

Volumetrická kapnografia

MUDr. Peter Čandík, PhD., MPH¹, MUDr. Dušan Rybár¹, MUDr. Martin Nosál¹, MUDr. Stanislav Saladiak¹, MUDr. Štefan Imrecze¹, MUDr. Janka Beňová¹, MUDr. Katarína Galková, PhD.², MUDr. Monika Paulíková³

¹KAIM VÚSCH a. s. a UPJŠ LF, Košice

²Katedra klinických disciplín a urgentnej medicíny UKF, Nitra

³OAIM VOÚ, Košice

Autori v článku rozoberajú základné atribúty volumetrickej kapnografie (VCap), jej biofyzikálne princípy a spôsoby monitorovania počas umelej ventilácie pľúc. Objasňujú základné princípy merania podľa Bohra a podľa Enghoffa, ako aj ich význam pre hodnotenie meraných parametrov. V ďalšom texte vysvetľujú princípy merania jednotlivých pľúcnych objemov a ich pomerov ako napr. VD_{aw}/VT , VD_f/VT . Objasňujú aj základný klinický význam monitorovania pľúcnych objemov z hľadiska patofyziologického i klinického. Záverom uvádzajú súhrnné možnosti a potenciálne benefity monitorovania pomocou volumetrickej kapnografie a význam nielen pre diagnostiku výmeny plynov v pľúcach, ale aj pre diagnostiku porúch obehového systému. Podrobnejšie sa venujú významu VCap pre nastavovanie parametrov UVP. Záverom konštatujú globálny význam pre zavedenie VCap do klinickej praxe.

Kľúčové slová: kapnografia, volumetrická kapnografia

Volumetric capnography

Authors in this article discuss basic attributes of volumetric capnography (Vcap), its biophysical principles and monitoring during controlled ventilation. They elucidate basic principles of measurement according to Bohr and Enghoff and its significance. Authors also explain principles of measurement of single lung volumes and their ratios such as VD_{aw}/VT , VD_f/VT etc., their importance from pathophysiological and clinical point of view. Potential benefits of monitoring by volumetric capnography and its significance for not only monitoring of gas exchange in lungs, but also circulation disorders are also discussed. Authors showed the importance of Vcap for controlled ventilation settings. To conclude authors state the global importance of Vcap introduction into the clinical practice.

Key words: capnography, volumetric capnography

Anestéziol. intenzívna med., 2018;7(1):6-9

Úvod

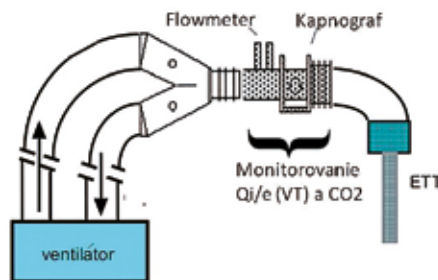
Volumetrická kapnografia (VCap) predstavuje meranie kinetiky oxidu uhličitého (CO_2) v jednotlivom expírii (dychu). Objemová analýza kapnogramu obsahuje rozsiahle fyziologické informácie o metabolickej produkcii, doprave, eliminácii CO_2 a čiastočne cirkulácii, ako aj o jednotlivých, v čase sa meniacich pľúcnych objemoch (1, 2). VCap je najlepší nástroj pre klinické meranie mŕtvych priestorov, a to mŕtveho priestoru dýchacích ciest (VD_{aw}) a funkčného mŕtveho priestoru (VD_f), umožňujúce podrobnú analýzu funkčných prvkov každého dychového objemu (VT). Vytvára užitočné informácie o účinnosti výmeny plynov v pľúcach, ako aj o stave samotných pľúc, pľúcnej perfúzií a nepriamo o výkonnosti obehu a nastavení parametrov ventilátora. Môže usmerniť lekára pri odhalení nehomogenity distribúcie plynov v pľúcach. Pomáha pri diagnostike chronickej obštrukčnej choroby pľúc (COPD), ARDS, embólii do pľúc a pod. Pomáha pri optimalizácii nastavenia

ventilátora. Ide o pomerne jednoduchú a lacnú metódu monitorovania (3, 4).

Nedávne pokroky vo VCap a lepšie pochopenie jej klinických dôsledkov môže pomôcť pri prekoneaní známych obmedzení pri hodnotení kinetiky CO_2 a mŕtveho priestoru. Analýza je možná pri bežnom monitorovaní pri posteli. Odporúča sa začať používať tento mocný monitorovací nástroj na podporu rozhodovania a monitorovanie ventilácie v prostredí intenzívnej medicíny (4, 5).

Základnými prvkami na monitorovanie VCap je v prvom rade umiestnenie snímačov prietoku (Q), tlaku (P) a kapno-

Obrázok 1. Schematické znázornenie pripojenia prietokomeru a main-stream kapnometra (snímača) do dýchacieho okruhu na meranie Vcap



metra (Cap), zvyčajne mainstream systému. Umiestňujú sa v striedavom prietoku plynov pri „ústach“ pacienta, keď simultánne meráme prietoky plynov (Q), resp. ich objemy (V) a hodnoty CO_2 v reálnom čase (obrázok 1) (1).

VCap predstavuje v podstate analýzu CO_2 a priebehu prietoku (objemu) jedného dychu (expíria VT), pričom výsledky reprezentujú kinetiku eliminácie CO_2 v exspirovanom dychovom objeme a z nej vyplývajúcu volumetrickú analýzu jednotlivých funkčných objemov dýchacích ciest a pľúc (1, 2).

V ďalšom texte sa nebudeme zaoberať vyhodnocovaním samotnej kapnografickej krivky v klasickom ponímaní, ale výhradne základnými teoretickými zdôvodneniami a využitím volumetrickej kapnografie.

Typický priebeh expiračného prietoku plynov a koncentrácie CO_2 v jednotlivých fázach expíria je na obrázku 2. Krivka má 3 fázy (obrázok 3). Prvá fázu (I) predstavuje vydychovaný plyn z anatomického mŕtveho priestoru, ktorý CO_2 prakticky neobsahuje (prevažný objem plynu je z dýchacích ciest, t. j. konduk-

tívnej zóny bronchiálneho stromu). Tento objem počítame k ventilácii anatomického mŕtveho priestoru (VDaw). Fáza I neobsahuje CO₂ (obrázok 4).

Druhá fáza (II) už obsahuje určité množstvo CO₂, čiastočne z hlbších dýchacích ciest (konduktívnych), ale hlavne už zo začiatku respiračnej zóny, t. j. z bronchiolov 18 – 22 rádu. Túto fázu počítame už k dychovému objemu, teda alveolárnej ventilácii (VTalv) (obrázok 5).

Tretia fáza (III) obsahuje CO₂ a predstavuje ventiláciu alveolárneho priestoru, teda vydychnutý objem v III. fáze je čistá alveolárna ventilácia (VTalv) (obrázok 6).

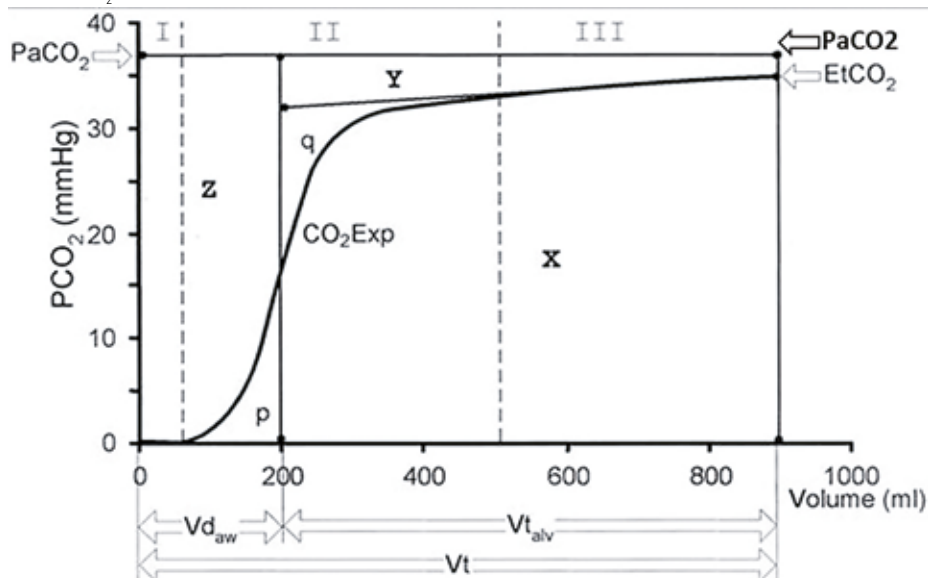
Teda fáza (I) predstavuje ventiláciu, resp. objem dýchacích ciest (VTaw), fázy (II a III) objem alveolárnej ventilácie (VTalv).

Sumárny objem fáz (I, II a III) je dychový objem VT.

Mŕtvy priestor

VDaw predstavuje neefektívnu časť ventilácie, teda časť dychového objemu, ktorá neparticipuje na výmene plynov medzi alveolami a krvou v pľúcnych kapilárach. Táto neefektívnosť výmeny

Obrázok 2. Schematické znázornenie jednotlivých expirovaných objemov a koncentrácie vydychovaného CO₂



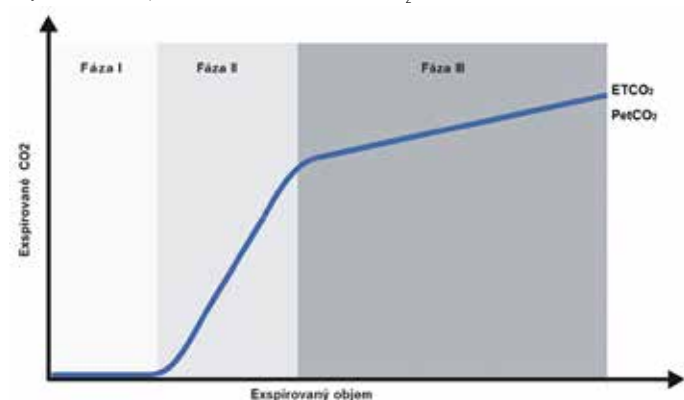
Vysvetlivky: PCO₂ – parciálny tlak CO₂ vo vydychovanom plyne, PaCO₂ – parciálny tlak CO₂ v artérii, EtCO₂ – end tidal CO₂ – koncová-expiračná koncentrácia CO₂, VDaw – anatomický mŕtvy priestor, VTalv – alveolárny dychový objem, VT – dychový objem

plynov je spôsobená tým, že časť plynu, ktorý sa v inšpirii dostáva na jeho konci do dýchacích ciest nie je v priestore, v ktorom by mohlo dôjsť k výmene plynov – alveolárny kompartment (I).

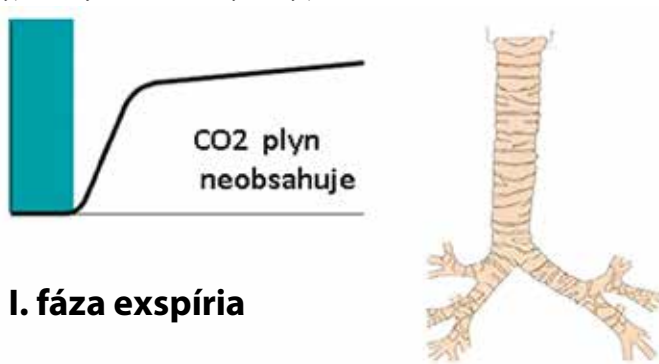
VDf, takzvaný fyziologický mŕtvy priestor, bol opísaný prvýkrát Bohrom a jeho výpočtom – rovnicou:

$$VDf/VT \text{ (Bohr)} = (PACO_2 - PECO_2)/PACO_2$$

Obrázok 3. Fázy I, II a III kapnogramu, ako vzťah medzi expirovaným objemom a expirovanou koncentráciou CO₂

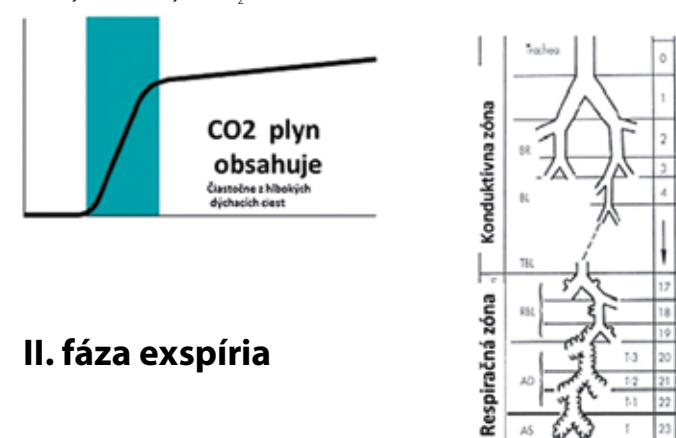


Obrázok 4. Prvá fáza expirácie, keď expirovaný plyn neobsahuje CO₂, vyprázdňuje sa anatomický mŕtvy priestor



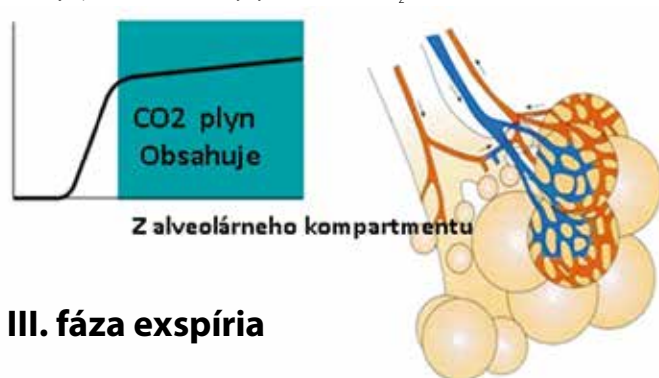
I. fáza expirácie

Obrázok 5. Fáza II expirácie, keď plyn vytekajúci z hlbokých dýchacích ciest obsahuje menší objem CO₂



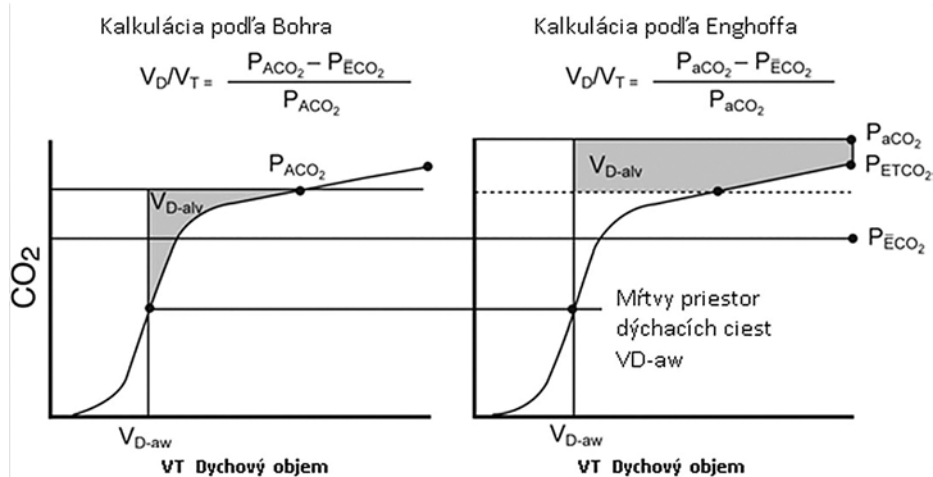
II. fáza expirácie

Obrázok 6. Tretia fáza expirácie, a to obsah alveolárneho plynu, ktorý obsahuje podstatnú časť vydychovaného CO₂

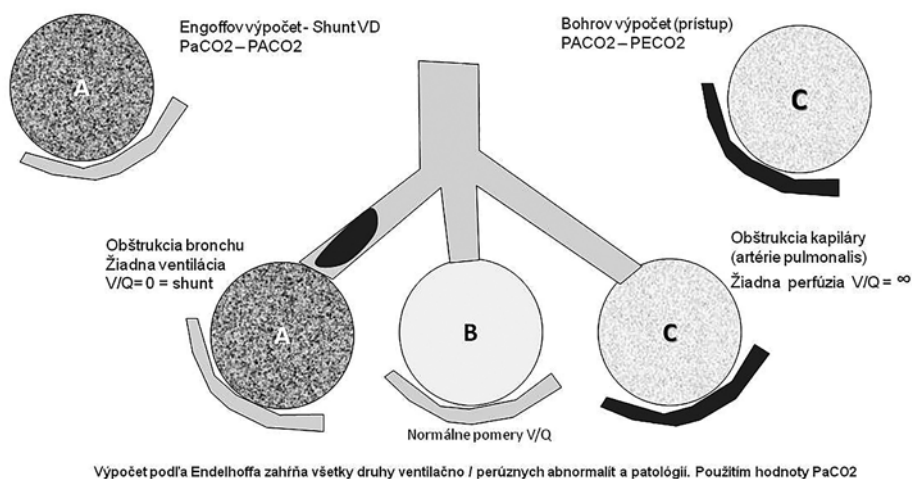


III. fáza expirácie

Obrázok 7. Schematické znázornenie kalkulácií VD/VT podľa Bohra a podľa Enghoffa. Kalkulácia podľa Enghoffa vyžaduje meranie arteriálneho parciálneho tlaku PaCO₂



Obrázok 8. Schéma reprezentuje Reilyho trojkompartmentný model pľúc z pohľadu výmeny plynov



PACO₂ predstavuje alveolárnu koncentráciu CO₂ a PECO₂ predstavuje strednú hodnotu expiračnej koncentrácie CO₂. Predpokladá ale pľúca s normálnym pomerom ventilácie a perfúzie (V/Q). Predpokladá sa meranie strednej hodnoty CO₂ „Douglasovým vakom“.

Mŕtvy priestor, resp. pomer V_{Df}/VT Bohrovou rovnicou predstavuje meranie pri idealizovaných pľúcach s rovnomerným V/Q pomerom (6).

Enghoff modifikoval a zjednodušil celý výpočet a tento sa dodnes používa v klinike ako metóda na stanovenie V_{Df}. Tým, že použil vo výpočte PaCO₂ (arteriálnu tenziu CO₂), zahrnul do výpočtu aj nepravidelnosti V/Q (pozri obrázok 7). **(Enghoff) V_{Df}/VT = PaCO₂ PECO₂/PaCO₂**

Tento výpočet ale vyžaduje odber arteriálnej krvi na stanovenie PaCO₂.

Zber plynu a invazívne monitorovanie PaCO₂ sú dve zásadné komplikácie na použitie bedside monitorovania VD/VT.

Zavedenie volumetrickej kapnografie Fletcherom podstatne zjednodušilo meranie jednotlivých hodnôt PACO₂ a PECO₂, ako aj všetky výpočty týkajúce sa VD/VT. PACO₂ predstavuje strednú hodnotu CO₂ v tzv. III. fáze kapnogramu.

Prekročenie obmedzenia v meraní parametrov zavedením volumetrickej kapnografie sa umožňuje neinvazívne a „bedside“ monitorovať okrem iných parametrov aj jeden z podstatných, a to V_{Df}/VT u pacientov na UVP.

Najdôležitejšie parametre derivované z kapnografie

1. VT_{CO₂} (ml/dych) – objem CO₂ vylúčeného v jednom výdychu
2. VE_{CO₂} (ml/min) – objem CO₂ vylúčeného pľúcami za jednu minútu = metabolickej produkcie CO₂
3. ET_{CO₂} – koncovo expiračná koncentrácia CO₂ vo vydechovanom plyne

4. PACO₂ – stredný alveolárny parciálny tlak CO₂
5. PECO₂ – stredný expirovaný parciálny tlak CO₂
6. PaCO₂ – parciálny tlak CO₂ v arteriálnej krvi (potrebuje invazívny odber krvi z artérie)

Komponenty fyziologického mŕtveho priestoru V_{Df}: anatomický mŕtvy priestor – mŕtvy priestor dýchacích ciest (VD_{aw}) a alveolárny mŕtvy priestor (VD_{alv})

Existujú dva komponenty fyziologického V_{Df}. Jeden tvoria dýchacie cesty VD_{aw} a druhú zvyčajne menšiu časť tvorí VD_{alv}. Obidva komponenty musíme dobre diferencovať. VD_{aw} je objemovo najväčšia časť a tvoria ju samotné konduktívne dýchacie cesty a časti dýchacieho okruhu (snímače, ET kanyla, HME a pod.) až po „Y“ spojku okruhu ventilátora. Meranie objemu VD_{aw} pred mnohými rokmi definoval Fowler, a to grafickou metódou ako plochu objemu pod krivkou ET_{CO₂} od začiatku expiračia po polovičku hodnoty CO₂ meranej v II. fáze kapnogramu (obrázok 5). Boli zavedené nové matematické spôsoby umožňujúce podstatne presnejšie určovať VD_{aw} a v neposlednom rade vypočítavať VD_{alv} jednoduchým odpočítaním VD_{aw} od V_{Df} (5).

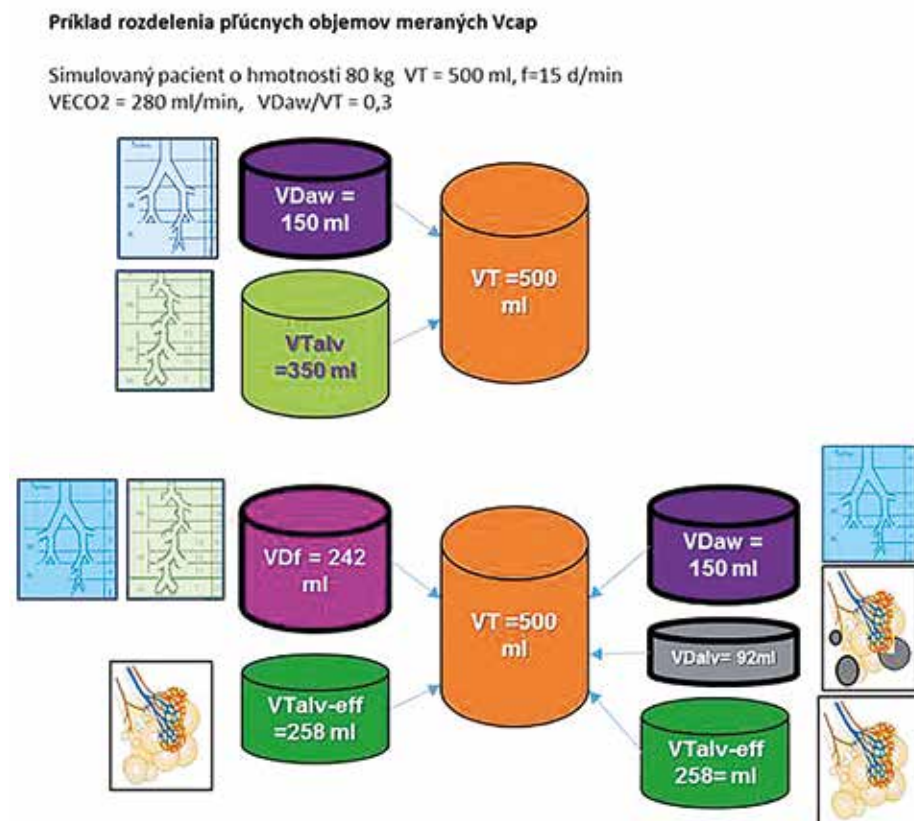
Základné rozdiely v Bohrovej a Enghoffovej analýze mŕtveho priestoru

Na obrázku 8 je znázornený Reilyho trojkompartmentný model pľúc: „A“ kompartment predstavuje neventilované (obštrukčné) alveoly, ale pritom perfundované (V/Q = shunt). Ide o shunt v klasickom poňatí.

„B“ kompartment predstavuje normálne ventilované aj perfundované alveoly.

„C“ kompartment predstavuje ventilované ale neperfundované alveoly (V/Q = ∞).

Bohrov postup meria správne V_{Df}, ale len v alveolárnych kompartmentoch s vysokým, alebo neurčitým shuntom (V/Q). Enghoffov postup s použitím PaCO₂ meria všetky V/Q abnormality a predstavuje globálny index efektivity výmeny plynov, a nielen mŕtvy priestor v klasickom význame tohto pojmu (6).

Obrázok 9. Rozdelenie VT do jednotlivých kompartmentov pľúcnych objemov, simulovaný príklad

Základné parametre pľúcnych objemov derivovaných z VCap

VDaw (ml) – mŕtvy priestor dýchacích ciest

VTalv (ml) – alveolárny dychový objem jedného dychu

VDaw/VT – pomer mŕtveho priestoru dýchacích ciest k VT

VTalv/VT – pomer alveolárneho dychového objemu VTalv k VT

VTalv eff (ml) – efektívne VT alveolárne = VT - (VT * (VDfyz/VT)) Bohr

VDfyz/VT (Bohr) – pomer fyziologického mŕtveho priestoru k dychovému objemu = (PACO₂ - PECO₂)/PACO₂

VDfyz/VT – pomer fyziologického mŕtveho priestoru k dychovému objemu = (Enghoff) - (PaCO₂ - PECO₂)/PaCO₂

VDalv – alveolárny mŕtvy priestor

Využitie informácií získaných volumetrickou kapnografiou

Striktne vzaté, mŕtvy priestor nie je priestor, ale objem. Z tohto dôvodu je jedinečnou vlastnosťou monitorovania pomocou VCap to, že obsahuje mnohé informácie vo všetkých anatomických aj funkčných objemoch, pri akomkoľvek dychovom objeme či minútovej ventilácii. Merané objemy a ich vyhodnotenie sa nevzťahujú výhradne

len na výmenu plynov, ale môžu byť vodidlom na posúdenie mechanického stresu pľúc, perfúzie pľúc, výkonnosti obehu a naplnenia cievneho systému.

Okrem okamžitej detekcie charakterizujúcej ventiláciu pľúc, môžeme vizualizovať dosahy zmien VT alebo PEEP na distribúciu plynov do jednotlivých vyššie definovaných pľúcnych objemov (VDaw, VDf, VD-alv...). Tieto postupy môžu viesť k ozrejmeniu nesprávneho nastavenia ventilátora, ktoré vedú k hyperventilácii, alebo neefektívnej alveolárnej ventilácii. VCap môže odhaliť niektoré poruchy perfúzie pľúc, ale aj hypovolémiu, či nesprávne nastavenie ventilátora (VT a PEEP). Výsledky merané výpočtom podľa Bohra sú senzitivnejšie na zmeny pľúcnych objemov. Zvýšenie PEEP môže ale nemusí pri aplikácii Enghoffovho výpočtu u atelektatických pľúc ovplyvniť vypočítané VD (7).

Záver

Existuje množstvo klinických situácií, pri ktorých patofyziologické zmeny sú sledovateľné pomocou VCap a môžu byť významnou pomôckou jednak pri diagnostike, ale hlavne v hodnotení postupu lekára pri nastavení parametrov UVP. VCap umožňuje do určitej miery

sledovať a nepriamo vyhodnocovať vplyv našich rozhodnutí nielen na pľúca pacienta, ale aj na výmenu plynov, metabolické zmeny a vplyv na obehový systém.

VCap predstavuje mohutný monitorovací nástroj, ktorý poskytuje informácie v reálnom čase o účinnosti ventilácie a perfúzie v pľúcach. Pokroky v monitorovaní pľúcnych funkcií, ktoré sú odrazom patofyziologických dejov na jednej strane a nastavenia ventilátora a jeho parametrov na strane druhej, predstavujú výrazný pokrok pre neinvazívny monitoring nielen samotných pľúc, ale aj ich perfúzie a výkonnosti obehového systému. Umožňujú optimalizovať a v reálnom čase sledovať reakciu organizmu na zmeny nastavenia parametrov UVP. VCap predstavuje jeden z množstva efektívnych nástrojov schopných výrazne pomôcť lekárovi u kriticky chorých ventilovaných pacientov. Myslíme si, že je najvyšší čas zavádzať VCap do klinickej praxe (7, 8).

Literatúra

1. Tusman G, Suarez Sipmann F, Bohm SH. Rationale of dead space measurement by volumetric capnography. *Anesth Analg.* 2012;114:866-874.
2. Tusman G, Gogniat E, Bohm SH, Scandurra A, Suarez-Sipmann F, Torroba A, et al. Reference values for volumetric capnography-derived non-invasive parameters in healthy individuals. *J Clin Monit Comput.* 2013;27(3):281-8
3. Sinha P, Soni N. Comparison of volumetric capnography and mixed expired gas methods to calculate physiological dead space in mechanically ventilated ICU patients. *Intensive Care Med.* 2012;38(10):1712-7.
4. Doorduyn D, Nolle J, Manon Vugts PA, Lisanne J, Roesthuis H, Akankan F, Van der Hoeven JG, van Hees HWH, Heunks LMA. Assessment of dead-space ventilation in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospective observational study. *Critical Care.* 2016;20:121 DOI 10.1186/s13054-016-1311-8
5. Siobal MS, Ong H, Valdes J, Tang J. Calculation of physiologic dead space: comparison of ventilator volumetric capnography to measurements by metabolic analyzer and volumetric CO₂ monitor. *Respir Care.* 2013;58(7):1143-51.
6. Jones NL, Robertson DG, Kane JW. Difference between end-tidal and arterial PCO₂ in exercise. *J Appl Physiol.* 1979;47(5):954-60.
7. Blanch L, Lucangelo U, Lopez-Aguilar J, Fernandez R, Romero PV. Volumetric capnography in patients with acute lung injury: effects of positive endexpiratory pressure. *Eur Respir J.* 1999;13(5):1048-54.
8. Suarez Sipmann F, Bohm SH, Tusman G. Volumetric capnography: the time has come. *Curr Opin Crit Care.* 2014;20:333-339.

MUDr. Peter Čandík, PhD., MPH
KAIM VÚSCH a. s. a UPJŠ LF
Ondavská 8, 040 11 Košice
pcandik@vusoch.sk