

ARTYKUŁ POGLĄDOWY / REVIEW PAPER

Otrzymano/Submitted: 27.06.2017 • Zaakceptowano/Accepted: 25.09.2017

© Akademia Medycyny

Nowe spojrzenie na wentylację mechaniczną dziecka w oddziale anestezjologii i intensywnej terapii

New look at mechanical ventilation in paediatric anaesthesiology and paediatric intensive care unit (PICU)

Alicja Bartkowska-Śniatkowska, Agnieszka Pietrzak, Jowita Rosada-Kurasińska

Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii Pediatricznej, Oddział Anestezjologii i Intensywnej Terapii Pediatricznej, Szpital Kliniczny im. K. Jonschera, Uniwersytet Medyczny im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu



Streszczenie

Niewydolność oddechowa jest najczęstszą przyczyną zachorowalności i umieralności w populacji pediatrycznej. Mimo że każdy anestezjolog stosuje wentylację mechaniczną na co dzień, jak dotąd nie ma jasnych i spójnych wytycznych dotyczących różnych technik wentylacji mechanicznej dla niemowląt i dzieci. Pewne strategie mogą być i są ekstrapolowane z doświadczeń u dorosłych, jednak powinny uwzględniać że dziecko to nie mały dorosły. Umiarkowany i ciężki ARDS nadal pozostaje wielkim wyzwaniem dla lekarza pracującego w oddziale intensywnej terapii dziecięcej. Celem wentylacji mechanicznej w tym ciężkim zespole niewydolności oddechowej powinna być optymalizacja wymiany gazowej, z zachowaniem minimalizacji pracy oddechowej, poprawa synchronizacji "pacjent - respirator" i ograniczenie skutków wentylacji płuc (nauka i sztuka). *Anestezjologia i Ratownictwo 2017; 11: 402-411.*

Słowa kluczowe: dzieci, niewydolność oddechowa, wentylacja mechaniczna, intensywna terapia, znieczulenie ogólne

Abstract

Respiratory failure has been still the leading cause of morbidity and mortality in the paediatric population. Although any anaesthesiologist uses a mechanical ventilation every day, so far no clear and consistent guidance on mechanical ventilation techniques for infants and children have been established. Certain strategies have been extrapolated from the adults, and with the limitation that children are not smaller adults. Moderate and severe ARDS still remains a big challenge for the clinicians in the paediatric intensive care unit (PICU). The aim of mechanical ventilation in this acute respiratory distress syndrome (ARDS) should be the optimization of the gas exchange, minimizing the work of breathing, synchronisation "patient - ventilator" and reducing the impact on lung damage (state of art). *Anestezjologia i Ratownictwo 2017; 11: 402-411.*

Keywords: children, respiratory insufficiency, mechanical ventilation, intensive care, general anaesthesia

Wstęp

Najczęstszym powodem przyjęcia dziecka do oddziału intensywnej terapii są niewydolność odde-

chowa i konieczność stosowania różnorodnych technik wspomagania oddychania. Obecnie wszystkie techniki wentylacyjne stosowane u dorosłych z powodzeniem

mogą być wykorzystane również w oddziałach intensywnej terapii pediatrycznej. Szczególnie przydatne wydają się nowsze techniki poprawiające w znaczącym stopniu synchronizację pacjenta z respiratorem. Nadal jednak nadal największym wyzwaniem dla klinicysty pozostaje pacjent z umiarkowaną i ciężką postacią ARDS. Ta grupa chorych szczególnie podatna jest na wystąpienie powikłań związanych ze stosowaniem dodatknych ciśnień dostarczanych do dróg oddechowych pacjenta przez respirator (VILI – VentilatorInduced Lung Injury). W artykule przedstawiono odmienności w podejściu do wentylacji mechanicznej podczas znieczulenia i intensywnej terapii, uwarunkowane odrębnościami anatomicznymi i fizjologicznymi małego dziecka.

Czym małe dziecko różni się od dorosłego?

Znajomość różnic anatomicznych i fizjologicznych małego dziecka jest niezbędna do podjęcia decyzji o sposobie wspomagania jego niewydolnego oddychania. Najistotniejsze odrębności anatomiczne obejmują wąskie i długie nozdrza, duży język, wąską i opadającą nagłośnień, zwężenie podgłośniowe, małą średnicę tchawicy, wiotkość chrząstek krtani i tchawicy, mniejszą średnicę oskrzeli i oskrzelików oraz brak skostnienia żeber, determinujący dużą podatność ścian klatki piersiowej. Czynniki warunkujące wymianę gazową w płucach u dzieci są podobne do tych u dorosłych, poza istotną różnicą dotyczącą wielkości jej powierzchni w stosunku do powierzchni ciała. Przyrost powierzchni wymiany gazowej największy jest w pierwszych 5. latach życia, na co wpływa systematyczny wzrost początkowo tylko ilości pęcherzyków płucnych, a po osiągnięciu dostatecznej ich liczby, wzrostu ich przekroju. Noworodek posiada około 20 mln pęcherzyków płucnych, podczas gdy dorosły ponad 300 mln. Pęcherzyki płucne nie są w pełni wykształcone, a niedostateczna produkcja surfaktantu i stosunkowo duża zawartość wody w tkance śródmiąższowej skutkują znacząco mniejszą podatnością płuc (3-5 ml/cmH₂O). Wąskie drogi oddechowe przekładają się na stosunkowo wysoki opór (zgodnie z prawem Poiseulle'a), który u najmłodszych dzieci może wynosić nawet ok 30-50 cmH₂O/l/s. Głównym mięśniem oddechowym u dzieci jest przepona, która zawiera zdecydowanie mniejszą ilość tzw. wysokoenergetycznych włókien mięśniowych. Dynamika rozwoju naczyń krążenia płucnego przebiega równoległe do wzrostu

pęcherzyków płucnych i jest największa w pierwszych trzech latach życia, ulegając spowolnieniu po 5 r.ż. Mięśnie gładkie tętnic płucnych osiągają dojrzałość dość późno, bo ok. 10 r.ż. Należy także pamiętać o znacznie mniejszej wrażliwości ośrodka oddechowego na podwyższone wartości pCO₂ [1].

Wskazania do rozpoczęcia wentylacji mechanicznej u dzieci

Decyzja o podjęciu wentylacji mechanicznej nie zawsze jest prosta i oczywista. Szereg czynników dodatkowych wpływa na podjęcie właściwej decyzji. Najważniejszym kryterium wdrożenia wentylacji mechanicznej pozostaje nadal stan kliniczny pacjenta oraz wyniki badań dodatkowych (gazometria tętnicza lub włósniczkowa), wyniki badań obrazowych (radiogram klatki piersiowej, USG i/lub TK klatki piersiowej) i oczywiście badanie przedmiotowe chorego. Przyczyny niewydolności oddechowej są bardzo różne i to one w głównej mierze decydują o rodzaju zastosowanej wentylacji mechanicznej [2]. W różnicowaniu przydatny wydaje się podział niewydolności oddechowej wg Wooda:

- typ I hipoksemiczny (patologia mięszu płucnego),
- typ II wentylacyjny – hiperkapniczny (zaburzona czynność pęcherzyków płucnych),
- typ III okołooperacyjny (resztkowe działanie leków anestetycznych),
- typ IV hipoperfuzyjny (zmniejszony przepływ krwi przez płuca).

Określony typ niewydolności oddechowej wymaga zastosowania odpowiedniej techniki wspomagania oddychania. Innej strategii wentylacyjnej będzie wymagał pacjent bez patologii mięszu płucnego ale który z różnych powodów nie oddycha samodzielnie, a innej strategii pacjent z ciężką postacią PARDS (*Pediatric Acute Respiratory Distress Syndrome*).

Tryby wentylacyjne stosowane u dzieci

Wybór odpowiedniego sposobu leczenia niewydolności oddechowej dziecka zależy w dużej mierze od wiedzy i umiejętności lekarza, od stanu pacjenta i od dostępności do określonego rodzaju respiratora w oddziale ITD. Wybór respiratorów jest często ogromny, ale czasami o jego wyborze nie decyduje jakość i możliwości, ale ekonomia. W praktyce przydatny może być podział respiratorów wg Putensena

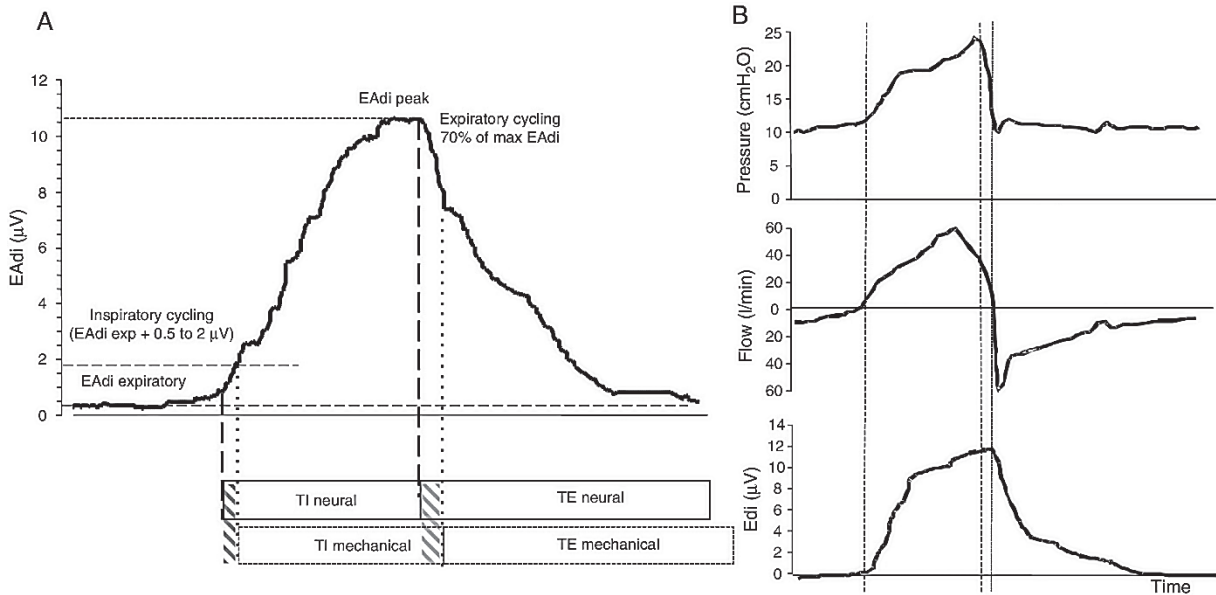
i wsp. (2001), natomiast podział trybów wentylacji wg Hasana [3].

- Podział respiratorów wg Putensena i wsp.
 1. Wpływające na objętość oddechową.
 2. Dające możliwość kontroli wentylacji minutowej.
 3. Kontrolujące wentylację minutową przez wentylację na dwóch poziomach ciśnień dodatnich.
 4. Z wysoką częstotliwością oddychania.
 5. Skojarzone, łączące różne systemy wentylacji.
 6. Z wysokim stopniem integracji homeostatycznej (SmartCare).
 7. Nieinwazyjne sposoby wspomaganie oddychania.
- Podział trybów wentylacji wg A. Hasana [3]
 - I. Wentylacja ograniczana objętością (tryb wspomagany, kontrolowany).
 - II. Wentylacja ograniczana ciśnieniem (tryb wspomagany, SIMV – *Synchronised Intermittent Mandatory Ventilation*, BiPAP-Bi-level Positive Airway Pressure) i wentylacja ograniczana ciśnieniem wspomaganie (PSV – *Pressure Support Ventilation*, PAV – *Proportional Adjusted Ventilation*).
Wentylacja z podwójną kontrolą wdechu (DUA – *Dual Control Mode*); wentylacja ograniczana ciśnieniem (adaptacyjna, PRVC – *Pressure Release Volume Control*).
 - III. Wentylacja ograniczana ciśnieniem wspomaganie (adaptacyjna).

W latach 80. i 90. ubiegłego wieku najczęściej stosowano respiratory o stałym przepływie czasowo-zmienne i nastawianym ciśnieniu wdechowym (Sechrist dla pacjentów ważących poniżej 5 kg). Nowszą wersją tego typu respiratora jest model Sechrist Millennium, który można stosować także u dzieci o masie ciała powyżej 10 kg. Obecnie praktycznie wszystkie tryby wentylacyjne stosowane u dorosłych pacjentów mają także zastosowanie u pacjentów pediatrycznych, ale pamiętać należy, że nie każdy respirator nadaje się dla małych pacjentów, głównie ze względu na brak możliwości zastosowania wentylacji z ograniczoną objętością. Najbardziej rozpowszechnione tryby wentylacji u dzieci obejmują wentylację kontrolowaną (CMV – *Control Mandatory Ventilation*) i to zarówno ograniczaną ciśnieniowo (PCV – *Pressure Control Ventilation*), jak i wentylację ograniczaną objętością (VCV – *Volume Control Ventilation*), zsynchronizo-

waną przerywaną wentylacją obowiązkową (SIMV), wentylację wspomaganą ciśnieniem (PSV) oraz wentylację proporcjonalną (PAV).

W literaturze mniej doniesień pojawia się na temat stosowania wentylacji z redukcją ciśnienia w drogach oddechowych (APRV – *Airway Pressure Release Ventilation*), czy wentylacji z dwufazowym ciśnieniem dodatnim w drogach oddechowych (BIPAP) Dostępność nowszej generacji respiratorów dostosowanych do wentylacji pacjentów w różnym wieku, wzbudziła wśród lekarzy zainteresowanie nowszymi trybami wentylacji takimi jak: adaptacyjne wspomaganie wentylacji (ASV – *Adaptive Support Ventilation*) czy też tryb objętości kontrolowanej zmiennym ciśnieniem (PRVC). Wentylacja wysoką częstotliwością (HFV – *High Frequency Ventilation*) ma zastosowanie głównie u dzieci z wrodzonym nadciśnieniem płucnym czy też wrodzoną przepukliną przeponową. Próby stosowania tych trybów wentylacji u pacjentów z ciężką postacią PARDS nie przyniosły jednak oczekiwanych korzyści. Gupta i Green w badaniu opublikowanym w 2014 roku porównali wentylację konwencjonalną z HFOV u dzieci z PARDS, jednakże wykazali większą śmiertelność w tej drugiej grupie chorych [4]. W ostatnich kilku latach coraz większym natomiast zainteresowaniem cieszy się NAVA (Neurally Adjusted Ventilatory Assist) ze względu na unikalny sposób wyzwiania wspomaganie oddechu. NAVA jest definiowana jako proporcjonalna wentylacja wspomaganie oddechu kontrolowana neuronalnie. Wykorzystuje ona nową metodę synchronizacji respiratora z pacjentem, mianowicie nie poprzez spadek przepływu czy ujemne ciśnienie, ale w oparciu o ocenę elektrycznej aktywności przepony. W zależności od wielkości sygnału elektrycznego płynącego z przepony inicjowany jest jej skurcz, który z kolei decyduje o głębokości wdechu a tym samym o objętości oddechowej. Niezbędny do stosowania tej metody jest odpowiedni zgłębnik nosowo-żołądkowy umieszczony na poziomie przepony, który także może być wykorzystany do żywienia. Elektrody umieszczone w cewniku mierzą czynność elektryczną przepony i odpowiednio wartości Edi max (5-15 mV) oceniające wysiłek oddechowy pacjenta i Edi min (1-5 mV) opisujące czynność toniczną przepony (rycina 1) [5,6].



Rycina 1. Zapis czynności elektrycznej przepony
Figure 1. Electrical activity of diaphragm

W zależności od wartości Edi uzyskiwane są różne wartości PIP (*Peak Inspiratory Pressure*). Pomiar PIP obliczany jest według wzoru: $PIP = \text{Poziom NAVA} \times (Edi_{\max} - Edi_{\min}) + PEEP$. Przy wzroście $Edi_{\max} > 15 \mu V$ należy zwiększyć poziom NAVA (najczęściej wynosi od 1-4 cm H₂O), z kolei przy obniżeniu $Edi_{\max} < 5 \mu V$ obniżamy również poziom NAVA. W badaniach klinicznych udowodniono, że stosowanie NAVA skraca czas trwania wentylacji mechanicznej, poprawia synchronizację pacjenta z respiratorem, obniża wartość PIP, poprawia oksygenację, zapewnia lepszą stabilizację hemodynamiczną, zmniejsza ilość powikłań związanych z wentylacją mechaniczną, pozwala zredukować analgesję [5]. Istnieją jednak przeciwwskazania do stosowania NAVA, a najważniejszy z nich to brak własnego napędu oddechowego (urazy OUN, udary, leki), zarośnięcie przełyku, przetoki tchawiczoprzełykowe, przepuklina przeponowa, wrodzone miopatie, uszkodzenia nerwu przeponowego, planowane badania rezonansem magnetycznym. Jednakże należy zaznaczyć, że NAVA to naśladowanie fizjologii oddychania, w której każdy oddech jest inny a neuronalne tzw. triggerowanie pochodzi z ośrodka oddechowego. Ten tryb dostosowuje wspomaganie oddychania do potrzeb pacjenta i zapewnia lepszą synchronizację respiratora z pacjentem, co u dzieci jest szczególnie istotne [7].

W piśmiennictwie brak jest dostatecznej ilości badań nad technikami wentylacyjnymi stosowanymi u dzieci podczas intensywnej terapii. Jednym z większych badań było badanie PALIVE (*Pediatric Acute Lung Injury Mechanical Ventilation*) przeprowadzone w latach 2007-2008 przez zespół badaczy z Saint Justine w Montrealu (Phillipe Jovet, Miriam Santschi), którego celem było określenie rodzaju technik wentylacji stosowanych aktualnie w OITD. Badaniem objęto 3823 pacjentów, w 59 ośrodkach intensywnej terapii dziecięcej, w 12 krajach. U 10,5% rozpoznano PARDS, u 75,2% zastosowano konwencjonalne metody wentylacji (w tym 43,5% PCV), a u pozostałych 16,4% HFOV i u 8,4% NIV [8].

W ostatnich dwóch latach duże nadzieje związane są z wieloośrodkowym, prospektywnym badaniem VESPER (*Ventilator Settings in Pediatric European Registry*), przeprowadzonym w latach 2015-2016 pod kierunkiem Martina Kneybera z Uniwersytetu Medycznego w Groningen (Holandia), a oceniającym praktyki wentylacyjne aktualnie stosowane w ośrodkach pediatrycznych w Europie, w tym w Polsce. Być może wyniki tego badania pozwolą na lepsze zrozumienie problemu wentylacji mechanicznej u dzieci i wpłyną na zmianę praktyki wentylacyjnej w tej grupie pacjentów.

Aktualnie, póki co, zalecane są rekomendacje PALICC (*Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference*) z 2015, opracowane przez zespół 27 ekspertów z 8 krajów, wynikiem czego jest aż 151 zaleceń dotyczących definicji, patofizjologii i śmiertelności, wentylacji mechanicznej, leczenia uzupełniającego (NO, steroidy, prostaglandyny), monitorowania, technik nieinwazyjnych (*Non-Invasive Ventilation*) i pozaustrojowych ECMO (*ExtraCorporeal Membrane Oxygenation*) i leczenia wspomagającego [9]. Poruszano również problem dostosowania nowej definicji ARDS (tzw. „berlińskiej”) dla grupy pacjentów pediatrycznych. Zasadniczo kryteria rozpoznania tej najcięższej patologii płuc są bardzo podobne, poza możliwością zamiany wskaźnika oksygenacji wskaźnikiem saturacji [10,11]. W celu rozpoznania PARDS zalecane są kryteria obejmujące:

- wskaźnik oksygenacji – $OI = FiO_2 \times MAP \times 100 / PaO_2$
- wskaźnik saturacji – $OSI = FiO_2 \times MAP \times 100 / SpO_2$
- stosunek prężności – O_2 do FiO_2 $P/F = PaO_2 / FiO_2$
- obrzęk płuc niekardiogeny – ECHO
- objawy kliniczne – ostry początek choroby
- zmętnienie w obrazie KT lub rtg klatki piersiowej.

Niewątpliwie najtrudniejszym wyzwaniem dla lekarza pracującego w oddziale ITP są chorzy z PARDS, zwłaszcza z jego najcięższą postacią. Zalecenia PALICC dotyczące tej grupy pacjentów obejmują stosowanie wentylacji protekcyjnej wg algorytmu:

- objętość oddechowa 6 ml/kg
- „miareczkowanie” PEEP od 5-15 cm H₂O
- nie przekraczanie P_{plateau} 28-32 cm H₂O
- permisyjna hiperkapnia przy pH 7,15-7,30
- łagodna hipoksemia SpO₂ 88-92%
- Pozycja na brzuchu (*prone position*)
- odpowiednia analgesjacja połączona ze stosowaniem leków zwiotczających mięśnie szkieletowe (gł. *cisatracurium*) przez 48 h.

Wentylacja nieinwazyjna w oddziale ITP

Stosowanie różnych technik wentylacji mechanicznej bez użycia sztucznych dróg oddechowych (NIV) cieszy się szczególnie dużą popularnością (noworodki). Jest to też metoda z wyboru u dzieci z chorobami nerwowo-mięśniowymi (rdzeniowy zanik mięśni, choroba Duchenna), pozwalająca zwykle na kilka miesięcy, a nawet lat, odroczyć decyzję o wykonaniu tracheostomii. Może ona stanowić także alternatywę dla pacjentów onkologicznych i z ciężkimi defektami immunologicznymi, u których intubacja może

oznaczać ciężkie powikłania infekcyjne. Kolejnym wskazaniem do stosowania NIV jest proces odzwyczajania od respiratora, zwłaszcza u pacjentów, u których wystąpiła dysfunkcja przepony związana z wentylacją mechaniczną (VIDD – Ventilator Induced Diaphragm Dysfunction). Dostarczanie dodatniego ciśnienia do układu oddechowego dziecka zapewnić można za pomocą różnego rodzaju masek twarzowych, nosowych, nosowo-ustnych, hełmów. Stosując nieinwazyjną wentylację mechaniczną możemy wykorzystywać różne tryby oddechowe, zarówno ograniczane objętością jak i ciśnieniem [12]. Najczęściej wybierane tryby to NPPV (Noninvasive Positive Pressure Ventilation), BIPAP, NIV-NAVA, PSV, CPAP (Continuous Positive Airway Pressure). Zainteresowanie nieinwazyjnymi technikami wentylacyjnymi wynika przede wszystkim z możliwości poprawy parametrów wymiany gazowej, zmniejszenia pracy oddechowej pacjenta, redukcji ognisk niedodmy przy jednoczesnym znacznym zmniejszeniu ilości powikłań związanych w wytworzeniem sztucznych dróg oddechowych. Pamiętać należy jednak o doborze właściwego rodzaju respiratora, który będzie akceptował i kompensował przecieki pojawiające się wokół stosowanego interfejsu. Pewnym problemem podczas stosowania NIV wydaje się być wzrost oporów w drogach oddechowych (INAR – Increased Nasal Airway Resistance) wynikający z obrzęku i wysuszenia błony śluzowej jamy ustnej i gardła. NIV wydaje się być przydatnym sposobem wspomagania oddychania, ale jednak nie u wszystkich pacjentów. Przeciwwskazania do stosowania tej metody obejmują przede wszystkim ciężką postać ARDS, niedrożność dróg oddechowych, ciężkie zaburzenia świadomości, brak współpracy z pacjentem, nieefektywny kaszel, wysokie ryzyko zachłyśnięcia, stan po nagłym zatrzymaniu krążenia, stan po zabiegach w obrębie twarzoczaszki, urazy czaszkowo-mózgowe.

Warto w tym miejscu wspomnieć o możliwości zastosowania specjalnych kaniul donosowych podających ogrzewane i nawilżone powietrze (HFNC – High Flow Nasal Cannula), szczególnie przydatnych u najmniejszych pacjentów z zapaleniem oskrzelików. Specjalnie skonstruowany mieszalnik z komorą nawilżacza dostarcza tlen ogrzany do temperatury 34-37 stopni Celsjusza i 100% wilgotności. Wysoki przepływ gazu (2 ml/kg/min) generuje swoisty CPAP z ciśnieniem ok. 6 cm H₂O, dzięki któremu poprawia się wymiana gazowa i zmniejsza wysiłek pacjenta.

Wentylacja dzieci podczas znieczulenia ogólnego

Wentylacja dzieci podczas znieczulenia ogólnego stawia przed anestezjologiem również szczególne wyzwania, dotyczące zarówno odpowiedniego przygotowania pacjenta przed planowanym znieczuleniem i operacją, jak i odpowiedniego prowadzenia śródoperacyjnego, gwarantującego zmniejszenie ewentualnych powikłań w okresie pooperacyjnym. Obecność odchyłań w stanie pacjenta, zwłaszcza infekcje układu oddechowego w ostatnich dwóch tygodniach, zwiększają ryzyko powikłań płucnych, zwykle większe po operacjach brzusznych. Obecność świszczącego oddechu (wheezing), przedłużonej fazy wydechowej czy innych dodatkowych objawów osłuchowych może sugerować chorobę obturacyjną już w okresie indukcji znieczulenia, z zaburzeniami tym większymi, im mniejsze dziecko poddawane jest znieczuleniu. Istotnym także czynnikiem prognostycznym powikłań oddechowych okołoperacyjnych u dziecka może być palenie papierosów przez rodziców, a zwłaszcza przez matkę czy bezdech senny (OSA – *Obstructive Sleep Apnea*).

Z drugiej strony, niepomyślny przebieg pooperacyjny zależy może w dużym stopniu od czynników niezależnych od pacjenta ale od technik operacyjnych, włączając w to długotrwałe operacje, zwłaszcza jamy brzusznej i klatki piersiowej, operacje neurochirurgiczne i naczyniowe, zwłaszcza te, które przeprowadzane są w trybie pilnym. Szacuje się, że 20 do 40% powikłań płucnych towarzyszy chirurgii nadbrzusza, ale już połączenie laparotomii z torakotomią prowadzi może do głębokich redukcji objętości płuc ze spadkiem pojemności życiowej (VC – *Vital Capacity*) nawet o 50-60% a czynnościowej pojemności zalegającej (FRC) o około 30%, dodatkowo potęgowanych dysfunkcją przepony i/lub silnym bólem.

Znieczulenie już podczas indukcji zmniejsza FRC o 15 do 20%, a u dzieci z chorobliwą otyłością lub w ułożeniu na brzuchu nawet o 50%. Co ciekawe, FRC jest stosunkowo długo utrzymywana na niezmiennym poziomie podczas stosowania ketaminy. Ogniska niedodmy (atelektazje) mogą pojawić się śródoperacyjnie u ponad 80% pacjentów znieczulonych, prowadząc do pooperacyjnej hipoksemii, zwłaszcza przy zastosowaniu wysokich stężeń tlenu w mieszaninie oddechowej, tj. 80-100%. Intubacja zawsze zmniejsza tzw. przestrzeń martwą, natomiast nieprawidłowe odruchy obronne utrudniają usuwanie wydzieliny z wąskich dróg oddechowych zwiększając ryzyko zakażeń układu oddechowego.

Większość tych zmian ulega poprawie w ciągu kilku godzin po zabiegu, ale po dużych operacjach może trwać nawet kilka dni, wymagając kontynuacji leczenia dziecka w oddziale intensywnej terapii [13].

U niemowląt i małych dzieci poniżej 3 r.ż. z zasady powinna być prowadzona wentylacja kontrolowana ciśnieniem (PCV), zawsze z niewielkim PEEP między 3 a 5 cm H₂O. Taka strategia pozwala uniknąć nadmiernych ciśnień wdechowych, poprawia stosunek wentylacji do perfuzji, a jednocześnie zapobiega niedodmie czy trudnych do oceny zmian w podatności i oporach oddechowych [13].

U dzieci starszych zalecane są techniki wentylacyjne zgodne ze strategią leczenia oszczędzającego, z PEEP i ze zwiotczeniem mięśni w szczególnych przypadkach. Stosowanie technik z niskimi objętościami (LFA – *Low Flow Anesthesia*) rekomendowane jest dla dzieci powyżej 2 r.ż. lub masie ciała powyżej 20 kg, ze względu na ryzyko hipoksji u młodszych dzieci [14,15].

Kolejnym krokiem milowym podczas wentylacji śródoperacyjnej pacjentów dorosłych, ale też i dzieci, może okazać się technika NAVA, która pozwoliłaby na uniknięcie nie homogennej wentylacji płuc i zmniejszenie tym samym ryzyka poznieczuleniowej atelektazji. Eksperymentalne badania potwierdzają użyteczność tej techniki zarówno podczas znieczulenia VIMA (*Volatile Induced Maintenance Anesthesia*) jak i TIVA (*Total Intravenous Anesthesia*), z zachowaniem własnej spontanicznej czynności oddechowej pacjenta, raczej zawsze większej, gdy anestetykiem był środek wziewny. Interesująca jest także możliwość monitorowania nerwowego (NME – *Neuronal Mechanical Efficiency*) i NVE – *Neuroventilatory Efficiency*) podczas NAVA, w kontekście oceny wydolności przepony, która ponownie była bardziej korzystna, gdy w podtrzymaniu znieczulenia stosowano sewofluran zamiast propofolu [16].

Kolejnych badań wymagają techniki nieinwazyjne, które pozwoliłyby uniknąć lub zmniejszyć powikłania płucne pooperacyjne (CPAP, NPPV, HFNC), jednakże zaawansowany sposób monitorowania niemowląt czy dzieci z NIV wymusza praktycznie kontynuowanie leczenia pooperacyjnego w oddziale intensywnej terapii dziecięcej lub noworodkowej [17].

Powikłania wentylacji mechanicznej w OITP

Wentylacja mechaniczna, tak niezbędna w leczeniu różnych postaci niewydolności oddechowej,

niekiedy sama prowadzi do wystąpienia groźnych powikłań, które mogą zagrażać zdrowiu a czasami i życiu pacjenta. Część powikłań związana jest z wytworzeniem sztucznej drogi oddechowej a część ze stosowaniem dodatnich ciśnień.

Najczęstsze powikłania intubacji obejmują różnego rodzaju urazy gardła, krtani, tchawicy, zwłaszcza u dzieci z wrodzonymi wadami układu kostnego czy oddechowego, z nowotworami okolicy twarzy czy szyi (zespół Goldenhara, zespół Patau). Inne powikłania, które mogą być związane z obecnością rurki intubacyjnej czy tracheotomijnej to krwawienia, zmiany zapalne, przecieki wokół nieuszczelnionych rurek, skutkujące czasami ulewaniem do dróg oddechowych i rozwojem zapalenia płuc.

Niemniej istotnym problemem u dzieci leczonych z zastosowaniem respiratora jest możliwość wystąpienia uszkodzenia płuc związanego ze stosowaniem dodatnich ciśnień w drogach oddechowych. Już w latach 70. ubiegłego wieku zwrócono uwagę na problem uszkodzenia płuc indukowany przez respirator tzw. VILI (Ventilator Induced Lung Injury). Podobnym, chociaż nieco innym w istocie, określeniem jest VALI (Ventilator Associated Lung Injury) dedykowany raczej dla zaostrzenia istniejącego wcześniej uszkodzenia płuc. Gdy dochodzi do nadmiernego wzrostu ciśnienia w pęcherzykach płucnych, bądź do nadmiernego ich rozciągnięcia może to doprowadzić do ich pęknięcia i rozwoju barotraumy oraz volutraumy, czego klinicznym i radiologicznym wykładnikiem jest odma opłucnowa, śródpiersiowa czy podskórna [18]. Ciśnienie przepłucne (P_1 – transpulmonary pressure) jest tą siłą, która działa na płuca w trakcie wentylacji mechanicznej i to ono w dużej mierze odpowiedzialne jest za wystąpienie VILI, zgodnie z regułą:

$$P_1 = P_{aw(\text{ciśnienie w drogach oddechowych})} - P_{pl(\text{ciśnienie w opłucnej})}$$

W odpowiedzi na rozciągające ciśnienie przepłucne powstają siły w strukturze płuc, które określamy jak naprężenie (stress). Natomiast pod wpływem objętości oddechowej pojawia się rozciąganie (strain), które można określić jako stosunek objętości gazu dostarczanego w trakcie wdechu do objętości opowietrzonego płuca. Obydwie siły zależą od siebie według reguły: Stress (naprężenie) = $K \times$ strain (rozciąganie), w której K oznacza specyficzną elastancję płuc równą ciśnieniu przepłucnemu występującemu przy objętości oddechowej równej czynnościowej pojemności zalegającej (FRC) i wynoszącej około 13 cm H_2O .

Inne powikłania, które mogą pojawić się podczas stosowania wentylacji mechanicznej to biotrauma czyli uszkodzenie płuc związane z uwalnianiem prozapalnych cytokin, rekrutacją leukocytów, działaniem wolnych rodników tlenowych, uruchomieniem apoptozy, aktywacją układu krzepnięcia i dopełniacza, a wszystko to w odpowiedzi na przyłożone siły mechaniczne. Warto także wspomnieć o możliwości rozwinięcia się atelektraumy (ognisk niedodmowych), zwłaszcza gdy stosuje się nieodpowiednie wartości PEEP. Odrębnym zagadnieniem występującym stosunkowo często u pacjentów w oddziale IT jest zapalenie płuc związane z respiratorem (VAP – Ventilator-Associated Pneumonia). Nie do pominięcia wydają się także powikłania związane ze stosowaniem wysokich stężeń tlenu w mieszaniu oddechowej i związanego z nim szkodliwego działania wolnych rodników tlenowych, które dotyczą szczególnie noworodków i wcześniaków. Na zakończenie warto wspomnieć o możliwości rozwinięcia się zespołu niewydolności przepony (VIDD – Ventilator Induced Diaphragm Dysfunction), który może pojawić się już po kilkunastu godzinach stosowania oddechu kontrolowanego. Wystąpienie dysfunkcji przepony związane jest przede wszystkim ze wzmożoną proteolizą białek i zmniejszoną ich syntezą i może skutkować trudnościami w odłączeniu od respiratora [19], czego można by uniknąć oceniając aktywność przepony w technice NAVA.

Monitorowanie wentylacji mechanicznej

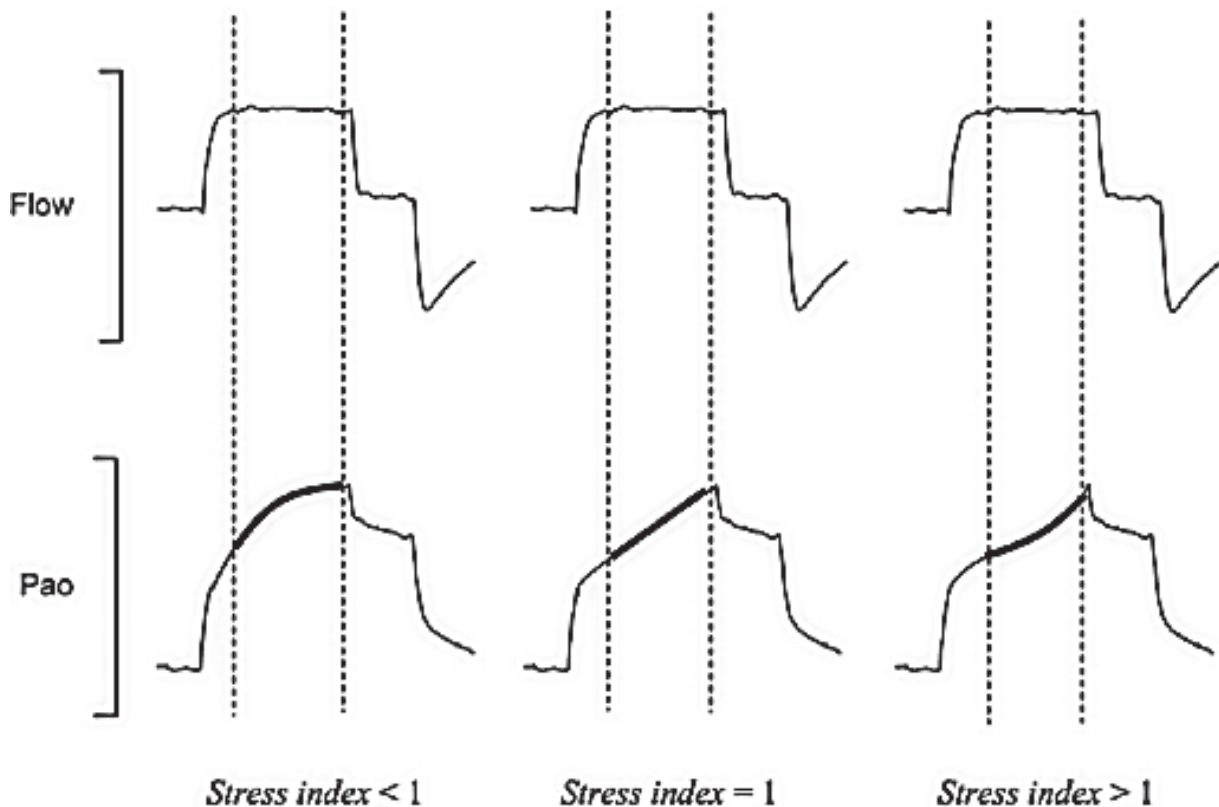
Stosowanie coraz bardziej nowoczesnych i wydawałoby się bezpiecznych respiratorów, wyposażonych w skomplikowane systemy alarmowe i mikroprocesory analizujące różne parametry urządzenia, nie zwalnia nas z obowiązku czujnego monitorowania pracy respiratora i jego synchronizacji z pacjentem. Monitorowanie powinno obejmować zarówno parametry wymiany gazowej, jak i biomechaniki płuc podczas wykorzystywania różnych trybów wentylacyjnych. Dzisiaj wydaje się niemożliwe prowadzenie skutecznej i bezpiecznej wentylacji mechanicznej bez znajomości tych parametrów i ich modyfikacji w zależności od zmieniających się warunków patofizjologicznych pacjenta, a podstawowe wiadomości z fizjologii i anatomii układu oddechowego dziecka są niezbędnym elementem leczenia z użyciem respiratora. Najważniejsza z punktu widzenia klinicznego jest znajomość takich parametrów jak podatność płuc, opór w drogach oddechowych, elastancja, przestrzeń martwa, czynnościowa

pojemność zalegająca, ciśnienia w cyklu oddechowym (pęcherzykowe, przepłucne) oraz stała czasowa.

Monitorowanie wymiany gazowej u dzieci nie różni się niczym od tego stosowanego u dorosłych. Pamiętać należy jednak, że u najmniejszych pacjentów wielokrotne pobieranie krwi do badań gazometrycznych może skutkować niedokrwistością. Najważniejsze z punktu widzenia oceny skutecznej wymiany gazowej jest gazometria krwi tętniczej lub włosniczkowej (PaO_2 – ciśnienie parcjale tlenu, PaCO_2 – ciśnienie parcjale dwutlenku węgla, ocena równowagi kwasowo-zasadowej). Wartość PaO_2 jest niezbędna do oceny wskaźnika P/F (ciężkości uszkodzenia płuc), wskaźnika oksygenacji, różnicy pęcherzykowo-tętniczej tlenu ($A-a \text{DO}_2$), dowozu i zużycia tlenu czy też współczynnika ekstrakcji tlenu (O_2ER). Wśród metod nieinwazyjnych, oceniających skuteczność wymiany gazowej, najistotniejsza jest oczywiście pulsoksymetria (SpO_2), monitorująca w sposób ciągły

wysycenie hemoglobiny tlenem. Wydajność wentylacji pęcherzykowej z kolei można mierzyć w sposób ciągły za pomocą kapnometru (ważna ocena zarówno krzywej kapnograficznej, jak i jej wartości końcowo-wydechowej – EtCO_2). Pamiętać jednak należy, że u dzieci dokładniejsze pomiary uzyskuje się umieszczając czujniki w strumieniu głównym gazów oddechowych a nie w strumieniu bocznym.

Monitorowanie biomechaniki płuc obejmuje zarówno ocenę podatności płuc, oporu dróg oddechowych jak i wartości ciśnień szczytowych (PIP – Peak Inspiratory Pressure), plateau i średnich (MAP – Mean Airway Pressure). Ważnych informacji o zmieniających się warunkach w układzie oddechowym pacjenta dostarcza ocena krzywych skalarnych, tj. przepływ-czas, ciśnienie-czas, objętość-czas oraz pętli, tj. ciśnienie-objętość, przepływ-objętość. W ostatnich latach podkreśla się z dużą siłą oznaczanie tzw. indeksu stresowego (SI – Stress Index), który wy daje



Rycina 2. Wyznaczanie SI w trakcie wentylacji ze stałym przepływem
Figure 2. SI determination during mechanical ventilation with constant flow

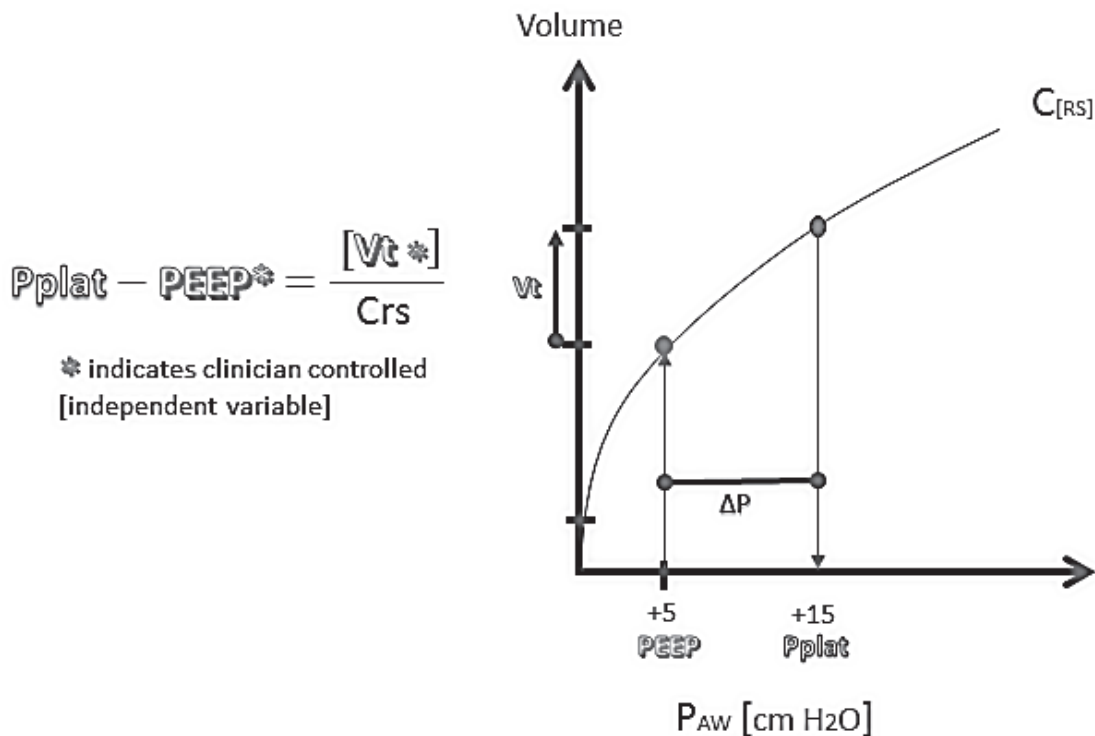
się być istotnym elementem przy doborze optymalnej wartości PEEP. Oznaczenie SI można dokonać tylko podczas stosowania wentylacji kontrolowanej objętością ze stałym przepływem. Na wykresie graficznym ciśnienie-czas oceniamy kształt krzywej ciśnienia w drogach oddechowych podczas stałego przepływu gazu. Jeżeli krzywa ma kształt wypukły, SI przyjmuje wartość poniżej 1 i świadczy to o spadku elastancji płuc (manewry rekrutacyjne). Jeżeli krzywa przyjmuje kształt wklęsły, wówczas SI przyjmuje wartość powyżej 1 i świadczy to o wzroście elastancji płuc (ryzyko "overdistension"). Przy wartości SI równej 1 krzywa przyjmuje kształt prosty sugerując brak zmian elastancji płuc. Badanie ARMA, przeprowadzone u dorosłych z inicjatywy The Acute Respiratory Distress Syndrome Network dowiodło, że miareczkowanie PEEP pod kontrolą SI zmniejszyło ryzyko rozwoju VILI, przy zmniejszonych wartościach cytokin prozapalnych, głównie interleukiny 6 i 8 (IL-6, IL-8) oraz czynnika wzrostu nowotworu (TNF-alfa) [20]. Prowadzenie

wentylacji mechanicznej z odpowiednim doбором zarówno VT, jak i PEEP pod kontrolą wartością SI (tzw. non-injurious SI), czyli wartościach od 0,95 do 1,05, pozwala znacząco zmniejszyć ilość uszkodzeń płuc związanych ze stosowaniem dodatniego ciśnienia w drogach oddechowych (rycina 2).

Parametrem pomocnym przy ocenie ryzyka rozwoju VILI może być także oznaczanie tzw. driving pressure, odzwierciedlającego krzywą objętość-ciśnienie, według zależności: $\Delta P = P_{\text{plat}} - \text{PEEP}$, $\Delta P = V_t / C_{\text{rs}}$

Wartość driving pressure pozwala miareczkować objętość oddechową, która w najmniejszym stopniu spowoduje nadmierne rozciągnięcie pęcherzyków płucnych (strain), a tym samym pozwoli uniknąć groźnych powikłań związanych z respiratoroterapią [21] (rycina 3).

Podsumowując, stosowanie wentylacji protekcyjnej płuc u pacjentów pediatrycznych z doбором właściwej objętości oddechowej i doбором optymalnego, odpowiedniego PEEP, najlepiej pod kontrolą SI



Rycina 3. Driving pressure
Figure 3. Driving pressure

i *driving pressure*, pozwoliłyby zminimalizować uszkodzenia płuc związane z zastosowaniem respiratora, poprawiając tym samym rokowanie i przeżywalność pacjentów z rozpoznaniem PARDS.

Konflikt interesów / Conflict of interest

Brak/None

Adres do korespondencji:

✉ Alicja Bartkowska-Śniatkowska

Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii
Pediatricznej

Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego
w Poznaniu

ul. Szpitalna 27/33; 60-572 Poznań

☎ (+48 61) 849 14 78

✉ anestezjologia@skp.ump.edu.pl

Piśmiennictwo

- Zielińska M, Zieliński S, Śniatkowska-Bartkowska A. Mechanical Ventilation in Children -Problems and Issues. *Adv Clin Exp Med.* 2014;23(5):843-8.
- Maciejewski D, Wojnar-Gruszka K. Podstawowe tryby wentylacji mechanicznej. W: *Wentylacja mechaniczna w teorii i praktyce.* Bielsko-Biała: Alfa-Medica Press; 2016.
- Hasan A. Konwencjonalne tryby wentylacji mechanicznej. W: *Zrozumieć wentylację mechaniczną.* Warszawa: MediPage; 2013.
- Gupta P, Green JW, Tang X, Gall CM, Gosset JM, Rice TB, et al. Comparison of high-frequency oscillatory ventilation and conventional mechanical ventilation in pediatric respiratory failure. *JAMA Pediatr.* 2014;168:243-9.
- De la Oliva P, Schuffelmann C, Gomez-Zamora A, Villar J, Kacmarek RM. Asynchrony, neural drive, ventilatory variability and COMFORT, NAVA versus pressure support in pediatric patients. A non-randomized cross-over trial. *Intensive Care Med.* 2012;38: 838-46.
- Mazela J, Piotrowski A. Proporcjonalna wentylacja kontrolowana (NAVA) w okresie noworodkowym. *Post Neonatol.* 2015;22:1-5.
- Bordessoule A, Emeriaud G, Morneau S, Jouvett P, Beck J. Neurally adjusted ventilatory assist improves patient-ventilator interaction in infants as compared with conventional ventilation. *Pediatr Res.* 2012;72(2):194-202.
- De Wit M, Pedram S, Best AIM, Epstein S. Observational Study of Patient-Ventilatory Asynchrony and Relationship to Sedation Level. *J Crit Care.* 2009;24(1):74-80.
- Santschi M, Randolph AG, Rimensberger PC, Jouvett P. Mechanical Ventilation Strategies in Children with Acute Lung Injury: a survey on stated practice pattern. *Pediatric Crit Care Med.* 2013;14:332-7.
- De Luca D, Piastra M, Chidini G, Tissieres P, Calderini E, Essouri S, et al. The use of the Berlin definition for acute respiratory distress syndrome during infancy and early childhood: multicenter evaluation and expert consensus. *Intensive Care Med.* 2013;39:2083-91.
- Conti G, Piastra M. Mechanical ventilation for children *Curr Opin Crit Care.* 2016;22:60-6.
- Essouri S, Chevett L, Durand P. Noninvasive positive pressure ventilation: five years of experience in pediatric intensive care unit. *Pediatr Crit Care Med.* 2006;7:329-34.
- Manowska M, Bartkowska-Śniatkowska A, Zielińska M, Kobylarz K, Piotrowski A, Walas W, et al. The consensus statement of the Paediatric Section of the Polish Society of Anaesthesiology and Intensive Therapy on general anaesthesia in children under 3 years of age. *Anaesth Intens Ther.* 2013;45(3):134.
- Zielińska M, Bartkowska-Śniatkowska A, Mierzewska-Schmidt M, Cettler M, Kobylarz K, Rawicz M, et al. The consensus statement of Paediatric Section of the Polish Society of Anaesthesiology and Intensive Therapy on general anaesthesia in children over 3 years of age. Part I – general guidelines. *Anaesthesiol Intens Ther.* 2016;48(2):82.
- Nasr V, Emmanuel J, Deutsch N, Slack M, Kanter J, Ratnayaka K, et al. Carbon monoxide re-breathing during low-flow anaesthesia in infants and children. *Br J Anaesthesia.* 2010;105(6):836-41.
- Jalde FC, Jalde F, Sackey PV, Radell PJ, Eksborg S, Wallin MK. Neurally adjusted ventilatory assist feasibility during anaesthesia. A randomised crossover study of two anaesthetics in a large animal model. *Eur J Anaesthesiol.* 2016;33:283-91.
- Bauchmuller K, Glossop AJ. Non-invasive ventilation in the Perioperative Period. *BJA Education.* 2016;16(9):299-304.
- Kuchnicka K, Maciejewski D: Ventilator -associated lung injury. *Anaesthesiol Intens Ther.* 2013;45(3):164-70.
- Martin D, Smith B, Gabrielli A. Mechanical ventilation, diaphragm weakness and weaning: A rehabilitation prospective. *Respir Physiol Neurobiol.* 2013;189(2).
- [No authors listed]. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. The acute respiratory Distress Syndrome Network. *N Engl J Med.* 2000, 342(18):1301-8.
- Chiumello D, Carlesso E, Brioni M, Cressoniu M. Airway driving pressure and lung stress in ARDS patient. *Crit Care.* 2016;20:276-86.