dziewczynek (53%) i 8 chłopców (47%) zatrutych CO. Średnia wieku badanej grupy dzieci wynosiła 9 ± 5 lat.

Stopień zatrucia	Suma punktów
Lekkie	0–3
Średnio ciężkie	4–6
Ciężkie	>6

Tab. 1. Podział kliniczny zatrucia CO

Objawy	Liczba punktów
Bez dolegliwości	0
Ból głowy/zawroty głowy	1
Bóle mięśniowe	1
Nudności/wymioty	1
Ból w klatce piersiowej	2
Dezorientacja/splątanie	2
Zasłabnięcie	4
Splątanie/utrata przytomności	7

Tab. 2. Zestawienie poszczególnych objawów z liczbą punktów



Ryc. 1. Stężenie COHb w chwili przyjęcia do Kliniki u dzieci z objawami zatrucia w stopniu lekkim oraz w stopniu ciężkim

Badaną grupę dzieci z objawami zatrucia CO w zależności od ciężkości obrazu klinicznego podzielono na trzy kategorie (tab. 1):

- zatrucie lekkie;
- zatrucie średnio ciężkie;
- zatrucie ciężkie.

Przynależność do danej kategorii była uwarunkowana sumą liczby punktów przypisanych poszczególnym objawom (tab. 2).

Szczegółowej analizie poddano informacje dotyczące wyników badań laboratoryjnych (stężenia potasu, glukozy w surowicy krwi, stężenia COHb, gazometrii krwi włośniczkowej – ocena pH i stężenia HCO_3^-) oraz okoliczności, w których doszło do zatrucia CO, i sposobu zgłoszenia się do Kliniki z powodu objawów intoksykacji. Uwzględniono również liczbę zabiegów niezbędnych do całkowitego ustąpienia objawów, występowanie ewentualnych powikłań oraz okres pobytu w Klinice po zakończonym leczeniu.

W trakcie standardowego protokołu leczniczego w komorze hiperbarycznej wykorzystuje się czysty tlen pod ciśnieniem 2,5 atmosfery bezwzględnej (ATA). Tlen podawany jest przez indywidualną maskę oddechową, o ile chory jest przytomny, lub przy zastosowaniu respiratora hiperbarycznego dostosowanego do zwiększonej gęstości mieszaniny oddechowej u pacjentów nieprzytomnych^(4,6,7,9,11).

Uzyskane wyniki opracowano statystycznie przy użyciu oprogramowania StatSoft, Inc. (2014) – STATISTICA (data analysis software system), wersja 12. Przed rozpoczęciem analiz dane zweryfikowano wstępnie za pomocą wykresu normalności rozkładu, a ostatecznie przy wykorzystaniu testu normalności Kołmogorowa–Smirnowa i Lillieforsa. Mając na uwadze brak zgodności z rozkładem normalnym dla wybranych zmiennych, do oceny statystycznej w tych przypadkach wykorzystywano testy nieparametryczne, niewymagające normalności rozkładu. Do oceny zmiennych o rozkładzie normalnym zastosowano test *t*-Studenta. W analizie korelacji obliczano dla zmiennych nieposiadających rozkładu normalnego współczynnik rang Spearmana, a dla zmiennych o rozkładzie normalnym współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Za istotne statystycznie uznawano wartości, dla których $p < 0,05$.

WYNIKI

W Klinice Pediatrii, Nefrologii i Alergologii Dziecięcej Wojskowego Instytutu Medycznego leczono 17 dzieci, których dokumentacja medyczna została poddana analizie, w tym 9 dziewczynek (53%) i 8 chłopców (47%) zatrutych CO. Średnia wieku badanej grupy dzieci wynosiła 9 ± 5 lat.

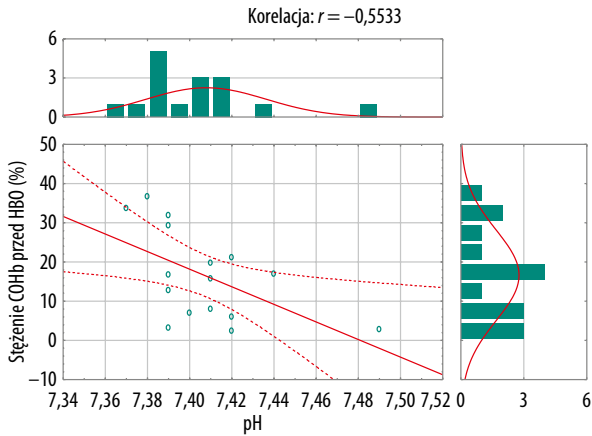
Parametry	Zatrucie łagodne, mediana (q_{25} – q_{75})	Zatrucie ciężkie, mediana (q_{25} – q_{75})	<i>p</i>
K^+ [mmol/l]	4,2 (4,1–4,4)	4,1 (4,0–4,3)	ns.
pH	7,40 (7,4–7,4)	7,41 (7,39–7,42)	ns.
HCO_3^- [mmol/l]	25,1 (22,0–26,6)	25,3 (23,4–25,7)	ns.
Glukoza [mg/dl]	92 (80–106)	102 (93–113)	ns.

ns. – nieistotne statystycznie.

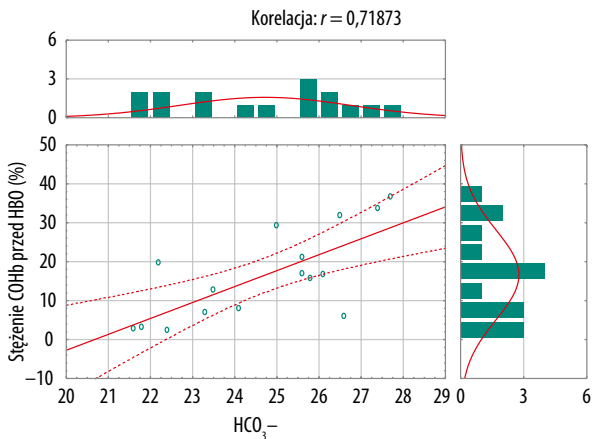
Tab. 3. Analizowane parametry biochemiczne u dzieci z objawami łagodnego i ciężkiego zatrucia

Parametry	Współczynnik korelacji	<i>p</i>
Długość hospitalizacji a wiek	0,05	ns.
Długość hospitalizacji a COHb	–0,29	ns.
Długość hospitalizacji a pH	0,0	ns.
Długość hospitalizacji a HCO_3^-	–0,33	ns.
Długość hospitalizacji a glukoza	0,48	ns.
Długość hospitalizacji a K^+	–0,33	ns.

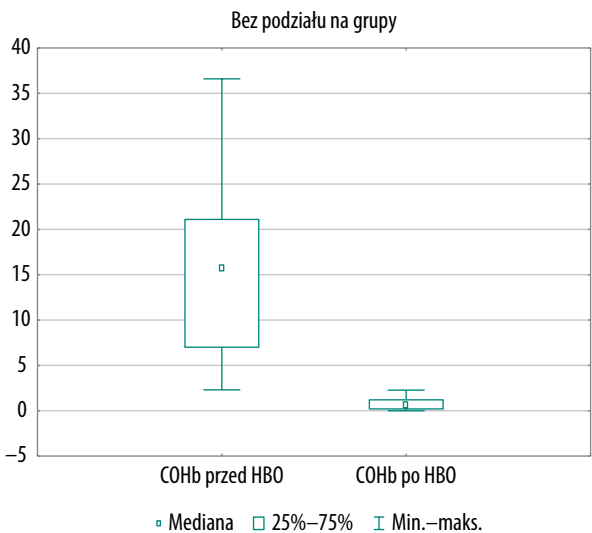
Tab. 4. Wskaźniki korelacji między długością hospitalizacji a wiekiem dziecka, wartością COHb oraz wskaźnikami biochemicznymi



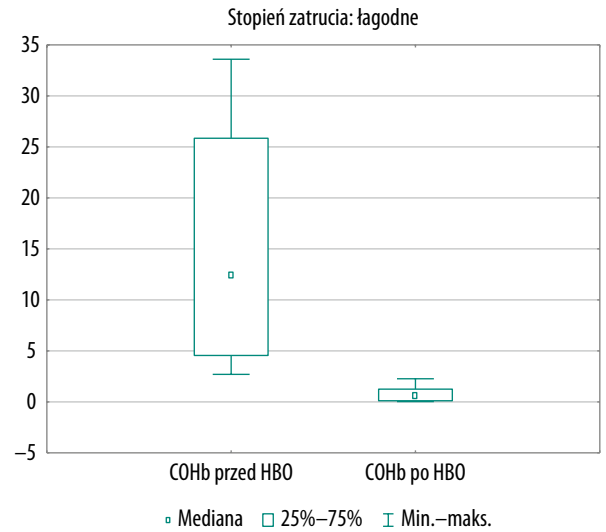
Ryc. 2. Korelacja pomiędzy stężeniem COHb a pH krwi włósczkowej



Ryc. 3. Korelacja pomiędzy stężeniem COHb a HCO_3^-



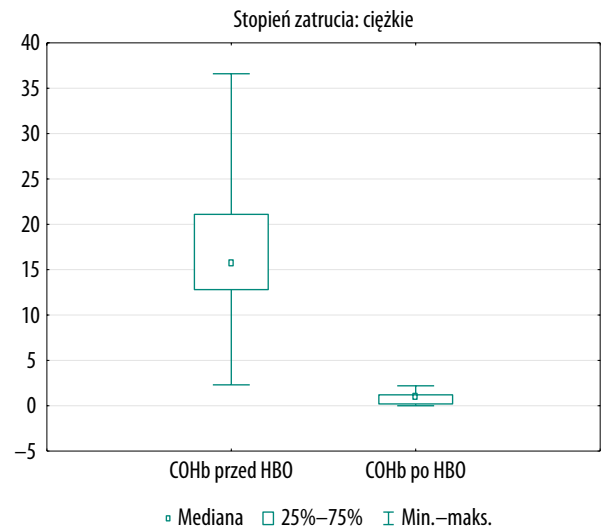
Ryc. 4. Wartości percentylowe COHb przed terapią hiperbaryczną i po niej w całej analizowanej grupie



Ryc. 5. Wartości percentylowe COHb przed terapią hiperbaryczną i po niej w grupie dzieci z objawami łagodnego zatrucia

Główną przyczyną zatrucia była awaria piecyka gazowego w łazience (14 dzieci). Innymi przyczynami były awaria pieca w kotłowni (2 dzieci) i pożar w gospodarstwie domowym (1 dziecko). Wszystkie dzieci zostały przewiezione do Kliniki transportem medycznym: 8 z objawami zatrucia w stopniu lekkim, 1 z objawami w stopniu średnio ciężkim, a 8 – w stopniu ciężkim.

Mediana wartości procentowej COHb w chwili zgłoszenia się do Kliniki wynosiła 16,4% ($q_{25} - 7\%$, $q_{75} - 21\%$). Nie wykazano istotnych statystycznie różnic w zakresie wartości COHb między grupą dzieci z objawami łagodnego zatrucia a grupą dzieci z objawami ciężkiego zatrucia (odpowiednio 12,4%, $q_{25} - 4,5$, $q_{75} - 25,8$ vs 15,7%, $q_{25} - 12,8$, $q_{75} - 21$) (ryc. 1). Nie wykazano też istotnych statystycznie różnic pomiędzy grupą dzieci z łagodnym zatruciem a ciężkim zatruciem



Ryc. 6. Wartości percentylowe COHb przed terapią hiperbaryczną i po niej w grupie dzieci z objawami ciężkiego zatrucia

w zakresie wartości stężenia potasu, pH krwi włosniczkowej, stężeń HCO_3^- oraz glukozy (tab. 3).

Wykazano natomiast istotną statystycznie dodatnią korelację pomiędzy stężeniem COHb a stężeniem HCO_3^- oraz ujemną pomiędzy stężeniem COHb a pH krwi włosniczkowej (ryc. 2, 3).

U wszystkich dzieci, niezależnie od wyjściowego stężenia COHb i ciężkości zatrucia, wystarczające było jedno sprężenie w komorze hiperbarycznej w celu normalizacji COHb (ryc. 4–6).

Średni czas pobytu w Klinice wynosił 2 ± 3 dni. Dłuższe hospitalizacji (12 dni) wymagało jedno dziecko, u którego przebieg zatrucia CO był powikłany zapaleniem płuc. Nie zaobserwowano, aby czas hospitalizacji korelował z wiekiem dziecka, wyjściowym stężeniem COHb czy analizowanymi parametrami biochemicznymi (tab. 4).

U żadnego dziecka poddanego procesowi sprężania w komorze hiperbarycznej nie zaobserwowano działań niepożądanych.

OMÓWIENIE

Zatrucie CO w populacji dziecięcej stanowi istotny problem kliniczny^(12,13). Do zatrucia CO najczęściej dochodzi wskutek awarii wadliwej instalacji systemów grzewczych, głównie piecyków gazowych, w okresie jesienno-zimowym. Do innych – rzadszych – przyczyn należą pożary (lasów, domów itp.) lub próby samobójcze^(14,15). Etiologia, patofizjologia oraz możliwości diagnostyczno-terapeutyczne związane z intoksykacją CO są problemem, który od lat nurtuje środowiska naukowe.

Przy podejrzeniu zatrucia CO istotne jest dokładne i szybkie zebranie wywiadu oraz zwrócenie uwagi, czy podobne objawy nie występują u innych osób przebywających w pobliżu chorego⁽¹⁾.

Najczulszym wskaźnikiem świadczącym o zatruciu CO jest podwyższone stężenie COHb we krwi włosniczkowej. Potwierdzenie rozpoznania zatrucia CO ustala się u osób dorosłych na podstawie podwyższonej wartości COHb w surowicy: u osób niepalących >3%, u palących >10%. Na podstawie wartości COHb nie można jednak oszacować stopnia ciężkości zatrucia. W przypadku dzieci potwierdzenie rozpoznania na podstawie stężenia COHb stwarza istotne trudności, dlatego też w pediatrii za podstawę ustalenia wskazań do leczenia przyjmuje się ocenę występujących objawów klinicznych. Ze względu na ich nasilenie można wyróżnić trzy kategorie zatrucia: łagodne (stężenie COHb 10–30%), średnio ciężkie (30–50%) oraz ciężkie (50–80%). Przy podejrzeniu zatrucia CO nie jest wskazane użycie pulsoksymetrii, gdyż urządzenie nie odróżnia oksyhemoglobiny od COHb, a prawidłowy wynik pomiaru saturacji nie wyklucza zatrucia CO. W diagnostyce laboratoryjnej istotną rolę odgrywa ponadto oznaczenie gazometrii krwi tętniczej, stężeń mleczanów jako wskaźnika nasilenia metabolizmu beztlenowego, troponiny oraz izoenzymu sercowego kinazy kreatynowej (CKMB)^(4,6,7,11). Otrzymane w niniejszej

pracy wyniki wskazują na brak korelacji pomiędzy stężeniem COHb a prezentowanymi objawami zatrucia i nie wiążą się ze stopniem ciężkości zatrucia CO.

Innym aspektem przeprowadzonej analizy jest stwierdzenie związku między stężeniem COHb a ryzykiem wystąpienia kwasicy metabolicznej – im wyższe stężenie COHb, tym większe ryzyko kwasicy metabolicznej.

Ostre zatrucie CO najczęściej prowadzi do zaburzeń neurologicznych i/lub dysfunkcji mięśnia sercowego^(12–14,16,17). Opóźnione następstwa zatrucia, głównie pod postacią zaburzeń neurologicznych, obserwuje się u około 10% pacjentów. Prowadzone w skali światowej obserwacje kliniczne i badania naukowe na zwierzętach skłoniły do ponownej analizy wpływu CO na organizm człowieka, ze szczególnym uwzględnieniem patofizjologii tego gazu w żywym organizmie^(16,18).

Objawy zatrucia CO są wynikiem oddziaływania dwóch mechanizmów jego toksyczności. W pierwszym dochodzi do ograniczenia strumienia tlenu ($s\text{O}_2$), rozumianego jako ograniczenie ilości tlenu dostarczanego w jednostce czasu do tkanek chorego i wyliczanego ze wzoru:

$$s\text{O}_2 = (\text{HR} \times \text{SV}) \times (\text{Hgb} \times \text{SaO}_2 \times 1,34) + \text{PaO}_2 \times 0,003$$

gdzie:

- HR (*heart rate*) – częstość pracy serca;
- SV (*stroke volume*) – objętość wyrzutowa serca;
- Hgb – stężenie hemoglobiny we krwi;
- SaO₂ – saturacja krwi tętniczej;
- PaO₂ – ciśnienie parcjale tlenu we krwi tętniczej.

Powstawanie kompleksów COHb zmniejsza wartość strumienia tlenu odwrotnie proporcjonalnie do stężenia COHb, poprzez redukcję stężenia wolnej hemoglobiny mogącej wiązać cząsteczki tlenu. Te mechanizmy zatrucia CO powodują zależne od stężenia COHb oraz czasu jego półtrwania zmiany hipoksemiczne lub anoksemiczne, głównie w obrębie ośrodkowego układu nerwowego. Mechanizm ten odpowiada najczęściej za spektrum ostrych objawów zatrucia CO, bezpośrednio zagrażających życiu chorego.

Drugi mechanizm toksyczności CO wiąże się z oddziaływaniem CO na kompleksy oksydazy cytochromowej. Zaburzenie funkcji mitochondriów skutkuje uwolnieniem reaktywnych form tlenu i wzrostem stresu oksydacyjnego na poziomie komórkowym. Uwolnienie tlenu azotu z płytek krwi oraz komórek śródbłonna nasila powstawanie wolnych rodników, co może skutkować uszkodzeniem komórek śródbłonna naczyń krwionośnych⁽⁷⁾. Ich uszkodzenie daje szczególnie nasilone objawy w obrębie mózgowia^(9,11,19). Końcowym efektem tego procesu jest peroksydacja lipidów w mózgu. Ponadto uszkodzenia oksydacyjne zostają nasilone przez reperfuzję przepływu mózgowego oraz adhezję leukocytów. Proces ten rozpoczyna się w momencie powrotu do zdrowia po zatruciu CO i skutkuje zaburzeniami poznawczymi, szczególnie w zakresie pamięci i nauki, oraz zaburzeniami motoryki, które mogą nie dawać objawów w pierwszych dniach po zatruciu⁽³⁾. Noworodki są bardziej

wrażliwe na działanie CO, ze względu na obecność w ich krwi hemoglobiny płodowej, która wiąże dwa razy więcej CO niż zwykła hemoglobina. Co więcej, dzieci ze względu na większą częstość oddechów w porównaniu z osobami dorosłymi, a także szybszy metabolizm są bardziej czułe na negatywne działanie CO niż dorośli^(1,4,6,12,14,20).

Na podstawie aktualnej wiedzy pacjenci z objawami ciężkiego zatrucia (tj. po utracie przytomności lub z dysfunkcją neurologiczną, niestabilnością krążenia bądź zaburzeniami hemodynamicznymi) powinni być w pierwszej kolejności kierowani do leczenia za pomocą tlenoterapii hiperbarycznej (*hyperbaric oxygen*, HBO)^(12,17). Leczenie w komorze hiperbarycznej powoduje redukcję ciśnienia wewnątrzczaszkowego poprzez ograniczenie narastania hipoksycznego obrzęku mózgu, zależną od prężności tlenu i ciśnienia panującego w komorze hiperbarycznej^(4,17,21).

Niezależnie od wyjściowego stanu klinicznego i stężenia COHb w surowicy krwi każdy pacjent po utracie przytomności powinien obligatoryjnie zostać poddany oksygenacji hiperbarycznej^(12,22). W związku z powyższymi rozważaniami w ocenie klinicznej dziecka z zatruciem CO nie należy się kierować wyłącznie stężeniem COHb, ponieważ na tej podstawie nie można przewidzieć stopnia ciężkości zatrucia i jego ewentualnych następstw. Brak jednoznacznej koincydencji między stężeniem COHb a objawami klinicznymi zobowiązuje do traktowania każdego przypadku zatrucia CO u dziecka jako stanu bezpośredniego zagrożenia życia.

Ze względu na podobieństwo niektórych objawów zatrucia CO do symptomów ostrych chorób wieku dziecięcego rozpoznanie zatrucia CO w populacji dziecięcej jest trudne. Istnieje też duże ryzyko przeoczenia intoksykacji CO w tej grupie wiekowej. Mimo że współczynnik umieralności z powodu zatrucia CO w grupie pacjentów pediatrycznych jest niższy niż wśród osób dorosłych, to w populacji dziecięcej znacznie częściej występują istotne późne następstwa neurologiczne (epilepsja, deficyty poznawcze itp.)⁽²³⁾. W związku z negatywnym wpływem zatrucia CO na organizm płodu, noworodka, niemowlęcia i dziecka zalecenia dotyczące HBO w populacji dziecięcej wymagają odrębnych wskazań^(13–15,22). Liczba publikacji poświęconych skuteczności leczenia HBO dzieci z zatruciem CO jest nadal niewielka, w porównaniu z bogatą literaturą na ten temat wśród populacji osób dorosłych^(13,15,23). Tlen hiperbaryczny już dawno został uwzględniony jako metoda leczenia zatrucia CO u osób dorosłych. W odniesieniu do pacjentów pediatrycznych brakuje dotąd jednoznacznych wytycznych w tej kwestii^(16,23). Na podstawie prowadzonych metaanaliz wykazano przewagę oksygenacji hiperbarycznej nad normobaryczną w zapobieganiu późnym następstwom neurologicznym (tj. bólowi głowy, zaburzeniom pamięci, trudnościom z koncentracją, zaburzeniom snu) u pacjentów zatrutych CO^(16,24,25). W badaniach wykazano także wysoką skuteczność leczenia tlenem hiperbarycznym u pacjentów z ciężkim zatruciem CO, uzyskując całkowite ustąpienie objawów już po jednej sesji HBO. W przeprowadzonej analizie również potwierdzono powyższą zależność. Dane te przekładają się na wymierne korzyści

ekonomiczne, wynikające z obniżenia kosztów dalszej opieki medycznej nad osobami z powikłaniami po ekspozycji na CO^(16,18,24,26,27). Badania potwierdzają nie tylko wysoką skuteczność stosowanej metody, ale także jej bezpieczeństwo zarówno wśród osób dorosłych, jak i u dzieci^(22,24).

Wyniki uzyskane w niniejszej pracy jednoznacznie wskazują na skuteczność zastosowanej metody leczenia sprężonym tlenem. Jednocześnie oprócz wysokiej skuteczności terapia ta cechuje się dużym bezpieczeństwem. U pacjentów poddanych tej metodzie leczenia, poza jednym wyjątkiem powikłanym zapaleniem płuc, nie obserwowano późnych następstw zatrucia CO.

PODSUMOWANIE

Niezależnie od przyczyn zatrucia CO w populacji dziecięcej terapia hiperbaryczna jest metodą wysoce skuteczną i bezpieczną. Wystarczy jedno sprężenie w komorze hiperbarycznej, aby uzyskać (niezależnie od stopnia ciężkości zatrucia) całkowite ustąpienie dolegliwości, a tym samym zapobiec wystąpieniu późnych następstw zatrucia bądź efektów ubocznych działania CO.

Analiza ciężkości i liczby przypadków dzieci z zatruciem CO hospitalizowanych w Klinice Pediatrii, Nefrologii i Alergologii Dziecięcej Wojskowego Instytutu Medycznego i leczonych na Oddziale Klinicznym Medycyny Hiperbarycznej wskazuje na potrzebę ścisłej współpracy pediatrów, specjalistów medycyny hiperbarycznej i intensywnej terapii, dającej możliwość ścisłego monitorowania oraz optymalnego leczenia pacjentów zatrutych CO.

Konflikt interesów

Autorzy nie zgłaszają żadnych finansowych ani osobistych powiązań z innymi osobami lub organizacjami, które mogłyby negatywnie wpłynąć na treść publikacji oraz rościć sobie prawo do tej publikacji.

Piśmiennictwo

1. Nieścior M, Jackowska T: Zatrucie tlenkiem węgla. Postępy Nauk Med 2013; 26: 519–522.
2. Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej: Czad i ogień – obudź czujność. Available from: https://www.straz.gov.pl/porady/bezpieczenstwo_pozarowe_w_domu [cited: 13 June 2019].
3. Mehta SR, Das S, Singh SK: Carbon monoxide poisoning. Med J Armed Forces India 2007; 63: 362–365.
4. Kindwall EP, Whelan HT (eds.): Hyperbaric Medicine Practice. 3rd ed., Best Publishing Company, Flagstaff, AZ 2008: 3–115, 301–316, 655–676.
5. Sowa M, Winnicki A, Wójcik K et al.: Zatrucie tlenkiem węgla – drogi narażenia, obraz kliniczny, metody leczenia. Journal of Education, Health and Sport 2015; 5: 345–354.
6. Rose JJ, Nouria M, Gauthier MC et al.: Clinical outcomes and mortality impact of hyperbaric oxygen therapy in patients with carbon monoxide poisoning. Crit Care Med 2018; 46: e649–e655.
7. Meyer G, André L, Kleindienst A et al.: Carbon monoxide increases inducible NOS expression that mediates CO-induced myocardial damage during ischemia-reperfusion. Am J Physiol Heart Circ Physiol 2015; 308: H759–H767.

8. Postępowanie w ostrych zatruciach tlenkiem węgla. Stanowisko Sekcji Toksykologii Klinicznej Polskiego Towarzystwa Lekarskiego. Gdańsk 2012.
9. Kudo K, Otsuka K, Yagi J et al.: Predictors for delayed encephalopathy following acute carbon monoxide poisoning. *BMC Emerg Med* 2014; 14: 3.
10. Sieroń A, Cieślak G (eds.): *Zarys medycyny hiperbarycznej*. 2nd ed., α-medica press, Bielsko-Biała 2007: 15–21.
11. Jang DH, Khatri UG, Shortall BP et al.: Alterations in mitochondrial respiration and reactive oxygen species in patients poisoned with carbon monoxide treated with hyperbaric oxygen. *Intensive Care Med Exp* 2018; 6: 4.
12. Thom SR, Keim LW: Carbon monoxide poisoning: a review epidemiology, pathophysiology, clinical findings, and treatment options including hyperbaric oxygen therapy. *J Toxicol Clin Toxicol* 1989; 27: 141–156.
13. Liebelt EL: Hyperbaric oxygen therapy in childhood carbon monoxide poisoning. *Curr Opin Pediatr* 1999; 11: 259–264.
14. Blumenthal I: Carbon monoxide poisoning. *J R Soc Med* 2001; 94: 270–272.
15. Cho CH, Chiu NC, Ho CS et al.: Carbon monoxide poisoning in children. *Pediatr Neonatol* 2008; 49: 121–125.
16. Lin CH, Su WH, Chen YC et al.: Treatment with normobaric or hyperbaric oxygen and its effect on neuropsychometric dysfunction after carbon monoxide poisoning: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Medicine (Baltimore)* 2018; 97: e12456.
17. Paprocki J, Gackowska M, Pawłowska M et al.: Aktualne zastosowanie hiperbarii tlenowej. *Med Rodz* 2016; 19: 217–222.
18. Buckley NA, Juurlink DN, Isbister G et al.: Hyperbaric oxygen for carbon monoxide poisoning. *Cochrane Database Syst Rev* 2011; (4): CD002041.
19. Boerema I: [Life without blood]. *Ned Tijdschr Geneesk* 1960; 104: 949–954.
20. Kao LW, Nañagas KA: Carbon monoxide poisoning. *Med Clin North Am* 2005; 89: 1161–1194.
21. Ruth-Sahd LA, Zulkosky K, Fetter ME: Carbon monoxide poisoning: case studies and review. *Dimens Crit Care Nurs* 2011; 30: 303–314.
22. Yarar C, Yakut A, Akin A et al.: Analysis of the features of acute carbon monoxide poisoning and hyperbaric oxygen therapy in children. *Turk J Pediatr* 2008; 50: 235–241.
23. Chang YC, Lee HY, Huang JL et al.: Risk factors and outcome analysis in children with carbon monoxide poisoning. *Pediatr Neonatol* 2017; 58: 171–177.
24. Macnow TE, Waltzman ML: Carbon monoxide poisoning in children: diagnosis and management in the emergency department. *Pediatr Emerg Med Pract* 2016; 13: 1–24.
25. Meert KL, Heidemann SM, Sarnaik AP: Outcome of children with carbon monoxide poisoning treated with normobaric oxygen. *J Trauma* 1998; 44: 149–154.
26. Weaver LK, Hopkins RO, Chan KJ et al.: Hyperbaric oxygen for acute carbon monoxide poisoning. *N Engl J Med* 2002; 347: 1057–1067.
27. Hampson NB: Cost of accidental carbon monoxide poisoning: a preventable expense. *Prev Med Rep* 2015; 3: 21–24.