

ARTYKUŁ POGLĄDOWY/REVIEW PAPER

Otrzymano/Submitted: 02.06.2010 • Poprawiono/Corrected • 06.08.2010 • Zaakceptowano/Accepted: 10.08.2010

© Akademia Medycyny

Znieczulenie ogólne z małym przepływem – *low-flow anaesthesia (LFA) – opis metody* ***General anaesthesia – low-flow anaesthesia method (LFA) – method description***

Waldemar Machała, Katarzyna Śmiechowicz

Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii, Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Uniwersytecki Szpital Kliniczny im. Wojskowej Akademii Medycznej – CSW, Łódź



Streszczenie

Znieczulenie wziewne, tak metodą półzamkniętą, jak i zamkniętą, znane jest od połowy XIX wieku. Od początku jego stosowania znaczenia nabierała eliminacja dwutlenku węgla (CO₂) powstającego w komórkach i tkankach jako końcowy produkt metabolizmu tlenowego. Wprowadzenie pochłaniaczy dwutlenku węgla zawierających w swym składzie głównie zasady sodowe i potasowe uczyniło eliminację CO₂ bardziej efektywną. Fakt ten przysporzył znieczuleniu małymi przepływami dość dużej popularności, jak można było tego oczekiwać.

Wraz z wprowadzeniem do praktyki anestezjologicznej halotanu, technika małego przepływu została nieco zapomniana. Dopiero lata 80. XX wieku, a wraz z nimi wprowadzanie nowych anestetyków wziewnych: izofluranu, desfluranu, sewofluranu, spowodowało powrót do techniki małych przepływów. Od tej pory technika małych przepływów przeżywa swój renesans i zjednuje sobie coraz więcej zwolenników.

Powodów, dla których technika małego przepływu jest obecnie szeroko stosowana jest kilka, każdy z nich jest nie mniej ważny. Większość współczesnych aparatów do znieczulenia wyposażona jest w okrężny układ oddechowy, który pozwala na znaczną redukcję dopływu świeżego gazu, co sprawia, że technika małego przepływu przynosi wymierne oszczędności. Niezbędna aparatura monitorująca skład i stężenie gazów w układzie czyni ten rodzaj znieczulenia bezpiecznym dla pacjenta. Nie można również pominąć kwestii zanieczyszczenia środowiska sali operacyjnej jak i środowiska naturalnego przez gazy anestetyczne. Technika małych przepływów pozwala na znaczne jego ograniczenie. *Anestezjologia i Ratownictwo 2010; 4: 340-353.*

Słowa kluczowe: znieczulenie wziewne, mały przepływ gazów, minimalny przepływ gazów, eliminacja dwutlenku węgla, warunki bezpiecznego znieczulenia

Summary

Inhalatory anaesthesia administered by both closed and semi closed method has been known since mid XIX century. Since the beginning of inhalatory method (elimination of carbon dioxide forming in cells and tissues - a final product of oxygen metabolism) has gained importance. Introduction of carbon dioxide absorbents containing mainly sodium and potassium alkali contributed to higher effectiveness of carbon dioxide elimination. This helped to make low flow anaesthesia method more popular. However, when halothane gained more popularity among anaesthesiologists, low flow anaesthesia became slightly neglected/forgotten. Not before 80's of XX century when new inhalatory anaesthetics were invented (isoflurane, desflurane, sevoflurane)- low flow anaesthesia came back to medical practice/life. Since then low flow anaesthesia has revived and gained enthusiasts. There are several equally important reasons of low flow anaesthesia method widespread popularity. The majority of presently used/

contemporary anaesthetic apparatus equipped with circular respiratory system allowing significant fresh gas flow reduction. This quality makes low flow anaesthesia method efficient/effective. Essential apparatus for monitoring gas composition and concentration in the system makes this anaesthesia safe for the patient. Furthermore, it is vital to point out that low flow anaesthesia method radically eliminates contamination of operation room and natural environment with anaesthetic gases. *Anestezjologia i Ratownictwo 2010; 4: 340-353.*

Keywords: inhalatory anaesthesia, low fresh gas flow, minimal fresh gas flow, carbon dioxide elimination, conditions of safe anaesthesia

W 1986 r. Bergmann stwierdził, że współczesne, zaawansowane technologicznie, aparaty do znieczulenia powinny być używane wyłącznie do znieczuleń definiowanych, jako anestezja małym, albo minimalnym przepływem [*low-flow anaesthesia* (LFA) i *minimal-flow anaesthesia* (MFA)]. O anestezji z małym przepływem (LFGF – *low fresh gas flow*) można mówić, kiedy całkowity przepływ gazów do układu oddechowego jest mniejszy niż 3 l/min, choć część autorów uważa, że LFA jest wtedy, gdy $FGF \leq 1$ l/min. Według Bauma w LFA 50% gazów wydechowych, kierowane jest ponownie do części wdechowej układu okrężnego [1]. O minimalnym przepływie można mówić, kiedy FGF jest równy lub mniejszy niż 0,5 l.

Rys historyczny

- 1727 r. – Hales; skonstruował wykorzystywany w celach ratunkowych aparat, w którym istniał oddech zwrotny.
- 1850 r. – Pierwsze użycie układu prawie zamkniętego. Użyto chloroformu, a rolę pochłaniacza CO₂ spełnił wodorotlenek potasu (KOH). Uważano wówczas, że eliminacja CO₂ nie jest konieczna.
- 1906 r. – Kuhn; zbudował układ półotwarty (oddech zwrotny).
- 1906 r. – Coleman skonstruował aparat do znieczulenia, w którym możliwe było zastosowanie N₂O. Czas znieczulenia był ograniczony (najprawdopodobniej z powodu niedotlenienia).
- 1914 r. – Jackson; opracował technikę eliminacji CO₂ w warunkach laboratoryjnych.
- 1923 r. – Waters; pierwsze kliniczne zastosowanie substancji eliminującej CO₂.
- 1924 r. – Dräger; pierwszy aparat do znieczulenia, spełniający kryteria met. półzamkniętej.
- 1951 r. – Bickford; opis znieczulenia wziewnego, dla podtrzymania którego podawano eter bez-

pośrednio do układu oddechowego (VIC).

1952 r. – Foldes }
1974 r. – Vitruve } – charakteryzują technikę LFA i MFA.

Lata 60.–70. XX wieku – Lowe opisuje metodę podawania anestetyków bezpośrednio do układu oddechowego (VIC – parownik w układzie oddechowym).

1983 r. – Ross }
1986 r. – Westernskow } – podawanie płynnego anestetyku do układu oddechowego.

Znieczulenie ogólne z małym przepływem (LFA) było powszechną techniką znieczulenia ogólnego, wykonywaną do początku lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. W połowie lat 50., kiedy do praktyki klinicznej wszedł halotan zaczęto wykonywać znieczulenia z „dużym przepływem gazów” (*HFA – high flow anaesthesia*). Przyczyn tego stanu upatruje się w trudnościach konstrukcyjnych ówczesnych parowników dla halotanu, które dla prawidłowego funkcjonowania wymagały dużego przepływu gazów [2]. Nie bez znaczenia było również to, że halotan – charakteryzujący się wysokim współczynnikiem rozpuszczalności krew-gaz - dla osiągnięcia właściwego pęcherzykowego ciśnienia parcjalego „potrzebował” dłuższego czasu i większego przepływu świeżego gazu (FGF).

Pojawienie się na początku lat 80. anestetyków o niskim współczynniku rozpuszczalności krew/gaz, takich jak sewofluran, a wraz z nim nowej generacji parowników, stworzyło szansę na powrót znanej już techniki LFA i MFA. Anestetyki wziewne o współczynniku rozpuszczalności krew-gaz mniejszym niż 1 (sewofluran i desfluran) można stosować w technice LFA i MFA. Osiągają one szybko ciśnienie parcjale w pęcherzykach płucnych, wywołujące znieczulenie (szybka indukcja), a po zaprzestaniu ich podawania – szybko powraca przytomność. Korekty termicznej (do temp. sali operacyjnej) nie wymagają również używane współcześnie parowniki. Uwalniają one ściśle określoną (na pokrętło) objętość anestetyku. Współcześnie

stosowanymi anestetykami, których współczynnik rozpuszczalności krew-gaz jest niższy od jedności są:

- Ksenon 0,115.
- Desfluran 0,424.
- Podtlenek azotu 0,47.
- Sewofluran 0,6.

Aparat do znieczulenia

Obecnie niemalą część zabiegów wykonuje się w znieczuleniu ogólnym dotchawiczym. Do jego wykonania potrzebne są precyzyjne aparaty do znieczulenia umożliwiające:

- Ustalenie składu mieszaniny oddechowej.
 - Utrzymanie żądanej – zaprogramowanej wentylacji.
- Współczesne aparaty do znieczulenia [3]:
- Posiadają źródło gazów (tlen, podtlenek azotu i powietrze). Gazy te podawane w odpowiednich proporcjach spełniają rolę nośnika par anestetyków halogenowych. Nośnikiem może być 100% tlen, mieszanina podtlenku azotu i tlenu, mieszanina tlenu i powietrza z podwyższonym stężeniem tlenu.
 - Posiadają skalowane przepływomierze (l/min) umożliwiające podawanie ściśle określonych objętości gazu w jednostce czasu.
 - Są wyposażone w parowniki przeznaczone dla konkretnego rodzaju anestetyku, coraz bardziej dokładne (ostatnio nawet elektronicznie kontrolujące dawkowanie anestetyku).
 - Mają oddechowy układ okrężny z pochłaniaczem dwutlenku węgla. Dzięki niemu gazy anestetyczne krążą, kilkakrotnie osiągając układ oddechowy pacjenta. Po każdym cyklu oddechowym z ich składu eliminowany jest dwutlenek węgla, a objętość uzupełniana jest w zależności od objętości przepływu świeżych gazów (*FGF – fresh gas flow*) - albo mieszaniną gazów używanych do znieczulenia (met. półzamkniętą), albo tlenem - w objętości nieco przekraczającej minutowe zapotrzebowanie organizmu – tj. 3-3,5 ml/kg/min (met. zamkniętą).
 - Są szczelne. Dopuszcza się nieszczelność układu oddechowego nie większą niż 150 ml/min przy przekroczeniu ciśnienia wdechowego powyżej 30 cm H₂O. Posiadają również alarm małej nieszczelności układu.
 - Charakteryzują się małą pojemnością układu

oddechowego i niewielką liczbą łączników.

- Wyposażone są w monitory oddechowe.
- Ważną rolę w aparacie do znieczulenia spełniają:
 - Przepływomierz proporcjonalny.
 - Alarm rozłączeniowy.
 - Czujnik wdechowego stężenia tlenu.
- Dopływ 100% tlenu do układu oddechowego z pominięciem przepływomierza i parownika (*flush*, albo *by-pass*).

Jednym z podstawowych elementów aparatu do znieczulenia jest układ okrężny. Można w nim wyróżnić:

1. Źródło świeżych gazów (dopływ gazów do układu okrężnego).
2. Część wdechową z jednokierunkową zastawką wdechową.
3. Część wydechową z jednokierunkową zastawką wydechową.
4. Pochłaniacz dwutlenku węgla, wypełniony substancją eliminującą CO₂.
5. Worek oddechowy, przy pomocy którego można będzie prowadzić oddech IPPV (ręczny).
6. Zastawkę nadmiarową, przez którą usuwany jest nadmiar gazów oddechowych.
7. Łącznik Y, łączący ramiona wdechowe i wydechowe z pacjentem.
8. Filtr przeciwbakteryjny.

Monitorowanie

Pacjent niezależnie od techniki znieczulenia powinien być należycie monitorowany – w sposób bezprzyrządowy (kliniczne) i przyrządowy. Z metod przyrządowych za przydatne uznaje się monitorowanie:

- Elektrokardiograficzne z analizą odcinka ST w odprowadzeniu przedsercowym jednobiegunowym (V₃) – (tutaj najszybciej widoczne będzie niedotlenienie).
- Wysycenia hemoglobiny tlenem (SaO₂).
- Ciśnienia tętniczego krwi met. nieinwazyjną.
- Przewodnictwa nerwowo-mięśniowego (ciąg czterech impulsów: TOF).
- Parametrów wentylacji z uwzględnieniem:
 - częstości oddechu,
 - objętości oddechowej,
 - wentylacji minutowej,
 - szczytowego ciśnienia wdechowego,
 - ciśnienia fazy wdechowej (plateau).
- Składu gazów oddechowych; stężenia wdecho-

wego i wydechowego (tlenu, podtlenku azotu, anestetyków wziewnych i dwutlenku węgla).

- Głębokości snu (BIS/Entropia/AEP/EEG).
- Analiza gazów anestetycznych odbywa się po pobraniu z układu oddechowego (do monitora gazów oddechowych) 50-200 ml gazu na minutę, który po analizie odprowadzany jest z powrotem do układu [4]. Ponieważ większość monitorów oznacza MAC (minimalne stężenie pęcherzykowe anestetyku wziewnego), uwzględniając podtlenek azotu, wydaje się celowe utrzymywanie stężenia anestetyku wziewnego na poziomie 1-1,5 MAC [2].

Znieczulenie ogólne - metoda

Pacjent kwalifikowany do zabiegu operacyjnego powinien oczekiwać od anestezjologa:

- Właściwej kwalifikacji do znieczulenia obejmującej badanie pacjenta, ocenę stanu fizycznego i wyboru najbardziej przydatnej metody znieczulenia.
- Zlecenia premedykacji.
- Zgodnej ze sztuką indukcji znieczulenia, kondukcji i zakończenia znieczulenia (wybudzenie).
- Opieki we wczesnym okresie pooperacyjnym.

Znane są cztery metody znieczulenia ogólnego: otwarta, półotwarta, półzamknięta i zamknięta. Pacjentów, których masa jest większa niż 20 kg, najczęściej znieczula się metodą półzamkniętą (układ okrężny). Przepływ gazów (FGF) w większości szpitali ustalony został na 6-8 litrów/ minutę. Okazuje się, że znieczulając w ten sposób (FGF 6-8 l/min) chorzy znieczulani są nie metodą półzamkniętą, ale półotwartą. Metoda półzamknięta charakteryzuje się bowiem następującymi cechami:

- Przepływ świeżych gazów MNIEJSZY od wentylacji minutowej, zatem < 6 l/min.
- Obecnością oddechu zwrotnego.
- Koniecznością eliminacji dwutlenku węgla za pomocą pochłaniacza CO₂.
- Utratą ciepła < 180 kcal/min.

Definicje

Metoda zamknięta

Metoda znieczulenia, w której po fazie nasycającej (high flow anaesthesia - HFA) należy zmniejszyć przepływ świeżych gazów, podając jedynie tlen w objętości

wystarczającej do pokrycia potrzeb metabolicznych (2,90-3,5 ml/kg/min). Oddech zwrotny wymaga bezwarunkowej eliminacji dwutlenku węgla. Utrata ciepła jest mniejsza, niż 180 kcal/min.

Znieczulenie ogólne z „dużym przepływem”. *High-flow anaesthesia – HFA*

Znieczulenie, w którym FGF (FGF – fresh gas flow) wynosi od 3-8 l/min. Przepływ świeżych gazów do układu oddechowego przewyższa zapotrzebowanie minutowe pacjenta, a nadmiar gazów eliminowany jest przez zastawkę nadmiarową. Ponieważ ten sposób podawania gazów dotyczy najczęściej metody półzamkniętej (układ okrężny) zachodzi konieczność eliminacji CO₂ ze względu na obecność oddechu zwrotnego. Utrata ciepła, w zależności od FGF, waha się od 300-180 kcal/min.

Znieczulenie ogólne z „małym przepływem”. *Low-flow anaesthesia – LFA*

Znieczulenie, w którym FGF wynosi od 3-0,5 l/min, ale najczęściej jest mniejszy niż 1,5 l/min. Przepływ świeżych gazów przewyższa zapotrzebowanie minutowe na tlen. Oddech zwrotny istnieje, zatem konieczna jest eliminacja CO₂ przez pochłaniacz CO₂. Straty ciepła są mniejsze niż 180 kcal/min.

Znieczulenie ogólne z „minimalnym przepływem”. *Minimal-flow anaesthesia – MFA*

Znieczulenie, w którym FGF nie przekracza 0,5 l/min. Oddech zwrotny istnieje i konieczna jest eliminacja CO₂ przez pochłaniacz CO₂. Straty ciepła są mniejsze niż 180 kcal/min.

Azot

W organizmie człowieka o przeciętnej budowie azot występuje w ilości ok. 3,5 l. W tkankach rozpuszczone jest ok. 2 litrów, a czynnościowa pojemność zalegająca (FRC) mieści ok. 1,6 l azotu [2]. Obecność azotu w organizmie nie jest korzystna w trakcie znieczulenia. Pierwszą fazą indukcji znieczulenia jest natlenienie bierne - denitrogenacja. W jej trakcie pacjent oddycha samoistnie 100% tlenem, podawanym z aparatu do znieczulenia w objętości zbliżonej do wentylacji minutowej (HFGF – high fresh gas flow), przez szczelnie przyłożoną do twarzy maskę. Celem natlenienia biernego jest przede wszystkim eliminacja azotu. Zwiększenie rezerwy tlenowej organizmu ma znaczenie drugorzędne. Azot ulega najszybciej elimi-

nacji z płuc (do 6 minut). W ciągu 15-20 minut HFA eliminuje się z organizmu przeciętnie ok. 2 l azotu [5].

Po ustaleniu się składu mieszaniny oddechowej (faza wstępna) - w trakcie HFA należy zmniejszyć przepływ świeżych gazów, rozpoczynając LFA, lub MFA. W trakcie LFA (MFA) do układu oddechowego dostarczana jest 1/6-1/12 wentylacji minutowej pacjenta, zatem w początkowym okresie znieczulenia względnie więcej azotu przechodziło będzie z tkanek (z których będzie on eliminowany) do płuc. Zawartość azotu w mieszaninie oddechowej w trakcie LFA nie przekracza z reguły 5% składu mieszaniny oddechowej, a szczyt stężenia azotu w mieszaninie oddechowej obserwowany jest w 45 minucie po rozpoczęciu znieczulenia. Faza wstępna-nasycająca (HFGF) LFA powinna trwać ok. 6 minut. Zaleca się, aby faza wstępna (HFGF) MFA trwała ok. 15-20 minut, ponieważ przepływ gazu po tym czasie będzie $\leq 0,5$ l/min, zatem eliminacja azotu z tkanek do płuc będzie względnie większa. Przez pierwsze 35-45 minut MFA obserwuje się kliniczne znaczący wzrost stężenia azotu w płucach, który zajmuje powyżej 10% objętości mieszaniny gazów. W trakcie pierwszych 45 minut MFA zaleca się, aby co 15 minut zwiększyć na jedną minutę FGF w celu wypłukania azotu z płuc.

Tlen

Zużycie tlenu (ml/min) wyliczyć można z wzoru Brody'ego (1945 r.), który w oryginale przedstawia się następująco:

$$VO_2 = 10 \times \text{masa ciała}^{3/4} \text{ (ml/min)} [6]$$

masa ciała: [kg]

Po zmodyfikowaniu można go wyrazić:

$$VO_2 = 3.5 \times \text{masa ciała (ml/min)}$$

Wzór Brody'ego odnosi się do zużycia tlenu przez pacjentów, których masa ciała zawarta jest w przedziale 55-100 kg. Przeciętne zużycie tlenu przez dorosłego 70-kilogramowego człowieka wynosiło będzie ok. 250 ml/min.

Dla pacjentów o wadze pomiędzy 10-55 kg wzór będzie się przedstawiał następująco:

$$VO_2 = 3.75 \times \text{masa ciała (ml/min)}$$

Zużycie tlenu podczas znieczulenia jest w rze-

czywistości mniejsze o ok. 10-30%. Wynika to ze zwolnienia procesów metabolicznych spowodowanych działaniem anestetyków [2]. Zapotrzebowanie na tlen w czasie znieczulenia może wzrosnąć w sytuacjach stresu operacyjnego (początek operacji, operacja w okolicach stresogennych, za małe dawki środków przeciwbólowych).

Dwutlenek węgla

Dwutlenek węgla jest produktem końcowym procesów oddechowych. Wielkość eliminacji związana jest z metabolizmem pacjenta. Im jest on wyższy, tym więcej się go tworzy. Przeciętnie w ciągu minuty jego prężność we krwi wzrasta od 3 do 4 mm Hg (u niewentylowanego pacjenta). W warunkach fizjologii jest on na szczęście szybko eliminowany przez płuca.

Wielkość tworzenia się (eliminacji) dwutlenku węgla można wyliczyć z wzoru:

$$VCO_2 = 3 \times \text{masa ciała (ml/min)}$$

masa ciała: [kg]

Objętość tworzącego się dwutlenku węgla jest niższa od wyliczonej, podobnie jak zużycie tlenu. Znieczulając metodą półzamkniętą i zamkniętą, z powodu obecności oddechu zwrotnego, należy bezwzględnie eliminować dwutlenek węgla z układu oddechowego. Jeżeli wykonywane jest znieczulenie metodą otwartą, lub półotwartą takiego obowiązku nie ma, ponieważ nie występuje oddech zwrotny, wymagający eliminacji CO_2 . Dwutlenku węgla można również nie eliminować w sytuacjach, w których prowadzi się wentylację przez układ okrężny, jeżeli FGF wynosi:

- Dla wentylacji kontrolowanej = $0,8 \times \sqrt{\text{masa(kg)}} \text{ (l/min)}$ – tj. 6,7 l/min.
- Dla wentylacji spontanicznej = $\sqrt{\text{masa(kg)}} \text{ (l/min)}$ – tj. 8.4 l/min.

Podtlenek azotu

Podtlenek azotu jest wziewnym anestetykiem nieorganicznym, który używany jest również jako składowa oddechowej mieszaniny nośnikowej. Nie ulega on praktycznie metabolizmowi i charakteryzuje się niskim współczynnikiem rozpuszczalności krewgazu. Jest 34x lepiej rozpuszczalny we krwi od azotu i w pierwszych kilkunastu minutach znieczulenia wypiera go z tkanek, zajmując jego miejsce. Wielkość

„wychwyty” podtlenku azotu przez tkanki (wielkość jego przenikania do tkanek) zmniejsza się odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka z upływającego czasu. Zatem przechodzenie podtlenku azotu do tkanek stale się zmniejsza. I tak:

- do 20 minuty od rozpoczęcia znieczulenia wynosi - 223 ml/min,
- w 30 minucie - 183 ml/min,
- w 60 minucie - 129 ml/min,
- a w 120 minucie - 91 ml/min.

„Zużycie” podtlenku azotu wylicza się z wzoru Severinghausa (1954 r.):

$$\text{VN}_2\text{O} = 1000 \times t^{1/2} \text{ (ml/min) [7]}$$

t: czas: [min], przy założeniu, że pacjent wentylowany jest mieszaniną zawierającą 70% podtlenku azotu i 30% tlenu.

Podtlenek azotu nie jest metabolizowany, a jego „zużycie” związane jest z masą chorego. Typowy – 70 kg pacjent w ciągu 90 minut znieczulenia mieszaniną podtlenku azotu i tlenu (70:30%) pochłania 20 l. N₂O.

Anestetyki wziewne

W Polsce używane są trzy anestetyki halogenowe:

- Izofluran.
- Sewofluran.
- Desfluran.

Najbardziej odpowiednie dla techniki LFA i MFA są sewofluran i desfluran.

Chcąc ocenić „zużycie” anestetyków przez organizm należy podstawić do wzoru Lowe’a (1981 r.):

$$\text{Van} = f \times \text{MAC} \times \lambda_{B/G} \times Q \times t^{1/2} \text{ [8]},$$

następujące współczynniki:

- f - czynnik definiujący stężenie środka wziewnego, przy którym pacjent nie zareaguje na nacięcie skóry;
- MAC – minimalne stężenie pęcherzykowe;
- $\lambda_{B/G}$ – współczynnik rozpuszczalności krew-gaz;
- Q – pojemność minutowa serca;
- t – czas.

Zużycie izofluranu:

Przy współczynniku $\lambda_{B/G}$ – 1,5 i MAC – 1,2%/obj. wynosiło będzie:

- 70 ml/min w pierwszej minucie;

- 25 ml/min po 15 minutach;
- i ulegnie zmniejszeniu do ok. 10 ml/min, jeżeli parownik ustawiony będzie na 1,2%/obj.

Zużycie sewofluranu:

Przy współczynniku $\lambda_{B/G}$ – 0,7 i MAC – 2%/obj. wynosiło będzie:

- 40 ml/min w pierwszej minucie;
- 5 ml/min po 30 minutach i utrzymywać się będzie na tym poziomie, jeżeli parownik ustawiony będzie na 2,1%/obj. u 70 kg człowieka.

Zużycie desfluranu:

Przy współczynniku $\lambda_{B/G}$ – 0,5 i MAC – 6,0%/obj. wynosiło będzie:

- 90 ml/min w pierwszej minucie;
- 15 ml/min po 30 minutach;
- i ustabilizuje się na ok. 10 ml/min.

Kinetyka gazów w układzie oddechowym

Zasady ustalania składu mieszaniny oddechowej i przepływu gazów do układu oddechowego dla układów zamkniętych, LFA i MFA opracowane zostały w latach 70. i 80. Podstawy teoretyczne i praktyczne zostały więc opisane w okresie, kiedy monitorowanie gazów oddechowych nie było rutynowe [2]. W związku z tym czas trwania fazy wstępnej, nasycającej (w trakcie, którego prowadzi się HFGF, czyli HFA) ustalony został w sposób orientacyjny. I tak w przypadku LFA szacuje się go na ok. 6 minut (technika Götteborg’ska).

Obecnie rutynowo monitorowany jest skład mieszaniny oddechowej, zatem czas utrzymywania HFGF (fazy wstępnej) można indywidualizować i uznać za wystarczający, jeżeli różnica pomiędzy stężeniem końcowo-wdechowym, a końcowo-wydechowym dla np. podtlenku azotu wynosi 3-4%. Przy tej różnicy wdechowo-wydechowej można uznać, że usunięto większość azotu z organizmu i zmniejszyć FGF do wartości odpowiadających LFA [2].

Wątpliwości (dotyczące głębokości znieczulenia) mogą się pojawić w sytuacji, kiedy nie jest używany podtlenek azotu, tylko inny anestetyk halogenowy, a nośnikiem gazów jest mieszanina powietrza z tlenem (azot!!!), lub 100% tlen. Żeby ocenić głębokość znieczulenia należy kierować się stężeniem anestetyku w gazach wdechowych (MAC) i wydechowych oraz monitorować czynność kory mózgowej np. aparatem BIS. Czynności te nie mogą odbywać się z pominięciem

Tabela 1. Skład gazów oddechowych

	Skład powietrza w organizmie człowieka (% i ciśnienie parcjalne)		
	Wdychanym	Wydychanym	Pęcherzykowym
Tlen	20,96% 156,2 mm Hg	16,3% 116,2 mm Hg	14,5% 101 mm Hg
Dwutlenek węgla	0,04% 0,3 mm Hg	4% 28,5 mm Hg	5,5% 40 mm Hg
Azot (i inne gazy śladowe)	79% 596,5 mm Hg	79,7% 568,3 mm Hg	80% 572 mm Hg
Ogółem:	100% 760 mm Hg	100% 760 mm Hg	100% 760 mm Hg

Tabela 2. Przepływ świeżych gazów – nośnik anestetyków: tlen/podtlenek azotu

Czas trwania znieczulenia	Od 0-6 minut	Powyżej 6 minut
masa ciała (kg)	FGF (l/min); O ₂ : N ₂ O	FGF (l/min); O ₂ : N ₂ O
poniżej 70 kg	1,5 : 3,5	0,25 : 0,6-0,8
70-100 kg	1,5 : 3,5	0,35 : 0,7-0,9
powyżej 100 kg	1,5 : 3,5	0,5 : 0,8-1,0

Tabela 3. Przepływ świeżych gazów – nośnik anestetyków: tlen/powietrze

Czas trwania znieczulenia	Od 0–2-3 minut	Powyżej 3 minut
masa ciała (kg)	FGF (l/min); O ₂ : powietrze	FGF (l/min); O ₂ : powietrze
poniżej 70 kg	1 : 5	0,2 : 1
izofluran	0,9%/obj.	2,5%/obj.
sewofluran	1,6%/obj.	3%/obj.
desfluran	4,5%/obj.	7,5%/obj.
70-100 kg	1 : 5	0,25 : 1,2
izofluran	0,9%/obj.	2,5%/obj.
sewofluran	1,6%/obj.	3%/obj.
desfluran	4,5%/obj.	7,5%/obj.
powyżej 100 kg	1 : 5	0,3 : 1,5
izofluran	0,9%/obj.	2,5%/obj.
sewofluran	1,6%/obj.	3%/obj.
desfluran	4,5%/obj.	7,5%/obj.

Tabela 4. Przepływ świeżych gazów, a objętość uwolnionego anestetyku wziewnego

Parownik (%/obj.)	FGF (l/min)	Uwolniona ilość pary środka do układu okężnego (ml/min)
1%/obj.	5	50 ml/min (bo 5000 ml : 100%)
5%/obj.	5	250 ml/min (bo 5000 ml : 100/5%)
1%/obj.	0,5	5 ml/min (bo 500 ml : 100%)
5%/obj.	0,5	25 ml/min (bo 500 ml : 100/5%)

oceny stanu ogólnego pacjenta (dokładna obserwacja kliniczna, która powinna być prowadzona w każdym rodzaju znieczulenia).

Przepływ gazów - FGF

Zalecane wartości FGF (w fazie wstępnej i podtrzy-

mującej), kiedy oddechową mieszaniną nośnikową jest tlen i podtlenek azotu przedstawia tabela 2 [2].

Zalecane wartości FGF (w fazie wstępnej i podtrzymującej), kiedy oddechową mieszaniną nośnikową jest powietrze z tlenem przedstawia tabela 3 [2].

Po fazie wstępnej wysokim przepływem gazów

(HFA – ok. 6 l/min), który trwa ok. 6 minut należy obniżyć FGF, rozpoczynając LFA. Należy również zwiększyć stężenie anestetyków halogenowych z powodu obniżenia się ich stężenia w mieszaninie oddechowej i możliwości spłynięcia anestezji (skutek rozcieńczeń Egera). Stężenie anestetyku w mieszaninie oddechowej (rzeczywiste) jest mniejsze odczytywanych „na parowniku”. Obniżenie stężenia po rozpoczęciu LFA dotyczy przede wszystkim anestetyków o wysokim współczynniku rozpuszczalności krew-gaz (izofluran), choć zaleca się także podwyższenie stężenia sewofluranu i desfluranu (niski współczynnik $\lambda_{B/G}$). Dla przykładu, wartość stężenia anestetyku „na parowniku” ustawiona zostanie na 1%/obj., przy FGF 5 l/min, to do układu oddechowego uwalniało się będzie 50 ml/min anestetyku (5000 ml: 100%), zatem, żeby utrzymać stężenie na takim samym poziomie, po obniżeniu FGF do 1 l/min należy zwiększyć wartość anestetyku „na parowniku” do 5%/obj. (1000 ml : 100/5%).

Czas obecności gazów w układzie oddechowym można oszacować, dzieląc pojemność układu okrężnego przez FGF (w l/min). Jeżeli pojemność układu okrężnego jest mała (np. 5 l), a FGF wynosi 5 l/min, to czas obecności gazu wynosi 1 minutę.

Jeśli pojemność układu jest duża (np. 10 l), to przy FGF 5 l/min czas obecności gazu wynosił będzie 2 minuty. Kiedy prowadzi się LFA, pojemność układu oddechowego ma ogromne znaczenie. Przy małej pojemności układu, nadzór nad LFA będzie łatwiejszy.

W trakcie zabiegu operacyjnego nierzadko zachodzi konieczność pogłębienia znieczulenia. W tym celu należy zwiększyć stężenie anestetyku wziewnego w układzie oddechowym przez otwarcie parownika do żądanej wartości. Czas osiągnięcia „nowego” ciśnienia parcjalnego w pęcherzykach płucnych będzie tym krótszy, im niższy jest współczynnik rozpuszczalności krew-gaz. Podwyższenie stężenia sewofluranu, lub desfluranu (niski współczynnik rozpuszczalności krew-gaz - $\lambda_{B/G}$) będzie przebiegało znacząco krócej od izofluranu (wysoki współczynnik $\lambda_{B/G}$). Zatem zamierzone stężenie osiągnięte zostanie szybciej w przypadku sewofluranu i desfluranu.

Mały przepływ (FGF) powodował będzie wolniejsze narastanie zadanego stężenia. Wiąże się to z mniejszym przepływem „porywającym” anestetyk z parownika. Aby osiągnąć „nowe” – wyższe stężenie środka o wysokim $\lambda_{B/G}$ w krótszym czasie, lepiej zwiększyć FGF.

Dla kontrastu - w sytuacji, w której usunięto azot

z pęcherzyków płucnych i planowane stężenie anestetyków wziewnych o niskim współczynniku rozpuszczalności krew-gaz (w czasie LFA), dla zwiększenia stężenia w układzie oddechowym nie jest wymagane zwiększenie FGF, a jedynie zwiększenie stężenia środka „na parowniku”. Oczywiście, także i w tym przypadku, nowe stężenie pęcherzykowe zostanie osiągnięte w krótszym czasie, po zwiększeniu FGF.

Po osiągnięciu oczekiwanego, nowego stężenia anestetyku, należy zmniejszyć FGF do wartości typowej dla LFA.

Eliminacja gazów po zakończeniu znieczulenia

Kończąc znieczulenie należy zamknąć dopływ anestetyków wziewnych do układu oddechowego. Zwiększenie FGF do objętości zbliżonej do wentylacji minutowej przyspiesza eliminację anestetyków. Eliminacja jest tym szybsza im niższy jest współczynnik $\lambda_{B/G}$.

Należy pamiętać o konieczności co najmniej 5 minutowej wentylacji 100% tlenem pacjentów, którym podawano podtlenek azotu, dla zapobieżenia wystąpienia niedotlenienia dyfuzyjnego.

Parowniki

- Parowniki w układzie oddechowym (VIC – *vaporiser in-circuit*).
- Parowniki poza układem oddechowym (VOC – *vaporizer out-circuit*).

Pochłaniacze dwutlenku węgla

- Zadaniem pochłaniacza dwutlenku węgla jest eliminacja dwutlenku węgla z mieszaniny oddechowej. Proces ten odbywa się na drodze chemicznej. Idealny pochłaniacz CO₂ powinien:
 - Eliminować jedynie CO₂.
 - Być skuteczny - 100 g substancji powinno pochłaniać 6-10 l CO₂.
 - Nie powodować rozpadu anestetyków wziewnych.
 - Być konfekcjonowany w formie gotowej do użycia (granulki, stałe – tj. bezpyłowe, nietoksyczne).
 - Mieć barwny znacznik, świadczący o jego zużyciu.
 - Przepuszczać ciepło, wilgoć i być bakteriostatyczny.
 - Nie drażnić dróg oddechowych.

Obecnie używane pochłaniacze CO₂ należą do jednej z trzech grup:

1. Zawierające NaOH i KOH: wapno sodowane, Sodarorb itp.

Tabela 5. Najczęściej używane pochłaniacze CO₂

Składnik	Wapno sodowane	Wapno barowane	Amsorb
Ca(OH) ₂ (%)	94	80	83
NaOH (%)	5	-	-
KOH (%)	1	6	-
CaCl ₂ (%)	-	-	1
CaSO ₄ (%)	-	-	4
Zawartość wody (%)	14 – 19	11 – 16 (jako oksyhydrat)	14
Ba(OH) ₂ – 8 H ₂ O (%)	-	20	-
Wielkość cząstek	4 – 8	4 – 8	4 - 8
Wskaźnik	Tak	Tak	Tak

- Nie zawierające KOH: Sofnolime, Medisorb, Drägerorb 800 Plus, KOH-free Sodorb, Spherasorb.
- Nie zawierające NaOH i KOH: Amsorb, Superia, LoFloSorb, *lithium hydroxide*.

Najczęściej używane substancje pochłaniające CO₂ przedstawia tabela nr 5.

Eliminacja dwutlenku węgla przez wapno sodowane przebiega w następujący sposób:

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
- $\text{H}_2\text{CO}_3 + 2 \text{NaOH}$ (albo KOH) $\rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$ (albo K_2CO_3) + 2 H₂O + energia
- Na_2CO_3 (albo K_2CO_3) + Ca(OH)₂ $\rightarrow \text{CaCO}_3$ + 2 NaOH (albo KOH)

Eliminacja dwutlenku węgla przez Baralyme przebiega w następujący sposób:

- $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_3 + 9 \text{H}_2\text{O} + \text{energia}$
- $9 \text{H}_2\text{O} + 9 \text{CO}_2 \rightarrow 9 \text{H}_2\text{CO}_3$
- $9 \text{H}_2\text{CO}_3 + 9 \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow 9 \text{CaCO}_3 + 18 \text{H}_2\text{O} + \text{energia}$

Eliminacja dwutlenku węgla przez Amsorb przebiega w następujący sposób:

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
- $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{energia}$

Czas skutecznej eliminacji CO₂, przez 0,5 kg substancji pochłaniającej wynosi ok. 6-8 godz. (zależy od metabolizmu pacjenta i FGF). Im mniejszy FGF, tym zużycie pochłaniacza CO₂ szybsze, ponieważ znaczna część gazów w układzie okrężnym kilkakrotnie przepływa przez pochłaniacz. Uważa się, że przy FGF 0,5 l/min czas skutecznej eliminacji dwutlenku węgla

wynosi 7 godzin, a przy FGF 3 l/min-10 godzin. Część pochłaniaczy CO₂ ma barwne znaczniki; zmiana zabarwienia pochłaniacza wskazuje na jego zużycie i obliguje do wymiany. Uważa się, że nie powinno się dopuszczać do sytuacji, w której wdechowe stężenie dwutlenku węgla przekraczałoby 1% (w powietrzu atmosferycznym zawartość CO₂ wynosi 0,04%). Pojemność absorpcyjna pochłaniacza dwutlenku węgla jest wypadkową:

- Wentylacji minutowej pacjenta (produkcja CO₂).
- Pojemności zbiornika (na substancję pochłaniającą).
- Przepływu świeżych gazów do układu oddechowego (FGF).

Reakcja wapna sodowanego z dwutlenkiem węgla jest reakcją egzotermiczną i przebiega z uwolnieniem wody. Pomimo tego, że świeże gazy oddechowe mają temperaturę niższą od temperatury sali operacyjnej, to w trakcie LFA temperatura ich ulegała będzie podwyższeniu, podobnie jak ich wilgotność. Temperatura gazów wdechowych jest przeciętnie o 5-7 stopni C wyższa niż temp. sali operacyjnej, a jej wilgotność względna wynosi 100%. Z tego powodu w czasie anestezji LFA/MFA należy unikać używania wymienników ciepła i wilgoci (HME), ponieważ ich stosowanie prowadzi do podwyższenia temperatury gazów, zwiększenia wilgotności i podwyższenia oporów dla przepływającego gazu [9]. Zaleca się filtry przeciwbakteryjne, które po zawilgoceniu nie podwyższały będą oporu przepływającego przez nie gazu.

Spory problem stanowią reakcje anestetyków wziewnych z substancjami eliminującymi dwutlenek węgla. Zależą one od kilku czynników, z których za najważniejsze uznaje się rodzaj pochłaniacza i mały przepływ gazów (LFA i MFA). Związki chemiczne tworzące się w anestetycznym układzie oddechowym

wym w wyniku reakcji anestetyków halogenowych z substancją pochłaniającą dwutlenek węgla (tabela 6) można „w sztuczny sposób” przydzielić do jednej z czterech grup [5]:

1. Substancje, które tworzą się w organizmie (aceton, tlenek węgla, metan i wodór).
2. Substancje, które są pochłaniane przez organizm (etanol, tlenek węgla i azot).
3. Substancje tworzące się w układzie okrężnym (tlenek węgla i produkty przemiany anestetyków halogenowych: CpA – Compound A (tabela 6)).
4. Substancje wprowadzane do układu oddechowego, jako zanieczyszczenia gazów medycznych, także spowodowane oddechem zwrotnym (azot, argon).

Tabela 6. Produkty przemiany anestetyków halogenowych

Anestetyk	Produkt degradacji
Enfluran	Tlenek węgla
Izofluran	Tlenek węgla
Desfluran	Tlenek węgla, floroform
Sewofluran	Związek A i B (Compound A I B: CpA, CpB)

Charakterystyka związków chemicznych

Substancja złożona A (Compound A – CpA)

Substancja złożona A (pochodna eteru winylowego) jest produktem degradacji nieenzymatycznej sewofluranu i powstaje w wyniku reakcji sewofluranu z substancją eliminującą CO₂ (pochłaniaczem dwutlenku węgla). CpA tworzy się we wszystkich aparatach do znieczulenia, wyposażonych w pochłaniacz CO₂ i przy każdym FGF. Wielkość jej syntezy jest zależna od FGF i jest tym większa im mniejszy jest przepływ gazów. Za normę, jeżeli o normie dla Compound A można w ogóle pisać, przyjmuje się 1 ppm (part per milion - część w milionie).

Wielkość dawki toksycznej i śmiertelnej CpA określona została jedynie u zwierząt (szczury) [10-12] i wynosi:

- 331 ppm – po 3-godzinnej ekspozycji – dawka toksyczna.
- 203 ppm – po 6 godzinach ekspozycji – dawka toksyczna.
- 127 ppm – po 12 godzinach ekspozycji (u szczurów LC50).

Nie udało się natomiast wykazać zależności pomiędzy obecnością CpA, jej stężeniem, a nefrotoksycznością u ludzi. Związane jest to z różnymi drogami metabolizmu substancji złożonej A u ludzi i szczurów. W trakcie badań oceniających wpływ CpA na nerki oznaczano stężenia enzymów, będących markerami uszkodzenia nerek. Należą do nich:

- Transferaza α- glutationu – αGST.
- Transferaza π- glutationu – πGST.
- N- acetylo-β-D-glukosaminidaza – NAG.
- Aminopeptydaza alaninowa – AAP.
- β-2 mikroglobulina.

Okazało się, że w trakcie LFA sewofluranem stężenia ww. enzymów są niższe, niż po znieczuleniu enfluranem [13] i zbliżone do wartości osiąganych po znieczuleniu izofluranem [14,15].

W trakcie prowadzonych badań zaobserwowano zależność pomiędzy wielkością syntezy CpA, a rodzajem użytego pochłaniacza dwutlenku węgla i panującej w nim temperatury.

Substancje eliminujące CO₂ różnią się pomiędzy sobą zawartością wody i obecnością niektórych składników (głównie silnych zasad). Okazało się, że najmniej CpA tworzy się w trakcie LFA, jeżeli do eliminacji dwutlenku węgla używano Amsorb'u (nie zawiera NaOH i KOH); najwięcej, kiedy używano wapna sodowanego. Tworzenie CpA było 10-krotnie większe, jeżeli używano wapna sodowanego zamiast Amsorb'u [16].

Wpływ na tworzenie się CpA ma również temperatura pochłaniacza CO₂. Im jest ona wyższa, tym więcej będzie się tworzyło CpA [16].

Znane są badania, w których autorzy wykazali bezpieczeństwo stosowania sewofluranu przy MFA [17-19]. Stężenie CpA nie było wyższe niż 60 ppm.

W trakcie badań oceniających LFA i MFA na wielkość tworzenia CpA wypracowano kilka sposobów, których zastosowanie może zmniejszyć syntezę CpA. Oprócz użycia innego niż wapno sodowane pochłaniacza, można:

1. Schładzać mieszaninę gazów docierających do pochłaniacza dwutlenku węgla przez zwiększenie przestrzeni bezużytecznej układu oddechowego (dołączenie pomiędzy łącznik Y, a filtr oddechowy rurki o pojemności 160-170 ml) [20].
2. Schładzać mieszaninę gazów oddechowych przez podłączenie urządzenia chłodzącego. Okazało się, że obniżenie temperatury gazów wydechowych z 24 do 5°C zmniejszyło produkcję CpA z 27,1 do

- 16,3 ppm [21]. Nie uległa – co ważne - obniżeniu temperatura ciała.
- Użyć mniejszego pojemnika na wapno sodowane. W aparatach, w których pojemnik na wapno sodowane jest niewielki (AS/3 ADU Datex-Ohmeda) tworzenie CpA jest mniejsze [22].
 - Podawać Probenecid (inhibitor β -liazy) w dawce 2 g, na dwie godziny przed znieczuleniem. W grupie LFA wartości enzymów uszkodzenia nerek były znamienne niższe [23].
 - Wykonywać znieczulenie aparatem PhysioFlex, który pozwala znieczulać metodą zamkniętą; temp. pochłaniacza dwutlenku węgla jest w nim o 10°C niższa (i wynosi 33°C), niż w innych aparatach LFA [24].
 - Dodać do pochłaniacza wodę destylowaną w ilości 100 ml/1 kg wapna sodowanego [25]. Zdaniem autorów tej pracy zalecenie to jest wysoce kontrowersyjne, wobec czego sugerują nie stosować go. Lepszym rozwiązaniem będzie wymiana wapna na nowe.

Argon

Jest gazem szlachetnym i nieszkodliwym. Pojawia się w wyjątkowych okolicznościach w koncentratorach tlenowych. Podczas LFA jego stężenie waha się od 5-6%, a przy MFA 8-15%. Można zredukować ilość argonu w układzie okrężnym przez okresowe (co 90 minut) przepłukiwanie układu oddechowego HFA.

Wodór

Wodór eliminowany jest z płuc w ilości 0,6 l/min. W trakcie MFA jego stężenie może wynosić 200 ppm/godz.; i jest niższe od stężenia, w którym może wystąpić zapłon.

Tlenek węgla

Niepokojącym, ale na całe szczęście sporadycznym zjawiskiem jest tworzenie tlenku węgla, w następstwie kontaktu anestetyku halogenowego (enfluran, izofluran i desfluran) z substancją eliminującą dwutlenek węgla [26]. Tlenek węgla mając wybitne powinowactwo do hemoglobiny, łączy się z nią, tworząc karboksyhemoglobinę. Karboksyhemoglobina nie ma zdolności wiązania tlenu. Wartości prawidłowe karboksyhemoglobiny we krwi nie przekraczają 0,4-0,8%, ale u palaczy tytoniu mogą sięgać 10%. Donoszono, że w układzie zamkniętym stężenie CO może osiągnąć wartość 200 ppm. Objawy toksyczne pojawiają się przy

wartościach 600 ppm/godz.; wymioty i ból głowy - przy 900 ppm/godz., a stan bezpośrednio zagrażający życiu - przy 1500 ppm/godz [5].

Najmniej CO tworzy się, kiedy do eliminacji CO₂ używa się Amsorb'u, nieco więcej przy wapnie sodowanym [27], a najwięcej przy Baralyme [28]. Wielkość syntezy CO jest największa, jeżeli wapno sodowane jest dodatkowo suche – „zespół poniedziałkowego ranka” – „Monday disease [29]. Rolę w tworzeniu się CO odgrywa również temperatura pochłaniacza; więcej się go tworzy jeżeli temperatura pochłaniacza jest wyższa. Zawartość tlenu węgla obniża się po 60 minutach znieczulenia. Wielkość tworzenia CO przedstawia się następująco: (desfluran \geq enfluran $>$ izofluran) \gg (halotan = sewofluran).

W ostatnich latach byliśmy świadkami kilku doniesień zwracających szczególną uwagę na gwałtowne reakcje degradacji sewofluranu w kontakcie z przesuszonym pochłaniaczem CO₂ (Baralyme). Reakcje te generowały gwałtowny wzrost temperatury pochłaniacza, dochodzącej nawet do 400 °C, co skutkowało oparzeniami dróg oddechowych, rozwinięciem się zespołu ARDS pochodzenie chemicznego i termicznego, a także uszkodzeniem termicznym elementów pochłaniacza. Wymienionym procesom towarzyszyło również powstanie dużych ilości tlenku węgla prowadzących do zatrucia tym gazem [34].

Aceton

Aceton powstaje w organizmie w wyniku metabolizmu tlenowego wolnych kwasów tłuszczowych (FFA – free fatty acids). Jeżeli jego stężenie osiągnie 50 mg/l pojawiają się m.in. wymioty. W układzie okrężnym podczas MFA jego stężenie nie przekracza 40 ppm. Nie jest możliwe obniżenie się jego stężenia przez okresowe przepłukiwanie układu HFA. W związku tym MFA i LFA u pacjentów z niewyrównaną cukrzycą - nie są polecane. Dla obniżenia metabolizmu FFA polecany jest natomiast wlew 5% r. glukozy.

Metan

Metan jest produktem fermentacji wodorowęglanów w ustroju (przede wszystkim w okrężnicy). Występuje w układzie pokarmowym ludzi i zwierząt. Jest eliminowany przez płuca. W czasie MFA metodą zamkniętą - metan może ulegać kumulacji w układzie oddechowym do wartości od 11-1976 ppm. Jego obecność może wpływać na odczyt stężenia innych anestetyków halogenowych. Zjawisko to jest obser-

Tabela 7. Algorytm znieczulenia ogólnego anestetykami wziewnymi po indukcji dożylniej, tech. LFA i MFA

Indukcja dożylna							
Skład mieszaniny oddechowej							
	Tlen (l/min)	Powietrze (l/min)	Anestetyk wziewny (stężenie na ramieniu wydechowym) (MAC)	Tlen (l/min)	Podtlenek azotu (l/min)	Anestetyk wziewny (stężenie na ramieniu wydechowym) (MAC)	
Znieczulenie z małym przepływem świeżych gazów (LFA)	0,9	5	1 – 1,5	2	4	0,8 – 1,5	Faza nasycająca [FiO ₂ – min 0,35] około 6-10 minut
	0,5	1,5	1 – 1,5	0,9	1,5	0,8 – 1,5	Faza podtrzymująca [FiO ₂ – min 0,4]
Znieczulenie z minimalnym przepływem świeżych gazów (MFA)	Tlen (l/min)	Powietrze (l/min)	Anestetyk wziewny (stężenie na ramieniu wydechowym) (MAC)	Tlen (l/min)	Podtlenek azotu (l/min)	Anestetyk wziewny (stężenie na ramieniu wydechowym) (MAC)	
	0,9	5	1 – 1,5	2	4	0,8 – 1,5	Faza nasycająca [FiO ₂ – min 0,35] około: 15 minut
	0,3	0,2	1 – 1,5	0,3	0,2	0,8 – 1,5	Faza podtrzymująca [FiO ₂ – min 0,5]

Tabela 8. Algorytm znieczulenia ogólnego sewofluranem po indukcji wziewnej, tech. LFA i MFA

Indukcja Wziewna Sewofluranem (technika wzrastającego stężenia)							
– Natlenienie bierne przez min 3-5 min (szczelnie przyłożona maska twarzowa) – FGF: 8 l/min							
– Sewofluran: 0,3%/obj. 10-15 oddechów.							
– Sewofluran: 0,6%/obj. 10-15 oddechów.							
– Sewofluran: 1,2%/obj. 10-15 oddechów.							
– Sewofluran: 2,4%/obj. 10-15 oddechów.							
– Sewofluran: 3,6%/obj. 10-15 oddechów (zniknięcie – odruchu rzęsowego).							
– Sewofluran: 2,4%/obj. 10-15 oddechów (TOF/środki zwiotczające/intubacja).							
– Faza podtrzymująca.							
Skład mieszaniny oddechowej (faza nasycająca jest zbędna)							
	Tlen (l/min)	Powietrze (l/min)	Sewofluran (na parowniku) (%/obj.)	Tlen (l/min)	Podtlenek azotu (l/min)	Sewofluran (na parowniku) (%/obj.)	
Znieczulenie z małym przepływem świeżych gazów (LFA)	0,5	1,5	2 – 3,5	0,9	1,5	1,5 – 2,5	Faza podtrzymująca [FiO ₂ – min 0,4]
Znieczulenie z minimalnym przepływem świeżych gazów (MFA)	0,3	0,2	2 – 3,5	0,3	0,2	1,5 – 2,5	Faza podtrzymująca [FiO ₂ – min 0,5]

wowane, jeżeli analiza gazów oddechowych odbywa się w podczerwieni przy długości fali 3,3 µm (obecnie wykorzystuje się falę o długości 9-12 µm; tutaj metan nie powoduje nieprawidłowości odczytu stężenia). Może powodować błędne odczyty stężenia enfluranu i izofluranu. Dla „pozbycia się” metanu poleca się okresowe zwiększenie FGF.

Etanol

Jego obecność jest wysoce prawdopodobna w układzie okrężnym, u pacjentów znajdujących się pod wpływem alkoholu, znieczulanych LFA i MFA. Charakteryzuje się dużą rozpuszczalnością w wodzie i może ulegać gromadzeniu w układzie okrężnym. Dlatego w obawie o stan dróg oddechowych i możliwe interakcje nie poleca się LFA i MFA u pacjentów znaj-

dujących się pod wpływem alkoholu.

Procedury:

- Algorytm znieczulenia ogólnego w technice LFA i MFA po indukcji dożylniej (tabela 7).
- Algorytm znieczulenia ogólnego w technice LFA i MFA po indukcji wziewnej (tabela 8).

1. Zmiana stężenia anestetyków wziewnych w układzie oddechowym

Należy pamiętać, aby w sytuacjach nagłych wymagających pogłębienia, lub spłycenia znieczulenia:

- Ustawić parownik do żądanej wartości.
- Zwiększyć przepływ świeżych gazów (FGF) do 6 l/min (w proporcjach gazów używanych w fazie nasycającej).
- Po osiągnięciu nowej wartości (ok. 5 min) zmniejszyć FGF ponownie do wartości odpowiadającej LFA/MFA.
- Parownik należy ustawić do wartości o 0,5%/obj. wyższej (jeżeli zwiększano), lub o 1-2%/obj. niższej (jeżeli zmniejszano stężenie) od wartości wyjściowej.

Jeżeli nie ma znaczenia czas osiągnięcia nowego stężenia anestetyku, można zwiększyć, lub zmniejszyć jego wartość, pamiętając, że czas osiągnięcia nowego stężenia będzie bardzo długi dla anestetyków o wysokim współczynniku λ .

2. Faza wybudzenia

- FGF: 6-8 l/min (100% tlen)

Podsumowanie

Rozwój anestezjologii oraz postęp w dziedzinie urządzeń technicznych sprzyjają poprawie standardów opieki i bezpieczeństwa nad pacjentem w trakcie znieczulenia. Technika małych przepływów również do takiej poprawy się przyczynia. Decydując się na

znieczulenie z małym i minimalnym przepływem (LFA i MFA) powinno się mieć na względzie:

1. Dobro pacjenta. Znieczulenie z dużym przepływem (HFA) naraża pacjenta na oddychanie zimnymi i suchymi gazami oddechowymi. zamknięty obieg mieszaniny oddechowej zapewnia jej odpowiednie nawilżenie i temperaturę. Zapobiega to utracie ciepła, pozwala na utrzymanie prawidłowej temperatury ciała, a także zapobiega wystąpieniu pooperacyjnych drgawek [30].
2. Mniejsze zużycie anestetyków wziewnych, tlenu i powietrza, pozwala więc na znaczące zmniejszenie kosztów znieczulenia (aspekt ekonomiczny). Przy FGF 5 l/min aż 80% anestetyków jest „marnotrawione”. Zmniejszenie FGF z 3 – 1 l/min pozwala na 50% oszczędność anestetyku. W trakcie znieczulenia LFA przy FGF=1,5 l/min zużycie sewofluranu wynosi 19,7-22,0 ml/MAC/godz. [31,32].
3. Mniejsze zanieczyszczenie środowiska sali operacyjnej, co nie pozostaje bez wpływu na pracujący tam personel medyczny (aspekt zdrowotny).
4. Mniejszą eliminację podtlenku azotu i anestetyków do atmosfery. Podtlenek azotu odpowiedzialny w 10% za efekt cieplarniany [33].
5. Doniesienia ostatnich lat dotyczące ciężkiego zatrucia tlenkiem węgla, poparzenia dróg oddechowych, będących następstwem gwałtownych reakcji degradacji sewofluranu w kontakcie z przesuszonym pochłaniaczem [34].

Adres do korespondencji:

Waldemar Machała

Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii

Uniwersytet Medyczny w Łodzi

Uniwersytecki Szpital Kliniczny

im. Wojskowej Akademii Medycznej-CSW

90-549 Łódź; ul. Żeromskiego 113

Tel.: (+48 42) 63 93 501

E-mail: waldemar@machala.info

Piśmiennictwo

1. Rolly G. Low Flow Anaesthesia- Past, Present and Future. Association Low flow Anaesthesia, 4th Meeting, York 1999
2. Stenqvist O. Low Flow Anesthesia. Clinical Window, Review Articles 2001.
3. Lajunen M. Technology Brief of Low Flow Anesthesia. Clinical Window, Educational Support 2001.
4. Lajunen M. Some Factors Affecting Low Flow Delivery. Clinical Window, Educational Support, 2001.

5. Rolly G. Advantages of Low-flow Anaesthesia (LFA). Foreign Gas Accumulation. Contraindications. Association Low Flow Anaesthesia, 6th Meeting, Pisa 2002.
6. Brody S. Bioenergetics and Growth. New York: Reinhold; 1945.
7. Severinghaus JW. The rate of uptake of nitrous oxide in man. *J Clin Invest* 1954;33:1183-9.
8. Lowe HJ, Ernst EA. The Quantitative Practice of Anesthesia. Baltimore: Williams and Wilkins; 1981.
9. Henriksson BA, Sundling J, Hellman A. The effect of a heat and moisture exchanger on humidity in a low-flow anaesthesia system. *Anaesthesia* 1977;52:144-9.
10. Morio M, Fujii K, Satoh N, Imai M, Kawakami U, Mizuno T, et al. Reaction of sevoflurane and its degradation products with soda lime: toxicity of the byproducts. *Anesthesiology* 1992;77:1155-64.
11. Mazze RI. The safety of sevoflurane in humans. *Anesthesiology* 1992;77:1062-3.
12. Gonsowski CT, Laster MJ, Eger El II, Ferrell LD, Kerschmann RL. Toxicity of compound A in rats: effect of a 3-hour administration. *Anesthesiology* 1994;80:556-65.
13. Fukiura K, Ikeda K. Effects of prolonged sevoflurane anesthesia on the renal tubule: comparison with enflurane. *Anesthesiology* 1992;77:A 386.
14. Conzen PF, Kharasch ED, Czerner SF, Artru AA, Reichle FM, Michalowski P, et al. Low Flow Sevoflurane Compared with Low Flow Isoflurane Anaesthesia in Patients with Stable Renal Insufficiency. *Anesthesiology* 2002;97:578-84.
15. Kharasch ED, Frink EJ Jr, Artru A, Michalowski P, Rooke GA, Nogami W. Long-duration low-flow sevoflurane and isoflurane effects on postoperative renal and hepatic function. *Anesth Analg* 2001;93:1511-20.
16. Di Filippo A, Marini F, Pacenti M, Dugheri S, Focardi L, Novelli GP. Sevoflurane low-flow anaesthesia: Best Strategy to Reduce Compound A Concentration. *Acta Anaesthesiol Scand* 2002;46:1017-20.
17. Gentz BA, Malan Jr TP. Renal toxicity with sevoflurane: A storm in a teacup? *Drugs* 2001;61:2155-62.
18. Obata R, Mirowaki G, Bito H. The effects of prolong low-flow sevoflurane anesthesia on renal function: comparison with high flow sevoflurane anesthesia. *Anesthesiology*;1998;89(3A):A 138.
19. Goeters C, Reihardt C, Gronau E, Wüsten R, Prien T, Baum J, et al. Minimal flow sevoflurane and isoflurane anaesthesia and impact on renal function. *Eur J Anaesthesiol* 2001;18:43-50.
20. Luttrupp HH, Johansson A. Soda lime temperatures during low-flow sevoflurane anaesthesia and differences in dead-space. *Acta Anaesthesiol Scand* 2002;45:500-5.
21. Osawa M, Shinomura T. Compound A concentration is decreased by cooling anaesthetic circuit during low-flow sevoflurane anaesthesia. *Can J Anaesth* 1998;45:1215-8.
22. Yamakage M, Kimura A, Chen X, Tsujiguchi N, Kamada Y, Namiki A. Production of compound A under low-flow anesthesia is affected by type of anesthetic machine. *Can J Anaesth* 2001;48:435-8.
23. Higuchi HY, Wada HY, Usui YY, Goto K, Kanno M, Satoh T. Effects of Probenecid on Renal Function in Surgical Patients Anesthetized with Low-flow Sevoflurane. *Anesthesiology* 2001;94:21-31.
24. Funk W, Gruber M, Jakob W, Hobbhahn J. Compound A does not accumulate during closed circuit sevoflurane anaesthesia with the Physioflex. *Br J Anaesth* 1999;83:571-5.
25. Bito H, Ikeuchi Y, Ikeda K. Effects of water content of soda lime on compound A concentration in the anesthesia circuit in sevoflurane anaesthesia. *Anesthesiology* 1998;88:66-71.
26. Baxter PJ, Garton K, Kharasch ED. Mechanistic Aspect of Carbon Monoxide Formation from Volatile Anesthetics. *Anesthesiology* 1998;89:929-41.
27. Knolle E, Heinze G, Gilly H. Small carbon monoxide formation in absorbents does not correlate with small dioxide absorption. *Anesth Analg* 2002;95:650-5.
28. Kharasch ED, Powers KM, Artru AA. Comparison of Amsorb (R), Sodalime, and Baralyme (R) degradation of volatile anesthetics and formation of carbon monoxide and compound A in swine in vivo. *Anesthesiology* 2002;96:173-82.
29. Funk W, Roth G, Gruber M. Carbon-monoxide hemoglobin during inhalation anaesthesia - A new problem? *Anaesthesiologie und Intensivmedizin* 1999;40:195-200.
30. Bengtson JP, Bengtson A, Stenqvist O. The circle system as a humidifier. *Br J Anaesth* 1989;63:453-7.
31. Enlund M, Lambert H, Wiklund L. The Sevoflurane Saving Capacity of a New Anaesthetic Agent Conserving Device Compared with a Low Flow Circle System. *Acta Anaesthesiol Scand* 2002;46:506-11.
32. Suttner S, Boldt J. Low-flow anaesthesia: Does it have potential pharmacoeconomic consequences? *Pharmacoeconomics* 2000;17:585-90.
33. Kole TE. Environmental and occupational hazards of the anesthesia workplace. *AANA J*;1990;58:327-31.
34. Fatheree RS, Leighton BL. Acute Respiratory Distress Syndrome after an Exothermic Baralyme Sevoflurane Reaction. *Anesthesiology* 2004;101:531-3.