

MODELOVÁNÍ VLIVU ZASTOUPENÍ HELIA V INSPIRAČNÍ SMĚSI NA VLASTNOSTI PROUDĚNÍ SMĚSI

M. Rožánek, K. Roubík

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství

Abstrakt

Článek se zabývá studiem vlivu helia na vlastnosti proudění inspirační směsi při spontánní ventilaci za normálních podmínek a při obstrukci dýchacích cest. Heliox je směs helia a kyslíku, která má odlišné fyzikální parametry od vzduchu, zejména výrazně nižší hustotu, což může přispívat ke zmenšení dechové práce pacienta a v některých případech může oddálit nebo dokonce odvrátit intubaci pacienta. Cílem studie je ověřit efekt využití helia v inspirační směsi na efektivitu proudění plynů v dýchacích cestách během spontánní dechové aktivity.

1 Metody

Používání helioxu není v současné době příliš rozšířené, nicméně zkušenosti ukazují, že jeho využití může být prospěšné zejména u pacientů s obstrukcí horních dýchacích cest (COPD) či astmatem. U těchto nemocí dochází obvykle k zánětu, který je zodpovědný za zúžení průsvitu průdušek a jejich zvýšenou vnímavost k jakýmkoliv zevním podnětům jakými jsou například fyzická zátěž, inhalace studeného vzduchu nebo expozice smogu. Pacienti s COPD mají problémy s výdechem, což vede k zadržování vzduchu v plicích. To vede k tomu, že se objem jejich plic zvětšuje. U těchto pacientů se postupně prohlubuje dušnost, která se projevuje nejdříve při námaze, později i v klidu. Mezi projevy obstrukce dýchacích cest či astmatu patří bronchostrikce, která se projeví snížením světlosti dýchacích cest, což vede ke zvýšení odporu dýchacích cest a ke zhoršení jejich průchodnosti. Tento efekt může vyústit v nedostatečnou ventilaci plic a nutnost intubace pacienta. Ve studii je sledován vliv helia na proudění plynů v dýchacích cestách, vzhledem k předpokladu, že přítomnost helia v inspirační směsi zlepší proudění plynů díky nižší hustotě. Vzhledem k rizikům, které jsou spojeny s intubací pacienta a využitím umělé plicní ventilace, je využití helioxu během spontánní ventilace zajímavou možností terapie.

Pro studium proudění inspirační směsi v dýchacích cestách je využit Weibelův morfologický model plic [1]. Rozměry dýchacích cest převzaté z tohoto modelu tvoří základ fyzikálních výpočtů, které jsou prováděny pro zdravou plíci s běžnými rozměry a pro obstrukci dýchacích cest, která je reprezentována sníženou světlostí dýchacích cest. Výpočetní model je implementován v programovém prostředí Matlab.

Heliox je směs helia kyslíku, která se dodává a používá nejčastěji v poměru 80:20 respektive 70:30, což znamená, že ve směsi je 80 (70) % helia a 20 (30) % kyslíku. Helium je inertní plyn, což znamená, že prakticky nereaguje s lidskou tkání. Proto nemá helium žádné nežádoucí účinky na pacienta, dokonce i když je aplikováno po delší dobu. Hlavní výhodou helia je jeho výrazně nižší hustota oproti vzduchu. Helium má rovněž nízkou molekulární hmotnost a vysokou míru difúze, což naznačuje že helium může redukovat dechovou práci a vylepšit ventilaci pacienta [2]. Přehled vlastností jednotlivých směsí je uveden v Tab. 1.

Heliox má nižší hustotu než vzduch a tento rozdíl se zvětšuje se zvětšujícím se zastoupením helia v inspirační směsi, hodnota viskozity zůstává podobná. Hustota a viskozita tekutiny jsou veličiny, které výrazně ovlivňují charakter proudění tekutiny. Proudění můžeme rozdělit podle hodnoty Reynoldsova čísla na laminární a turbulentní. Zatímco při laminárním proudění je průtok závislý na hodnotě viskozity, při turbulentním proudění je průtok závislý na hustotě tekutiny. Průtok při laminárním proudění je popsán Hagen-Poiseuilleovou rovnicí:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot l}, \quad (1)$$

kde r je průměr trubice, ΔP je tlakový gradient, η je dynamická viskozita a l je délka trubice.

Tab. 1: Vlastnosti směsí.

Směs (plyn)	Hustota (kg.m ⁻³)	Viskozita (μ Poise)
O ₂	1,429	211,4
He	0,179	201,8
80 % N ₂ , 20 % O ₂	1,293	188,5
80 % He, 20 % O ₂	0,429	203,6
70 % He, 30 % O ₂	0,554	204,7

V případě turbulentního proudění je průtok popsán rovnicí:

$$\dot{V}^2 = \frac{4\pi \cdot r^5 \Delta P}{\rho \cdot l}, \quad (2)$$

kde ρ je hustota tekutiny.

Z uvedených rovnic je zřejmé, že průtok je výrazně nižší během turbulentního proudění pro stejný tlakový gradient. Charakter proudění je určen hodnotou Reynoldsova čísla, které se počítá podle následující rovnice:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}, \quad (3)$$

kde v je rychlost proudění tekutiny, d je průměr trubice (dýchací cesty).

Proudění je považováno za laminární, pokud je hodnota Reynoldsova čísla menší než přibližně 2000. Efektivita průtoku je při turbulentním proudění menší, snahou je udržet v dýchacích cestách laminární typ proudění. Vzhledem k tomu, že Reynoldsovo číslo je závislé na hustotě tekutiny je zřejmé, že při využití helia v inspirační směsi bude jeho hodnota nižší a proudění zůstane laminární i v případech, kdy by se stalo při ventilaci vzduchem proudění turbulentním.

Při průchodu plynu přes ventil je proudění popsáno rovnicí (4):

$$\dot{V} = \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho} \right)^{0.5}. \quad (4)$$

Z rovnice je zřejmé, že proudění plynu ventilem je opět závislé na hustotě tekutiny a je tedy zřejmé, že i v tomto případě bude proudění zlepšené přítomností helia v inspirační směsi.

Z uvedených rovnic vyplývá, že heliox má teoretické předpoklady vylepšit efektivitu proudění při obstrukci dýchacích cest.

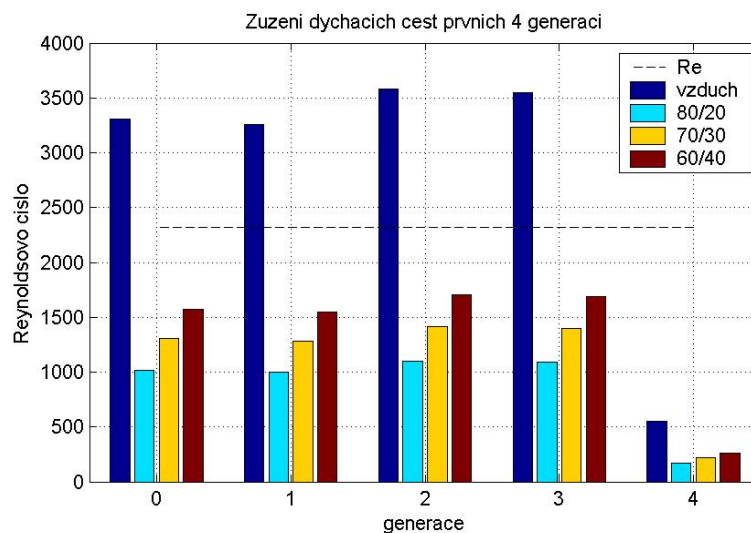
Studie je navržena pro dospělého pacienta s následujícími dechovými parametry:

dechový objem $V_t = 0,5$ l, dechová frekvence $f = 15$ dechů/min, čas nádechu $t_{ins} = 5/3$ s.

Porovnávány byly různé směsi helioxu a vzduchu a jejich vliv na proudění plynů v dýchacích cestách během různých situací.

2 Výsledky

Výsledky prezentované na Obr. 1 ukazují, že se v proximálních dýchacích cestách stává proudění turbulentním po určitém snížení světlosti daných cest. Aby bylo dosaženo turbulentního proudění musí snížení průměru dýchacích cest reflektovat snižující se rychlost proudění v dýchacích cestách směrem k alveolárnímu prostoru. Simulace zároveň potvrzují fakt, že použití helioxu jako inspirační směsi snižuje hodnotu Reynoldsova čísla a udržuje i při obstrukci dýchacích cest laminární typ proudění. Ze simulací také vyplývá, že čím je obstrukce dýchacích cest větší, tím větší je vliv zastoupení helia v inspirační směsi. Efekt snížení Reynoldsova čísla je větší s rostoucí koncentrací helia v inspirační směsi.



Obr. 1: Hodnota Reynoldsova čísla pro dýchací cesty dospělé plic, kde byla snížena světlost dýchacích cest generace 0 na dvě třetiny, generace 1 na polovinu, generace 2 na třetinu a generace 4 na čtvrtinu původní hodnoty při ventilaci vzduchem a helioxem.

Diskuse

Výsledky provedených simulací ukazují, že proudění vzduchu v dýchacích cestách je za normálních podmínek laminární. V případě využití helioxu je hodnota Reynoldsova čísla nižší a proudění zůstává laminární. S tím jak postupuje inspirační směs k distálním částem respiračního systému se zvyšuje celkový průřez dýchacích cest a klesá rychlost proudění. Zároveň klesá Reynoldsovo číslo a proudění je laminární. V alveolárním prostoru již převládá difúze plynů nad prouděním.

Pro vyvolání turbulentního proudění v dýchacích cestách prvních čtyř generací bronchiálního stromu byla snížena světlost dýchacích cest těchto generací (Obr. 1). Z obrázku je zřejmé, že hodnota Reynoldsova čísla byla při modelované obstrukci kolem hodnoty 3000 ve čtyřech prvních generacích bronchiálního stromu. To znamená změnu charakteru proudění z laminárního na turbulentní a snížení průtoku při zachovaném tlakovém gradientu, což má za následek menší množství vzduchu, které vstoupí do plic, při stejném dechovém úsilí. Při použití helioxu klesla hodnota Reynoldsova čísla podle zastoupení helia v dané směsi na hodnotu mezi 1000 a 1600 a proudění si tak i při obstrukci dýchacích cest zachovalo laminární charakter.

Závěr

Provedené simulace naznačují, že heliox může významně ovlivnit charakter proudění, a tím i množství inspirační směsi, které se dostane do plic při konstantním dechovém úsilí. Především při obstrukci dýchacích cest zůstává využití helioxu variantou terapie, která může předejít intubaci či umělé plicní ventilaci a s tím spojeným rizikům. Nevýhodou zůstává vysoká cena helia.

Poděkování

Tento výzkum byl podpořen projektem MSM 6840770012.

Literatura

- [1] E. R. Weibel, “Morphometry of the human lung”, Berlin: Springer-Verlag, 1963.
[2] T. R. Myers, “Use of heliox in children”, *Respir. Care*, 51(6) (2006), s. 619–631.

Martin Rožánek
Nám. Sítná 3105, Kladno, 272 01
e-mail: rozanek@fbmi.cvut.cz
tel.: 312 608 274

Karel Roubík
Nám. Sítná 3105, Kladno, 272 01
e-mail: roubik@fbmi.cvut.cz
tel.: 312 608 237