

postupem může dojít paradoxně ke zvýšení mechanické energie (ME) a zvýšení rizika VILI. Znalost, jak se jednotlivé parametry UPV podílejí na celkové ME, může pomoci při hledání optimální kombinace jednotlivých parametrů ve snaze minimalizovat VILI a současně dosáhnout uspokojivé výměny dýchacích plynů. Zvýšení rizika VILI nepředstavuje jen samotná výše ME, ale především vlastnosti plic, na které daná ME působí [5]. Heterogenita postižení plicního parenchymu, která je u ARDS častá, může vést k okrskům v plicním parenchymu, kde je působení dané ME již za hranou bezpečnosti a současně se mohou vyskytovat okrsky plic, kde daná ME nepůsobí škodlivě. Nezáleží tedy jen na určité hodnotě ME jako takové, ale na distribuci této energie v plicním parenchymu a na jeho postižení.

Počátky měření ME UPV sahají do 60. let minulého století, ale reálné využití této metody u lůžka pacienta není ani dnes součástí běžné praxe [6]. Příčinnou je zejména komplikovaný výpočet ME dodané ventilátorem, a rovněž neznalost mezní hodnoty, která by byla jednoznačně spojena s agravací plicního poškození (zvýšení rizika VILI nebo mortality potvrzené kvalitními studiemi u kriticky nemocných pacientů). Základní klinickou otázkou je, zdali ME představuje jen prognostický parametr pro rozvoj VILI či mortalitu kriticky nemocných, nebo zda-li se jedná o parametr, který umožní individualizaci nastavení jednotlivých parametrů UPV.

V literatuře se můžeme setkat s pojmy „mechanical energy“ a „mechanical power“ (MP). MP představuje energii aplikovanou ventilátorem za jednotku času, tedy kumulativní inspirační energii v joulech za minutu (J/min), zatímco ME v užším slova smyslu představuje energii aplikovanou během jednoho dechového cyklu [7]. V literatuře se oba pojmy často zaměňují a oba parametry se uvádějí v J/min. Současný koncept ME, tak jak ho dnes známe, byl poprvé popsán Gattinonim et al. (rovnice č. 1 v Tab. 1.) [8]. Autoři prezentují rovnici pro výpočet ME, která zohledňuje jednotlivé parametry běžně nastavované na ventilátoru. Jakkoli je rovnice na první pohled velmi složitá pro jednoduché využití u lůžka, může být přesto přínosná, protože ozřejmí vliv jednotlivých parametrů na velikost ME. Z rovnice vyplývá, že zvýšení  $V_t$ , „driving pressure“ (DP; rozdíl mezi plató tlakem a PEEP) a inspiračního průtoku zvyšuje ME s exponentem 2. Zvýšení PEEP zvyšuje ME přibližně lineárně a zvýšení dechové frekvence (RR) zvyšuje ME s exponentem 1,4. Pokud při nastavování parametrů UPV budeme zohledňovat i míru vlivu těchto jednotlivých parametrů na ME (aniž bychom složitě vypočítávali skutečnou hodnotu ME), můžeme nám to pomoci snížit celkovou zátěž UPV na plicní parenchym. Z tohoto pohledu tak můžeme například snížit ME zvýšením PEEP při současném snížení  $V_t$  či DP.

Podrobně se problematice ME věnuje řada učebnic a odborných textů [9–11]. Tento přehledový článek přináší stručný pohled problematiky ME u lůžka pacienta. Uvádí přehled nejdůležitějších vzorců pro výpočet ME u jednotlivých ventilačních režimů a interpretaci ME ve vztahu ke zvýšení rizika VILI či mortality.

## Jak stanovit ME u lůžka?

Existuje řada metod stanovení ME přímo u lůžka pacienta na UPV, ale základním předpokladem je řízená ventilace bez spontánní dechové aktivity pacienta. Stanovení ME u pacientů na UPV lze pomocí řady

**Tab. 1.** Rovnice pro výpočet ME.

| Objemově řízená ventilace |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Gattinoni a kol.        | $ME = RR \cdot \left\{ V_t^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{EL_{rs}}{V_t} + RR \cdot \frac{(1 + I:E)}{60 \cdot I:E} \cdot R_{aw} \right] + V_t \cdot PEEP \right\}$                                                                                                |
| 2 Chiumello a kol.        | $MP = 0,098 \cdot RR \cdot V_t \cdot \left[ P_{peak} - \frac{1}{2} \cdot (P_{plat} - PEEP) \right]$                                                                                                                                                                      |
| 3 Giosa a kol.            | $ME = \frac{V_t \cdot (P_{peak} + PEEP + F/6)}{20}$                                                                                                                                                                                                                      |
| 4 Aşar a kol.             | $MP_{dyn} = (WOB_v \cdot Mve) + (0,098 \cdot PEEP \cdot Mve)$                                                                                                                                                                                                            |
| 5 Chi a kol.              | $MP = (0,1 \cdot MV \cdot (P_{mean} + (P_{mean} - PEEP) \cdot E : 1))$                                                                                                                                                                                                   |
| Tlakově řízená ventilace  |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 6 Van Der Meijden a kol.  | $ME = 0,098 \cdot RR \cdot V_t \cdot \left[ PEEP + DP \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T_{insp}}{R \cdot C}} \right) \right]$                                                                                                                                                  |
| 7 Becher a kol.           | $ME = 0,098 \cdot RR \cdot V_t \cdot [ PEEP + DP ]$                                                                                                                                                                                                                      |
| 8 Becher a kol.           | $ME_{RCV(bkpel)} = 0,098 \cdot RR \cdot \left[ (DP + PEEP \cdot V_t - \Delta P_{insp}^2 \cdot C \cdot \left( 0,5 - \frac{R \cdot C}{T_{slope}} + \left( \frac{R \cdot C}{T_{slope}} \right)^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T_{slope}}{R \cdot C}} \right) \right) \right]$ |

*RR* – dechová frekvence; *EL<sub>rs</sub>* – elastance respiračního systému; *V<sub>t</sub>* – dechový objem; *PEEP* – pozitivní tlak na konci expirace; *I:E* – poměr inspirační a expirační doby; *Raw* – odpor dýchacích cest; *P<sub>peak</sub>* – maximální tlak na konci inspirace; *P<sub>plat</sub>* – plató tlak; *F* – inspirační průtok; *WOB<sub>v</sub>* – dechová práce ventilátoru; *Mve* – minutová expirační ventilace; *P<sub>mean</sub>* – střední tlak v dýchacích cestách; *DP* – driving pressure; *T<sub>insp</sub>* – inspirační čas; *R* – rezistance; *C* – poddajnost; *T<sub>slope</sub>* – doba do nárůstu maximálního tlaku

výpočtů, které se liší svou složitostí a přesností výpočtu. Vzorce musí být použity v podmínkách, pro které jsou určeny. Existují výpočty pro tlakovou nebo objemově řízenou ventilaci. S výhodou lze použít i zjednodušené rovnice za cenu jistého zkreslení. Jako nejpresnější metoda je považována **geometrická kalkulace ME** [12]. Jedná se o výpočet plochy pod tlakově objemovou křivkou jednoho dechu, která odpovídá ME a násobením RR pak získáme ME v J/min [13]. Je zapotřebí sledovat vztah tlaku a objemu v krátkých časových úsecích (v řádu desítek milisekund), aby bylo možné křivku přesně zaznamenat. Výpočet předpokládá plnou absenci spontánního dýchání a konstantní inspirační průtok. Geometrická metoda je primárně určena pro objemově řízenou ventilaci. Při tlakově řízené ventilaci dochází k jistému zkreslení vyplývajícemu z variabilního inspiračního průtoku, zohledňuje PEEP i RR. Předpokládá, že se v průběhu inspirace nemění poddajnost a odpor respiračního systému. Toto představuje limitaci metody v situaci tzv. dechového recruitmentu, tedy pokud má respirační systém významně jinou poddajnost na konci nádechu než na jeho začátku. Pokud je použit transpulmonární tlak (Ptp) odpovídá ME energii působící jen na plíce. Při výpočtu podle tlaků v tracheální kanyle představuje ME energii působící na celý respirační systém (plíce, hrudní stěna, dýchací cesty). Metoda je použitelná i u asistované ventilace, ale pokud pacient usilovně dýchá nemusí být výpočet přesný (podhodnocení při inspiračním poklesu tlaků). Při měření Ptp lze provést měření ME i u pacientů se spont. dechovou aktivitou. Využití geometrické metody u lůžka bez speciální techniky měření v podstatě