

616—089.5—031.81:612.216.2

ALVEOLÁRNÍ VENTILACE PŘI CELKOVÉ ANESTÉZII**I. Metodická část**

E. RATHOVÁ, A. UHLÍŘOVÁ, A. LOCHOVSKÁ, J. HORÁK, J. POKORNÝ

Sportovně lékařské oddělení ÚVN, Praha (náčelník plk. MUDr. Jaromír Horák, CSc.)

Anesteziologické a resuscitační oddělení ÚVN, Praha

(náčelník plk. doc. MUDr. Jiří Pokorný, CSc.)

Zavedení svalových relaxancií do anesteziologické klinické praxe Griffithem v roce 1942 je významným mezníkem z více příčin. Především se snižuje výrazně potřeba inhalačních anestetik, jejichž vyšší koncentrace, dříve nezbytná pro dosažení přijatelných operačních podmínek, je vždy pro organismus toxická. Druhou předností je naprostý klid operačního pole a zpravidla velmi dobrá vegetativní stabilizace operovaného i při povrchní anestézii. Tuto výhodu přibližně před 10 lety využil Cecil Gray a vypracoval dodnes velmi oblíbenou techniku celkového znecitlivění vedeného směsí kyslíku dusného s kyslíkem při podání apnoické dávky myorelaxačního prostředku a při umělé hyperventilaci plic.

Jedním z nejzávažnějších důsledků používání myorelaxancií z hlediska patofyziologie dýchání je dočasné oslabení, eventuálně úplné vyřazení dýchací funkce. Anesteziolog při uměle a záměrně vyvolané apnoei je povinen kompenzovat co nejdokonaleji vyřazené dýchání. Proto anesteziologové studují velmi podrobně otázky umělého a podpůrného dýchání a proto zdůrazňují vysokou odpovědnost za jeho správné provádění (1). Písemnictví k této problematice je velmi bohaté a stále narůstá. Přes značné vynaložení úsilí však není jednoznačně vyřešena základní otázka: zda během celkové anestézie je pro nemocného výhodnější při umělém dýchání spíše normoventilace plic než hyperventilace, a dále, jaká je nejvhodnější frekvence a amplituda umělých dechů pro většinu dospělých nemocných. Vlivem Grayovy školy řada anesteziologů provádí

dí umělé dýchání vysokými frekvencemi okolo 45—60/min. při dechových objemech okolo 500. Při nezbytnosti dodržet minimální časový poměr mezi délkou vdechu a délkou výdechu na hodnotě 1:1,5 až 1:2,0 zkracuje se nutně délka umělého vdechu na desetiny vteřiny. Naproti tomu mnozí anesteziologové považují za podstatně lepší dodržovat při umělém dýchání frekvence blízké normálním poměrům (12 až 16 za minutu) a dechové objemy větší okolo 750 i více ml. (1,2). Watsonova práce prokazuje příznivý vliv delšího trvání vdechového přetlaku na distribuci dýchací směsi v plicích a tím i na poměr mezi ventilací mrtvého prostoru a alveolární ventilací (3). Watsonova studie, citovaná ve Spaldingově a Cramptonově-Smithově monografii, se opírá pouze o 6 vyšetření na zdravých osobách. Watson doporučuje za optimální délku umělého vdechu 1,4 vt. Při dodržení správné délky výdechu a výdechové pauzy nedochází k nepříznivému ovlivnění krevního oběhu (3).

Denní užívání myorelaxancií a zavádění dýchacích automatů různé konstrukce do provozu před nás postavila otázku efektivnosti umělého dýchání. Rozhodli jsme se zahájit výzkumnou práci, která by porovnávala výkonnost dýchání během anestézie za různých podmínek a která by umožnila stanovit pro rozličné typy dýchacích přístrojů nejvhodnější pracovní parametry. Za rozhodující ukazatel jsme zvolili alveolární ventilaci, na níž především závisí výměna dýchacích plynů v plicích a jejich přenos alveolokapilární membránou.

Metodika

Alveolární ventilace byla sledována v klidu a při zátěži o 700 kpm za minutu, na bicyklovém ergometru fy ELEMA po dobu 6 minut. V posledních 2 minutách jsme zachycovali vydýchaný vzduch do vaků, během celých 6 minut jsme z náustku odebírali vzorek vydýchaného vzduchu ke stanovení koncentrace kyslíčnicku uhlíčitého na konci výdechu pomocí infračerveného analyzátoru URAS (fy Hartmann & Braun). Změny byly zapisovány na uzpůsobeném omnia-skriptoru fy Godart, čímž jsme zaznamenali změny koncentrace kyslíčnicku uhlíčitého během každého dechu. Minutová ventilace byla stanovena měřením vdechovaného vzduchu pomocí suchého plynoměru (fa Chirana, St. Turá). K určení parciální tenze CO_2 v arteriální krvi jsme odebírali vzorek krve z hyperemizovaného ušního lalůčku, analýza byla provedena Astrupovou mikrometodou [8,9]. Koncentraci CO_2 ve vaku jsme stanovili jednak rychlým analyzátozem CO_2 URAS (fy Hartmann & Braun) a jednak

analyzátozem Spirolyt II (Junkalor), na kterém jsme prováděli též analýzu O_2 . Oba přístroje jsme opakovaně cejchovali plynovým analyzátozem mikro-Scholanderovým (fy Eschweiler) [11].

K nepřímému určení arteriální tenze CO_2 jsme použili pro zjištění alveolární ventilace též metody zpětného vdechování směsi (rebreathing), která má obsah CO_2 vyšší, než je předpokládaná koncentrace CO_2 ve smíšené venózní krvi (směs si sám vyšetřovaný nadýchal do vaku). Po zpětném vdechování po dobu nejvýše 20 vt. jsme provedli analýzu vzorku z vaku a tu jsme brali jako reprezentativní pro hodnotu CO_2 ve smíšené venózní krvi. Podle literárních údajů odečtením 6 torrů (což má být průměrná arterio-venózní difference parciální tenze CO_2) dostáváme hodnotu Pa CO_2 [4].

Pro získání orientačních fyziologických hodnot u zdravých lidí jsme stanovili alveolární ventilaci výše popsaným postupem u souboru 7 osob, jejichž charakteristiku uvádí tab. 1.

Tabulka 1

Charakteristika sledovaného souboru

Č	Pohlaví	Věk	Výška	Váha	VC BTPS	% n. h. VC	MMV BTPS	% n. h. MMV	FEV 1BTPS	% n. h. FEV ₁	FEV %
1	muž	20	183	73	6,8	157,9	95,6	100,2	5,38	145,9	78,5
2	muž	21	173	72	5,6	136,7	125,6	139,3	4,83	138,9	86,4
3	muž	21	173	68	5,1	127,9	113,4	129,9	4,54	134,5	89,3
4	muž	20	162	66	5,02	133,5	86,5	104,6	3,87	121,2	77,1
5	muž	22	172	75	5,57	130,4	105,7	112,4	4,91	127,8	88,2
6	muž	20	186	79	5,73	125,9	83	82,8	5,18	126,5	90,3
7	muž	21	176	65	5,0	127,9	89,4	103,9	4,34	130,8	86,9
$\bar{x}$		20,71	175,0	71,14	5,54	134,3	99,9	110,4	4,72	132,2	85,24

Výsledky

Porovnání metodik výpočtu alveolární ventilace v klidu a při práci vypočtené z množství vydýchaného kyslíčnicku uhlíčitého za minutu

Tabulka 2

Alveolární ventilace v klidu a při práci

	metoda	1/min *j	r	p
$\dot{V}_A$ v klidu n = 7	„krvavá“	6,0 ± 1,35	0,9733	<0,001
	„nekrvavá“	5,8 ± 1,46		
$\dot{V}_A$ při práci n = 7	„krvavá“	25,6 ± 5,3	0,9678	<0,001
	„nekrvavá“	25,9 ± 5,7		

*j) aritmetický průměr ± σ
n počet vyšetřovaných osob
r korelační koeficient

(tzv. nekrvavá metoda) s metodou užívající stanovení parciální tenze CO_2 v arteriální krvi (tzv. krvavá metoda), je uvedeno na tab. 2. Byly zjištěny těsné vysoce signifikantní vztahy obou metod v klidu i při zátěži ($r = 0,9733$, $p < 0,001$; $r = 0,9678$, $p < 0,001$).

Tabulka 3

Porovnání výsledků alveolární ventilace stanovené „nekrvavými“ postupy

$\dot{V}_A$	1/min *j	r	p
„rebreathing“ n = 16	9,31 ± 5,1	0,978	<0,001
„end tidal“ n = 16	8,78 ± 4,5	0,978	<0,001

*j) aritmetický průměr ± σ
n počet vyšetřovaných osob

Tabulka 4

	n	klid *)	námaha *) $\bar{x} \pm \sigma$	t test	p
$\dot{V}$ 1/min	7	9,83 $\pm$ 1,42	33,09 $\pm$ 5,94	8,58	p < 0,001
V_T 1	7	0,651 $\pm$ 0,103	1,52 $\pm$ 0,254	8,11	p < 0,001
$\dot{V}_A$ 1/min	7	5,79 $\pm$ 1,28	25,61 $\pm$ 5,49	7,76	p < 0,001
$\dot{V}_A/m^2$ 1/min	7	3,16 $\pm$ 0,50	13,04 $\pm$ 2,88	7,61	p < 0,001
V_A 1	7	0,405 $\pm$ 0,125	1,18 $\pm$ 0,233	6,09	p < 0,001
$\dot{V}_D$ 1/min	7	3,92 $\pm$ 0,466	7,48 $\pm$ 1,35	6,95	p < 0,001
vak % CO ₂	7	3,2 $\pm$ 0,67	4,74 $\pm$ 0,68	6,25	p < 0,001
$\dot{V}_{O_2}$ 1/min	6	0,27 $\pm$ 0,04	1,39 $\pm$ 0,13	17,50	p < 0,001
$V_{E O_2}$ 1	6	3,43 $\pm$ 0,21	2,50 $\pm$ 0,213	9,52	p < 0,001
f	7	15,00 $\pm$ 2,33	22,00 $\pm$ 4,46	5,58	p < 0,01
V_D 1	7	0,263 $\pm$ 0,016	0,374 $\pm$ 0,06	4,35	p < 0,01
end tidal % CO ₂	7	5,54 $\pm$ 0,33	6,3 $\pm$ 0,35	5,64	p < 0,01
pH	7	7,42 $\pm$ 0,037	7,35 $\pm$ 0,39	5,93	p < 0,01
R	6	0,86 $\pm$ 0,04	0,96 $\pm$ 0,02	5,59	p < 0,01
P_a CO ₂ mm Hg	6	37,10 $\pm$ 0,43	39,9 $\pm$ 3,92	1,64	p > 0,05

Vliv námahy 4200 kpm na ventilační ukazatele

*) aritmetické průměry $\pm \sigma$
n počet vyšetřených

Srovnání výsledků alveolární ventilace metodou zpětného vdechování (rebreathing) s metodou založenou na sledování koncentrace CO₂ na konci výdechu (end tidal) je na tabulce 3. Opět vidíme těsné signifikantní vztahy obou metod ($r = 0,978$, $p < 0,001$).

Vliv námahy na některé ventilační ukazatele jsme shrnuli do tab.4. Po námaze 700 kpm/min. došlo k vysoce signifikantním změnám ve všech sledovaných ukazatelích s výjimkou nesignifikantního zvýšení P_aCO_2 . Efektivita ventilace (V_D/V_T) v klidu byla 0,42, po námaze stoupla — pokles indexu na 0,25.

Rozprava

Pro výpočet alveolární ventilace jsme vycházeli ze známé úvahy, že množství vydýchaného CO₂ v určité časové jednotce se rovná množství CO₂ ve stejném čase vydaného do alveolárního

prostoru. Předpokládá se ovšem správný poměr ventilace k perfúzi plic. Matematické vyjádření shora uvedené úvahy je:

$$F_{A CO_2} \times \dot{V}_A = \dot{V}_{CO_2} \quad 1.$$

$$\dot{V}_A = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{F_{A CO_2}} \quad 1a.$$

Pro výpočet alveolární ventilace z hodnot parciální tenze CO₂ naměřené Astrupovým přístrojem jsme užili rovnici podle Daltonova zákona parciální tenze plynů, kde platí:

$$\frac{\dot{V}_{\text{CO}_2}}{\dot{V}_A} = \frac{P_A \text{CO}_2}{P_A}$$

tedy:

$$\frac{\dot{V}_{\text{CO}_2}}{\dot{V}_A} \times 100 = \frac{P_A \text{CO}_2}{P_A} \times 100$$

Řešením rovnic 1. a 2. získáme vztah:

$$F_{A \text{CO}_2} = \frac{P_A \text{CO}_2}{P_A} \times 100$$

Pro alveolární tlak P platí:

$$P_A = P_B - T_{\text{H}_2\text{O } 37^\circ\text{C}}$$

$$P_A = 760 - 47 = 713$$

takže

$$F_{A \text{CO}_2} = \frac{P_A \text{CO}_2}{713} \times 100$$

Dosazením do rovnice 1. dostaneme:

$$\dot{V}_{A \text{ BTPS}} = \frac{\dot{V}_{\text{CO}_2} \times \text{STPD} \times 1,21}{P_{A \text{CO}_2}} \times 713$$

$$\dot{V}_{A \text{ BTPS}} = \frac{V_{\text{CO}_2 \text{ STPD}}}{P_{A \text{CO}_2}} \times 863$$

Faktor 1,21 je koeficientem pro převod z STPD na BTPS (výpočet pro převod z 0°C a 760 torrů na 37°C — tenze pro aktuální teplotu 0°C a P 760 torrů (4,5).

$$\text{Koeficient BTPS} = \frac{P_B - P_{\text{H}_2\text{O akt.}}}{P_B - 47} \times$$

$$\times \frac{273 + 0}{273 + 37} = \frac{760}{713} \times \frac{310}{273} = 1,21$$

Obsah CO_2 v arteriální krvi závisí na alveolární ventilaci a na vazebné kapacitě krve. Prvé může být určeno zjištěním obsahu CO_2 ve vzduchu opouštějícím alveoly. Vzhledem k velké difúzibilitě CO_2 je možné předpokládat, že dochází k vyrovnání koncentrace CO_2 na úrovni alveokapilární membrány. Malý tlakový gradient se považuje za fyziologický (6). Jeho vzestup nad tuto hranici je nutno posuzovat opatrně, poněvadž příčinou nemusí být jen patologický proces, může být ovlivněn i nepoměrem mezi ventilací a perfúzí, k čemuž může dojít při celkové anestézii (při hyperventilaci). V těchto případech není vyloučena určitá nepřesnost ve stanovení složení alveolárního plynu pomocí analýzy vzorku z konce výdechu. Proto jsme po prověření 3 postupů měření alveolární ventilace vybrali pro další zjišťování u lidí během anestézie dvě metody, a to „krvavou metodu“ a metodu založenou na stanovení koncentrace CO_2 na konci výdechu.

Námaha (700 kpm/min.) ovlivnila sledované ventilační ukazatele výrazně a statisticky vysoce signifikantně s výjimkou malého nesignifikantního zvýšení PaCO_2 . Efektivnost ventilace se podle poměru V_D/V_T zlepšuje: klidová hodnota je v průměru 0,42 a hodnota po námaze klesá na 0,25. Naše výsledky klidového poměru V_D/V_T jsou poněkud vyšší než hodnoty udávané v literatuře (5, 10). Comroe udává hodnoty při klidu $V_D:V_T$ do 0,3.

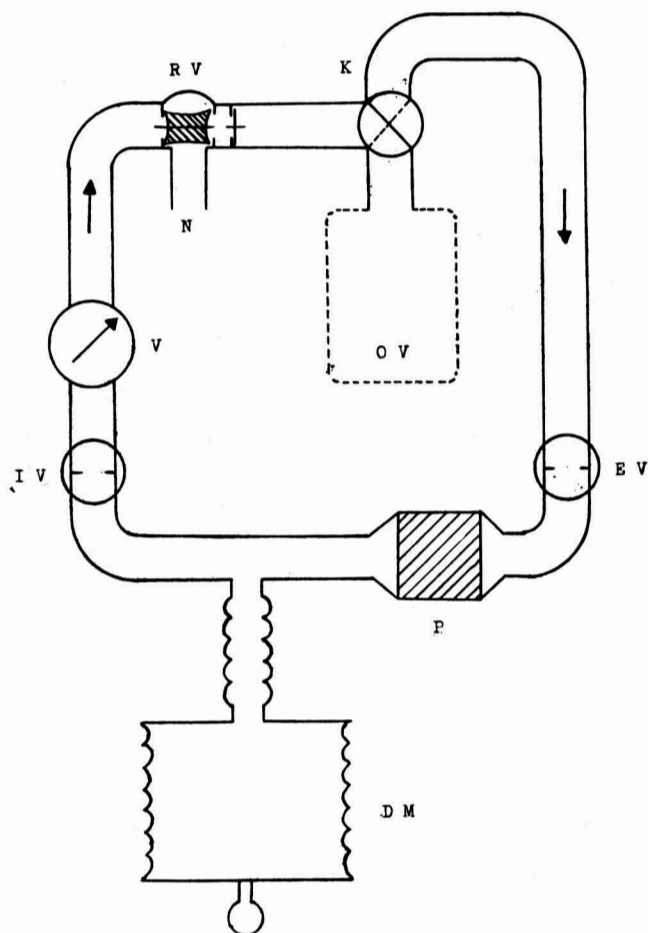
Uvažujeme-li o obou fyziologických hodnotách tvořících index $V_D:V_T$, pak je klidový dechový volum v průměru udáván 500 ml (5) a pro mrtvý prostor jsou udávány hodnoty 150 až 260 ml (7, 10) v závislosti na objemu vzduchu v dýchacích cestách při dýchání. Diference mohou být dány tím, že Comroe bere za základ mrtvého prostoru pouze 150 ml.

Metodika odběru vzorků dýchací směsi při anestézii

Abychom mohli při celkové anestézii odebrat kvalitativní a kvantitativní vzorky vydechované směsi plynů co nejbližší dýchacích cest nemocného, bylo třeba provést na konvenčním dýchacím okruhu narkotizačního přístroje Chirana N-5, se kterým jsme pracovali, některé úpravy. Na místo vidlice masky jsme vřadili přímo na endotracheální rourku Rubenův ventil proti zpětnému vdechování a odstranili membrány z obou dýchacích ventilů při ventilové komoře. Na výdechové rameno Rubenova ventilu jsme připojili dvojcestný kohout, jehož ramena mají stejný průměr jako vřapové hadice dýchacího okruhu. Kohout — podle zapojení — umožňuje buď přechod výdechového objemu okruhem do pohlčovače kyslíčnicku uhlíčitého a dále do dýchacího měchu a vdechového ramene okruhu,

nebo je výdechový objem odváděn kvantitativně do odběrového vaku (schéma 1).

Z písemnictví i ze zkušenosti je nám známo, že Rubenův ventil I. typu, který máme k dispozici, dovoluje při přetlaku ve vdechovém rameni zpětné vdechování. Abychom tomu zabránili, vřadili jsme na místo dýchacího vaku okruhu dýchací měch o obsahu 2 l, kterým lze snadno na začátku výdechu vytvořit ve vdechovém rameni podtlak. Změna tlaku umožní okamžité a úplné uzavření vdechového ramene okruhu a napomáhá správné funkci Rubenova ventilu. Popsané uspořádání umožňuje odběry dýchací směsi jak při spontánním, tak i při umělém dýchání. Na vdechovém rameni dýchacího okruhu je umístěn ventilometr, umožňující nejen přesné měření objemu jednotlivých dechů, ale též celkový objem plynů odvedených za jednotku času do odběrového vaku. Podmínkou správnosti měření je náležitá těsnost spojů dýchacího okruhu.



Legenda ke schématu 1

- RV — Rubenův ventil
- N — nemocný
- K — dvoucestný kohout
- OV — odběrný vak
- EV — výdechový ventil okruhu bez membrány
- P — pohlcovač kyslíčnicku uhlíčitého
- DM — dýchací měch
- IV — vdechový ventil okruhu bez membrány
- V — ventilometr

Vzorky plynů ke stanovení koncentrace alveolárního CO₂ jsme odebírali z endotracheální rourky silnější transfúzní jehlou.

Při naší studii používáme k vedení celkové anestézie směsi kysličníku dusného s kyslíkem v poměru 2:1. Základní příkon plynů do polozavřeného dýchacího okruhu je 3 l kysličníku dusného a 1,5 l kyslíku za minutu. Protože při odběru vzorků vydechované směsi do odběrového vaku je dočasně přerušeno zpětné vdechování do dýchacího měchu, je třeba pro udržení potřebných dechových objemů zvýšit příkon směsi kysličníku dusného a kyslíku přibližně na dvojnásobek při zachování stejného vzájemného poměru obou plynů.

Závěr

Bylo provedeno porovnání 3 postupů stanovení alveolární ventilace.

1. z koncentrace CO₂ na konci výdechu,
2. z parciálního tlaku CO₂ v arteriální krvi,
3. z koncentrace CO₂ při zpětném vdechování.

Byly zjištěny vysoce signifikantní vztahy mezi postupy 1 a 2 v klidu ($r=0,9733$, $p<0,001$) a při námaze ($r=0,9678$, $p<0,001$) u souboru 7 zdravých mužů a postupy 1 a 3 v klidu ($r=0,978$, $p<0,001$) u souboru 14 mužů.

Dále byl sledován vliv zátěže (700 kpm/min.) aplikované 6 minut na jednotlivé ventilační ukazatele (soubor 7 mužů). Došlo k jejich signifikantnímu zvýšení s výjimkou nesignifikantní změny PaCO₂.

Byla provedena a klinicky i laboratorně ověřena úprava dýchacího okruhu narkotizačního přístroje Chirana N-5, aby bylo možno získávat reprezentativní vzorky vydechované směsi nezbytné pro měření změn alveolární ventilace za různých podmínek při celkové anestézii.

Literatura

1. Barth, L., Meyer, M.: Moderne Narkose II. VEB. G. Jena, Fischer Verlag 1965.
2. Bendixen, H. H., Laver, M. B.: Hypoxia in anesthesia. Clin. Pharm. Therap., 1965, 6:510.
3. Spalding, J. M. K., Crampton, Smith, A.: Clinical practice and physiology of artificial respiration. Blackwell, Scientific publications, Oxford, 1963.
4. Navrátil, M., Kadlec, K., Daum, S.: Patofysiologie dýchání, Praha, SZN 1966.
5. Comroe, J. H.: The lung, clinical physiology and pulmonary function test. Second edition, 1966.
6. Fenn, W. O., Rahn, H.: Handbook of physiology, Section 3, Respiration, Vol. II. Washington, Amer. physiological Society, 1965.
7. Rossier, P. H., Bühlmann, A.: Physiologie und pathophysiologie der Atmung. Berlin, Springer Verlag 1958.
8. Stiksa, J., Daum, S.: Mikrometody v diagnostice respirační insuficience. Čas. lék. čs. 106, 1967, 497.
9. Pace, W. R.: Pulmonary physiology in clinical practice 1965. F. A. Davis, Comp.
10. Štůrová, A.: Funkční mrtvý prostor za některých zvláštních stavů. Čas. lék. čs., 106, 1967, 671.
11. Boudík, F., Ouředník, A., Štěpánek, J.: Přínos nových metod (respirace), Čas. lék. čs., 106, 1967, 495.