

**Irena Wojsyk-Banaszak, Anna Bręborowicz**Klinika Pneumonologii, Alergologii Dziecięcej i Immunologii Klinicznej Uniwersytetu Medycznego  
im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu  
Kierownik: prof. dr hab. n. med. A. Bręborowicz

## Metody badań czynnościowych układu oddechowego u dzieci w wieku przedszkolnym

### Techniques for assessing respiratory function in preschool children

Praca finansowana z działalności statutowej kliniki nr 502-01-01105122-04348 oraz badań własnych nr 501-01-01105122-07884 i 501-01-01105122-04348

#### Abstract

Despite increasing theoretical knowledge on available techniques of lung function measurements in preschool children, its application in clinical practice remains poor.

In this review a range of tests including spirometry, body plethysmography, interrupter technique, forced oscillation technique and its modification impulse oscillometry and gas mixing techniques is presented. Clinical applicability of these tests according to the recent American Thoracic Society/European Respiratory Society guidelines is also described.

**Key words:** preschool children, pulmonary function tests, guidelines

**Pneumonol. Alergol. Pol. 2010; 78, 3: 216–223**

#### Streszczenie

Mimo coraz lepszego poznania metod badania czynności układu oddechowego u dzieci w wieku przedszkolnym, nadal metody te nie stanowią rutynowego narzędzia diagnostycznego u małych dzieci. W niniejszym artykule omówiono najlepiej poznane techniki badania, obejmujące: spirometrię, pletyzmografię, pomiar oporu dróg oddechowych metodą okluzji, technikę oscylacji wymuszonych wraz z jej modyfikacją, oscylometrią impulsową, oraz metodę rozcieńczenia gazów. Przedstawiono zastosowanie tych metod w praktyce klinicznej zgodne z zaleceniami Amerykańskiego Towarzystwa Chorób Płuc i Europejskiego Towarzystwa Chorób Płuc.

**Słowa kluczowe:** dzieci w wieku przedszkolnym, badania czynnościowe układu oddechowego, zalecenia

**Pneumonol. Alergol. Pol. 2010; 78, 3: 216–223**

Badania czynnościowe układu oddechowego mimo dużej wartości diagnostycznej nie znalazły jak dotąd szerszego zastosowania u dzieci w wieku przedszkolnym. Wynika to nie tylko z trudności we współpracy z małymi dziećmi, ale również z niedostatecznej dostępności specjalistycznego sprzętu, braku wartości referencyjnych mierzonych paramet

trów i ścisłych zasad interpretacji wyników. Nadal nieliczna jest grupa osób odpowiednio wyszkolonych i posiadających doświadczenie w wykonywaniu badań u małych dzieci, a dodatkowo wysoki jest koszt badań. Celem autorów niniejszego artykułu jest omówienie metod oceny czynnościowej układu oddechowego u dzieci w wieku przedszkolnym.

**Adres do korespondencji:** dr n. med. Irena Wojsyk-Banaszak, Klinika Pneumonologii, Alergologii Dziecięcej i Immunologii Klinicznej Uniwersytet Medyczny im. K. Marcinkowskiego, ul. Szpitalna 27/33, 60–572 Poznań, tel.: (61) 849 13 13, faks: (61) 848 01 11, e-mail: [iwojsyk@ump.edu.pl](mailto:iwojsyk@ump.edu.pl)

Praca wpłynęła do Redakcji: 25.02.2009 r.  
Copyright © 2010 Via Medica  
ISSN 0867–7077

## Spirometria

Spirometria stanowi metodę z wyboru w rozpoznawaniu zaburzeń oddychania o charakterze obturacyjnym. Badanie polega na kilkakrotnym wykonaniu pełnego, natężonego wydechu, który za każdym razem jest poprzedzony głębokim wdechem, tak aby otrzymać przynajmniej trzy krzywe odzwierciedlające zależność przepływ–objętość. Badany powinien wykonać poprawnie przynajmniej dwie krzywe przepływ–objętość. We wspólnym stanowisku Amerykańskiego Towarzystwa Chorób Płuc (ATS, *American Thoracic Society*) i Europejskiego Towarzystwa Chorób Płuc (ERS, *European Respiratory Society*) dopuszcza się, aby u dzieci w wieku przedszkolnym oceniać najwyższe wartości FEV<sub>1</sub> i FVC, nawet jeżeli pochodzą z różnych krzywych przepływ–objętość. Jeśli zarejestrowano tylko jedną poprawną technicznie krzywą przepływ–objętość, w wyjątkowych przypadkach można u tych dzieci zaakceptować taki wynik, a w opisie badania zawsze należy podać liczbę prawidłowo wykonanych krzywych [1].

U osób dorosłych uznaje się badanie za powtarzalne, jeżeli dwie najwyższe wartości FVC i dwie najwyższe wartości FEV<sub>1</sub> nie różnią się między sobą o więcej niż 150 ml, a u osób z wartością FVC nie większą niż 1000 ml (ta grupa obejmuje większość dzieci w wieku przedszkolnym) należy przyjąć za powtarzalne wartości FVC i FEV<sub>1</sub> różniące się o nie więcej niż 100 ml [1, 2]. U dzieci w wieku przedszkolnym dopuszczalne są także różnice między dwoma najwyższymi oznaczeniami FVC i FEV<sub>1</sub> większe niż 100 ml, jeżeli nie przekraczają 10% mierzonych wartości [1].

Zgodnie z kryteriami poprawności wykonania badania u osób dorosłych badany powinien osiągnąć szczytowy przepływ wydechowy (PEF, *peak expiratory flow*) w czasie krótszym niż 0,3 sekundy, a wstecznie ekstrapolowana objętość (Vbe, *back-extrapolated volume*) nie powinna przekraczać 5% uzyskanej wartości FVC i 150 ml. Czas trwania natężonego wydechu (FET, *forced expiratory time*) nie powinien być krótszy niż 3 sekundy u dzieci dziesięcioletnich i młodszych oraz 6 sekund u dzieci starszych i osób dorosłych [2]. W badaniu dzieci w wieku przedszkolnym, dla których spełnienie tych warunków jest trudne, a często niemożliwe, należy stosować inne kryteria poprawności badania niż u osób dorosłych czy starszych dzieci. Objętość oddechowa płuc dzieci w wieku przedszkolnym jest mała w stosunku do średnicy dróg oddechowych. Nasilony wydech trwa zatem krócej niż zalecane u dorosłych 6 sekund, a niekiedy krócej niż sekundę [1]. Wydaje

się, że proponowane w niektórych opracowaniach wprowadzenie pomiaru FEV<sub>0,5</sub> u dzieci w wieku przedszkolnym mogłoby być przydatne w ocenie drożności dróg oddechowych. Pomiar ten charakteryzuje większa niż FEV<sub>1</sub> powtarzalność [3]. W diagnostyce zaburzeń wentylacji u dzieci w wieku przedszkolnym chorujących na mukowiscydozę pomiar FEV<sub>0,5</sub> cechowała większa czułość niż tradycyjnie stosowane oznaczenie FEV<sub>1</sub> [4]. Mała objętość płuc sprawia, że niemożliwe jest również ustalenie początku wydechu na podstawie wstecznie ekstrapolowanej objętości. U małych dzieci Vbe jest mniejsza niż u dorosłych, a stosunek Vbe do FVC — większy [1, 5]. Ponad 70% chorujących na mukowiscydozę dzieci w wieku przedszkolnym uzyskało w badaniu spirometrycznym wartość Vbe przekraczającą 5% FVC, co oznacza, że pomiary nie spełniły jednego z kryteriów poprawności [5]. Drugie z zalecanych u osób dorosłych kryteriów — Vbe nieprzekraczająca 150 ml — nie może więc być brane pod uwagę u małych dzieci, ponieważ jest to wartość niemożliwa do osiągnięcia w tym wieku. W cytowanym badaniu tylko 20% dzieci osiągnęło Vbe przekraczającą 80 ml, a najwyższy wynik wynosił 120 ml [5].

Trudności z poprawnym wykonaniem manewrów oddechowych przez dzieci w wieku przedszkolnym istotnie ograniczają wykorzystanie spirometrii w tej grupie wiekowej. Poniżej przedstawiono badania ilustrujące problemy ze spełnieniem kryteriów powtarzalności i poprawności spirometrii przez małe dzieci. Jedynie 49% z 98 dzieci z chorobami układu oddechowego w wieku 3–5 lat potrafiło dwukrotnie wykonać wydech trwający przynajmniej sekundę, a obowiązujących wówczas kryteriów powtarzalności badania nie spełniło żadne dziecko w 3. roku życia, a tylko 27% dzieci w 4. roku życia i 29% dzieci w 5. roku życia [6]. Z kolei inni badacze opisują prawidłowe wykonanie badania spirometrycznego przez większość zdrowych małych dzieci [3, 7], jak i dzieci z podejrzeniem astmy [8] lub chorujących na mukowiscydozę [4, 9]. Norwescy badacze stwierdzili, że 68% zdrowych dzieci w wieku 3–6 lat potrafiło wykonać 3 poprawne manewry natężonego wdechu–wydechu, a dwa poprawne manewry potrafiło wykonać aż 92% dzieci. Gdyby zastosowano aktualnie obowiązujące kryteria powtarzalności badania ATS/ERS (dopuszczalna różnica między dwiema najwyższymi wartościami FEV<sub>1</sub> 10%), odsetek dzieci, które prawidłowo wykonały 3 manewry natężonego wdechu–wydechu, wzrosłoby do 91% [3]. Podobne wyniki uzyskali amerykańscy badacze: 83% badanych dzieci w wieku 3–6 lat potrafiło poprawnie wykonać badanie rejestrujące krzywe

przepływ–objętość [7]. Ponad 80% dzieci w wieku przedszkolnym chorujących na mukowiscydozę potrafiło poprawnie wykonać dwa lub trzy manewry natężonego wdechu–wydechu [4, 9]. Badacze ci akceptowali jednak pomiary, w których czas wydechu był krótszy niż sekunda [4]. Stwierdzono również, że wartości  $FEV_1$  i FVC u dzieci w tym wieku dobrze korelowały z oceną według skali Brasfield, podobnie jak ma to miejsce u dorosłych chorych [9].

W polskiej pracy oceniającej poprawność wykonania pomiaru krzywej przepływ–objętość u dzieci w wieku 4–10 lat połowa pacjentów nie potrafiła wykonać badania. Poza jednym dzieckiem wszystkie niewspółpracujące dzieci nie ukończyły 7 lat. Z pozostałych pacjentów jedynie 17% wykonało badanie zgodnie z zaleceniami ATS/ERS. Po odrzuceniu kryterium czasu forsownego wydechu ( $> 3$  s) odsetek wzrastał do 63. Warunek powtarzalności  $FEV_1$  i FVC spełniło 79% dzieci [10].

Zastosowanie specjalnych programów animacyjnych czy interaktywnych gier polegających na nadmuchiwanie balonów lub zdmuchiwanie świeczek ułatwia przeprowadzenie badania [1, 3, 5]. Czas przeznaczony na badanie powinien być wystarczająco długi, aby wytłumaczyć dziecku, na czym polega badanie i nauczyć je prawidłowego wykonywania manewrów oddechowych [6]. Ponadto u małych dzieci powinno się używać odpowiedniego sprzętu z jak najmniejszą przestrzenią martwą.

### Pletyzmografia

Pletyzmografia pozwala zmierzyć opór dróg oddechowych i objętość płuc podczas spokojnego oddychania. Zasada działania pletyzmografii opiera się na prawie Boyle’a-Mariotte’a, które mówi, że w stałej temperaturze iloczyn ciśnienia i objętości stałej masy gazu się nie zmienia. W praktyce oznacza to, że ciśnienie i objętość gazu w płucach są wyliczane na podstawie zmian ciśnienia panującego w kabinie pletyzmografu. Podczas krótkotrwałego zamknięcia dróg oddechowych na 1–3 s dziecko wykonuje wysiłek oddechowy, co prowadzi do zmian ciśnienia w układzie oddechowym, które można obliczyć jako pochodną jednoczesnych zmian ciśnienia w kabinie. Z pomiarów dokonywanych na poziomie jamy ustnej można obliczyć objętość płuc, przy założeniu, że jeśli przepływ powietrza w drogach oddechowych ustaje, to ciśnienia panujące w jamie ustnej i w pęcherzykach płucnych są jednakowe, a zatem zmiana ciśnienia w jamie ustnej odpowiada zmianie ciśnienia w klatce piersiowej (ciśnienia pęcherzykowego). Zmiana objętości klatki piersiowej jest pośrednio

oceniana na podstawie pomiaru zmiany ciśnienia wewnątrz kabiny pletyzmograficznej. Z uzyskanych w ten sposób danych można obliczyć wyjściową objętość gazu w klatce piersiowej, czyli czynnościową pojemność zalegającą (FRC, *functional residual capacity*) [11, 12]. Mierzona pletyzmograficznie FRC nosi też nazwę torakalnej objętości gazu (TGV, *thoracic gas volume*) i stanowi sumę wszystkich objętości przestrzeni powietrznych znajdujących się w klatce piersiowej i w górnej części jamy brzusznej. Torakalna objętość gazu u osób dorosłych nie różni się zazwyczaj więcej niż o 100–150 ml od wartości FRC mierzonej inną metodą [12]. Pletyzmografia pozwala zmierzyć całkowitą objętość gazu znajdującego się w klatce piersiowej, również w obszarach płuc gorzej wentylowanych, na przykład w wyniku obturacji. W chorobach przebiegających z obturacją znacznego stopnia może dochodzić do dynamicznej hiperinflacji, czyli rozdęcia miększu płucnego, spowodowanego brakiem możliwości wykonania pełnego wydechu. Wówczas zwiększeniu ulega również wartość FRC [12].

Opór dróg oddechowych ( $R_{aw}$ , *airway resistance*) można obliczyć podczas spokojnego oddychania przy zachowanej pełnej drożności dróg oddechowych na podstawie zależności zmian ciśnienia w kabinie od przepływu w drogach oddechowych [11]. Metodę pletyzmografii coraz powszechniej wykorzystuje się do mierzenia swoistego oporu dróg oddechowych ( $sR_{aw}$ , *specific airway resistance*). Badanie  $sR_{aw}$  jest wykorzystywane do spoczynkowej oceny czynnościowej układu oddechowego i w ocenie nadreaktywności oskrzeli u dzieci w wieku przedszkolnym. Wartość  $sR_{aw}$  w niewielkim stopniu zależy od masy czy wysokości ciała, dlatego parametr ten może być przydatny w różnicowaniu zmian wynikających z procesu chorobowego ze zmianami powstającymi w przebiegu wzrastania [13]. U dzieci w wieku przedszkolnym wykazano przydatność pletyzmografii podczas próby rozkurczowej i po prowokacji zimnym powietrzem w diagnostyce astmy oskrzelowej [14, 15]. W cytowanych pracach wykazano, że wartość diagnostyczna tej metody w badanej grupie pacjentów była wyższa niż oscylometrii impulsowej i pomiaru oporu metodą okluzji. Pomiar  $sR_{aw}$  stosowano też w ocenie czynności układu oddechowego u zdrowych małych dzieci i dzieci chorujących na mukowiscydozę [16, 17].

### Pomiar oporu metodą okluzji

Metoda okluzji (*interrupter technique*) pozwala na pomiar oporu dróg oddechowych wraz z nie-

wielkim komponentem oporu stawianego przez ścianę klatki piersiowej. Polega ona na gwałtownym i krótkotrwałym (nie dłużej niż 100 ms) zamknięciu dróg oddechowych. W ciągu kilku sekund po zamknięciu zastawki ciśnienia panujące w jamie ustnej i w pęcherzykach płucnych się wyrównują. Ciśnienie w pęcherzykach płucnych, przy założeniu, że jest ono jednakowe w całych płucach, można zatem oszacować na podstawie zmian ciśnienia mierzonego w jamie ustnej [18]. Opór ( $R_{int}$ , *resistance by the interrupter technique*) można obliczyć jako iloraz ciśnienia panującego w jamie ustnej po zamknięciu zastawki i przepływu powietrza bezpośrednio przed okluzją [13].

Czas konieczny do wyrównania ciśnień panujących w układzie oddechowym u zdrowych dzieci wynosi 40 milisekund. Spadek ciśnienia w drogach oddechowych spowodowany zamknięciem zastawki najlepiej oceniać wstecznie, ekstrapolując zmiany ciśnienia po okluzji. Do tego celu najbardziej przydatne są pomiary zmian ciśnienia między 30. a 80. milisekundą. W tym czasie dochodzi już do wyrównania ciśnień panujących w jamie ustnej i pęcherzykach płucnych, a badany nie wykonuje jeszcze wysiłku oddechowego zmierzającego do pokonania oporu stawianego przez zastawkę [18].

Pomiary wykonuje się dla poszczególnych oddechów oddzielnie, co może ułatwić zastosowanie tej metody u małych, niewspółpracujących dzieci. Podczas badania dziecko oddycha spokojnie przez usta, a w trakcie wydechu, po osiągnięciu określonego przepływu lub objętości zastawka zamyka się automatycznie. Nie ustalono jak dotąd jednoznacznie, czy istnieje różnica w wartościach pomiarów  $R_{int}$  wykonywanych podczas wdechu lub wydechu. Wydaje się, że pomiary wykonywane podczas wydechu charakteryzuje większa czułość w wykrywaniu zmian średnicy dróg oddechowych znajdujących się wewnątrz klatki piersiowej. Pomiary wykonane podczas wdechu i wydechu nie powinny być stosowane zamiennie, a w opisie wyników należy zawsze uwzględnić fazę cyklu oddechowego, podczas której dokonywano pomiarów. Należy dążyć do zarejestrowania przynajmniej dziesięciu pomiarów, w tym przynajmniej pięciu poprawnych technicznie [1]. Wartości  $R_{int}$  rzadko spełniają kryteria rozkładu normalnego, dlatego wyniki powinny być przedstawione jako mediana i zakres, a nie jako średnia [1].

Zwiększony opór dróg oddechowych, obecność nierównomiernie wentylowanych obszarów płuc oraz podatność górnych dróg oddechowych, a szczególnie policzków, wydłużają czas koniecz-

ny do wyrównania ciśnień, co prowadzi do niedoszacowania ciśnienia panującego w pęcherzykach płucnych i w konsekwencji wartości  $R_{int}$  [1].

Powtarzalność wyników  $R_{int}$  uzyskanych podczas jednej wizyty jest gorsza niż  $FEV_1$  i porównywalna z sRaw i wskaźnikami reaktancji i rezystancji dróg oddechowych mierzonymi metodą oscylometrii impulsowej [19, 20]. Powtarzalne wyniki można uzyskać aż u 95% dzieci 4-letnich i starszych, które wykonują to badanie po raz pierwszy. Odsetek ten jest nieco mniejszy u młodszych dzieci [20]. Znacznie gorsza jest powtarzalność pomiarów podczas kolejnych wizyt. Zgodność wyników badań przeprowadzonych w odstępie trzech tygodni wynosiła około 50% u pacjentów z obturacją dróg oddechowych i około 70% u zdrowych dzieci [21]. Tak znaczna zmienność wyników może w części być spowodowana zmianami napięcia ścian oskrzeli. Ogranicza to niestety przydatność metody do oceny skuteczności długotrwałych interwencji, jak na przykład stosowania wziewnych glikokortykosteroidów [20].

Pomiar oporu dróg oddechowych metodą okluzji jest szczególnie przydatny do oceny krótkotrwałych zmian czynności układu oddechowego — w ocenie nadreaktywności oskrzeli w próbie prowokacyjnej metacholiną, zimnym powietrzem i wysiłkiem fizycznym [15, 19, 22], a także w ocenie odwracalności obturacji pod wpływem leków rozkurczających oskrzela [14, 23–25]. Mimo opisanych powyżej ograniczeń wykazano przydatność pomiaru oporu dróg oddechowych metodą okluzji u dzieci w wieku przedszkolnym w różnicowaniu fenotypów obturacji [26] oraz w badaniach odwracalności obturacji pod wpływem leków przeciwzapalnych [27]. W rozpoznawaniu obturacji czułość pomiarów  $R_{int}$  była jednak niższa niż oscylometrii impulsowej, pletyzmografii i spirometrii [19]. Może to być spowodowane niedoszacowaniem obturacji, ponieważ czas konieczny do wyrównania ciśnień w układzie oddechowym w tej sytuacji klinicznej jest dłuższy niż stosowany w badaniu, a także znaczną zmiennością uzyskiwanych wyników i szerokim zakresem wartości prawidłowych.

Z uwagi na fakt, że zakres wartości należnych  $R_{int}$  u dzieci zdrowych jest szeroki i pokrywa się z zakresem wartości uzyskiwanych przez dzieci z obturacją oskrzeli [28, 25] oraz dzieci chore na mukowiscydozę [24], nie mogą być one traktowane jako jedyne kryteria diagnostyczne. W grupie chorych na mukowiscydozę i astmę oskrzelową wartości  $R_{int}$  są statystycznie istotnie wyższe w porównaniu z grupą kontrolną, ale wartości nieprawidłowe ( $> 2$  SD [*standard deviation*]) stwierdza się jedynie u mniej więcej 20% chorych dzieci [24, 25].

## Technika oscylacji wymuszonych

Technika oscylacji wymuszonych (FOT, *forced oscillation technique*) polega na pomiarze zmian przepływu gazu w układzie oddechowym, wywołanych znanym zmiennym ciśnieniem zewnętrznym (sinusoidalna fala ciśnieniowa) generowanym przez membranę głośnika [29]. Oscylacje nie zaburzają spontanicznego oddychania. Przy dostatecznie małych zmianach ciśnienia przepływ gazu w układzie oddechowym zmienia się linowo. Ocenianym parametrem jest impedancja, składająca się z dwóch elementów: rezystancji i reaktancji, które opisują zgodne i niezgodne fazowo zależności między ciśnieniem i przepływem. Wskaźniki rezystancji zależą głównie od drożności dróg oddechowych, a wskaźniki reaktancji od własności elastycznych układu oddechowego oraz bezwładności tkanek i gazów. Metoda oscylacji wymuszonych pozwala ocenić właściwości mechaniczne zarówno dróg oddechowych, jak i miąższu płucnego. W zależności od zastosowanej częstotliwości fali ciśnienia impedancja dostarcza informacji o różnych elementach układu oddechowego. Odpowiedź na fale o niskim zakresie częstotliwości ( $< 1$  Hz) opisuje stan miąższu płucnego, a wraz ze wzrostem zastosowanych częstotliwości coraz większy wpływ na wartość impedancji ma opór dróg oddechowych. Przy zastosowaniu fali o wysokich częstotliwościach ( $> 100$  Hz) impedancja odzwierciedla zachowanie ścian dróg oddechowych, co jest szczególnie istotne w diagnostyce zaburzeń oddychania o charakterze obturacji [11].

Wartość wskaźnika reaktancji zależy od częstotliwości fali ciśnienia. Przy niskich częstotliwościach dominują własności elastyczne układu oddechowego i wskaźnik reaktancji przyjmuje wartość ujemną, a przy wyższych dominuje bezwładność tkanek i gazów i wskaźnik reaktancji przyjmuje wartość dodatnią. Częstotliwość, przy której wskaźnik reaktancji jest równy zero, określa się mianem częstotliwości rezonansowej (RF, *resonant frequency*). U małych dzieci wynosi ona 5–7 Hz [18].

W zależności od miejsca pomiaru przepływu i ciśnienia impedancja nosi nazwę impedancji wejścia (*input impedance*) — pomiar ciśnienia i przepływu w tym samym miejscu, na wysokości ust, lub impedancji przejścia (*transfer impedance*) — aplikowanie ciśnienia i jego pomiar wokół klatki piersiowej, a pomiar przepływu na wysokości ust [30]. Impedancja przejścia stanowi odmianę pletyzmografii i pod warunkiem zastosowania szerokiego zakresu częstotliwości od 4 do 256 Hz pozwala na niezależną ocenę dróg oddechowych

i miąższu płuc [11]. Badanie można przeprowadzić z zastosowaniem hełmu, który umożliwia aplikowanie fali ciśnienia wokół głowy badanego, minimalizując wpływ oporu pozatorakalnych dróg oddechowych na wynik pomiaru [29, 31].

W stanach chorobowych dochodzi do zmian impedancji układu oddechowego. W chorobach śródmiąższowych płuc obniżeniu ulega podatność, czego odzwierciedleniem są mniejsze wartości reaktancji. W zaburzeniach obturacyjnych wzrasta wskaźnik rezystancji niezależnie od zastosowanej częstotliwości fali ciśnienia [29], obniżają się wskaźniki reaktancji, a częstotliwość rezonansowa jest osiągana przy zastosowaniu wyższych częstotliwości [18]. Na podstawie wyniku badania FOT nie można niestety zróżnicować charakteru zaburzeń wentylacji — obturacji i restrykcji [32] — ani jednoznacznie określić, czy obturacja dotyczy obwodowych, czy centralnych dróg oddechowych [33]. Niemniej wydaje się, że FOT najlepiej z dostępnych obecnie metod pozwala na ocenę czynnościową obwodowych dróg oddechowych [34].

Badanie FOT polega na zarejestrowaniu od 3 do 5 cykli oddechowych trwających 8–16 sekund. Należy zawsze zaznaczyć, przy jakiej częstotliwości fali ciśnienia dokonywano pomiarów [1].

Badanie jest proste do wykonania, krótkie, powtarzalne, wysoce czułe w wykrywaniu zmian drożności dróg oddechowych i nie wymaga aktywnej współpracy badanego, albowiem pomiary są dokonywane podczas spokojnego oddychania. Wyniki badania u dzieci zależą głównie od płci i wysokości ciała [29].

W dwóch badaniach z udziałem dzieci przyjmowanych na oddział pomocy doraźnej z powodu zaostrzenia astmy oskrzelowej stwierdzono, że FOT potrafi poprawnie wykonać około 70% badanych [35, 36]. Dla porównania w tej grupie pacjentów spirometrię potrafiła wykonać mniej niż połowa badanych [35].

Jakość badania można ocenić na podstawie funkcji zgodności (*coherence*), która określa, jaka część sygnału wyjścia zależy od sygnału wejścia, a nie od zakłóceń ze strony środowiska czy też nieliniowego zachowania układu oddechowego. Wskaźnik koherencji 0,9 oznacza zgodność 90-procentową [11].

Krótkoterminowe wskaźniki zmienności (*coefficients of variations*), traktowane jako miara powtarzalności pomiarów, u dzieci w wieku przedszkolnym wynoszą 5–12% w zależności od zastosowanej częstotliwości [1, 33, 35]. Zmienność dobową wskaźnika rezystancji u mniej więcej jednej trzeciej dzieci chorujących na astmę oskrzelową jest wyższa, ale nawet w tej grupie nie przekracza 20% [32].

Badanie znalazło zastosowanie u dzieci chorych na astmę oskrzelową, u których wartości oporu dobrze korelują z wartością  $FEV_1$  i ze stanem klinicznym [31, 35–37]. Podobnie u dzieci z dysplazją oskrzelowo-płucną w wywiadzie wskaźniki rezystancji i reaktancji dobrze korelowały ze wskaźnikami  $FEV_1$  i  $R_{aw}$  [38]. W rozpoznawaniu obturacji u małych dzieci wyniki FOT charakteryzuje wyższa czułość niż pomiarów dokonywanych metodą okluzji [39].

Technika oscylacji wymuszonych jest wykorzystywana w testach bronchomotorycznych. Obniżenie wskaźników rezystancji dobrze korelowało ze wzrostem  $FEV_1$ , obniżeniem oporu mierzonego metodą pletyzmografii oraz poprawą stanu klinicznego [1, 31, 32, 39]. Zastosowanie niskich częstotliwości umożliwia wiarygodną ocenę nadreaktywności oskrzeli podczas prób prowokacyjnych z użyciem alergenów, histaminy i metacholiny, a wyniki są porównywalne z uzyskanymi metodą pletyzmografii całego ciała, pomiaru oporu metodą okluzji i spirometrii [32]. Wydaje się, że zmiany wskaźników reaktancji mogą charakteryzować się większą czułością niż zmiany wskaźników rezystancji w ocenie odpowiedzi oskrzeli na czynnik prowokujący, szczególnie u małych dzieci [32].

U pacjentów chorych na mukowiscydozę nie stwierdzono korelacji między wynikami FOT a  $FEV_1$  [18]. Prawdopodobnie na wyniki FOT wpływają zmiany własności elastycznych ściany oskrzeli w wyniku działania elastazy neutrofilii i w następstwie remodelingu [40].

### Oscylometria impulsowa

Oscylometria impulsowa (IOS, *impulse oscillometry*) stanowi modyfikację FOT. Główna różnica polega na wykorzystaniu impulsów ciśnienia wymuszającego o kształcie prostokąta. Wykazano dobrą korelację wskaźników rezystancji i reaktancji z wysokością ciała małych dzieci [41] oraz zgodność oceny oporu dróg oddechowych uzyskanej tą metodą z wynikami pletyzmografii [19, 42] i spirometrii [19, 43, 44] u dzieci starszych.

Badanie metodą IOS znalazło zastosowanie u dzieci chorych na astmę w ocenie odwracalności obturacji pod wpływem leków rozkurczających oskrzela oraz w ocenie nadreaktywności oskrzeli w próbie prowokacyjnej zarówno zimnym powietrzem, jak i metacholiną [8, 14, 15, 44]. Badanie tą metodą było bardziej czułe niż pomiar  $FEV_1$  w rozpoznawaniu zmian drożności oskrzeli w testach bronchomotorycznych [8, 19]. Podwyższenie wskaźników rezystancji po ekspozycji na metacholinę następuje szybciej niż spadek  $FEV_1$  [44]. Po-

nadto technika IOS przewyższała pletyzmografię w wykrywaniu długotrwałych zmian czynnościowych układu oddechowego będących następstwem przewlekłego wziewnego leczenia przeciwzapalnego u dzieci w wieku przedszkolnym chorych na astmę oskrzelową [27]. Pomiar impedancji metodą IOS nie były jednak przydatne w monitorowaniu postępu zmian w przebiegu mukowiscydozy [16].

Powtarzalność wyników IOS zależy od prawidłowej techniki badania (przytrzymywanie policzków) oraz doświadczenia osoby badającej. Stwierdzono, że wartości wskaźników reaktancji i rezystancji mierzone niezależnie przez dwie osoby mogą się istotnie różnić [45]. Podobne różnice pomiarów odnotowano w przypadku pletyzmografii całego ciała, a bardziej nasilone przy pomiarach oporu dróg oddechowych metodą okluzji [45].

### Metoda rozcieńczania gazów

Metoda rozcieńczania gazów (*multi-breath gas mixing techniques*) polega na podaniu pacjentowi do oddychania gazu różniącego się od powietrza gęstością i lepkością, który łatwo miesza się z powietrzem pozostającym w płucach, jest trudno rozpuszczalny we krwi i ma niskie powinowactwo do tkanek (np.  $N_2$ , He, Ar, SF<sub>6</sub>). Przepływ gazu znacznikowego musi być większy niż szczytowy przepływ wdechowy dziecka [1]. Gaz znacznikowy powinien osiągnąć jednakowe stężenie w całym płucach. Przyjęto, że cel ten zostaje osiągnięty, kiedy stężenie gazu znacznikowego w powietrzu wdychanym i wydychanym jest jednakowe. Od tego momentu badany oddycha jeszcze 30 sekund mieszaniną zawierającą gaz znacznikowy, a następnie dokonywane są pomiary składu wydychanego gazu podczas kolejnych spokojnych oddechów, co pozwala ocenić FRC, określić dynamikę procesu wypłukiwania gazu oraz oszacować różnice w wentylacji poszczególnych obszarów płuc. Proces wypłukiwania jest tym szybszy, im bardziej jednorodnie wentylowane są płuca, zatem w stanach chorobowych, zwłaszcza obejmujących obwodowe drogi oddechowe, będzie on wydłużony. Badanie metodą rozcieńczeń gazów może być wykonywane u noworodków, dzieci w wieku przedszkolnym i starszych [46–48].

Pomiary równomierności dystrybucji wentylacji przy zastosowaniu gazów znacznikowych mogą być wykonywane dwiema metodami: przy użyciu systemu z zamkniętym obiegiem gazu i systemu otwartego do pomiaru wypłukiwania gazu podczas jednego lub wielu oddechów (MBW/SBW, *multiple- or single-breath inert gas washout*). System zamknięty jest rutynowo wykorzystywany

u osób dorosłych, starszych dzieci i niemowląt do pomiaru FRC. Do oceny równomierności wentylacji stosuje się systemy otwarte do pomiaru wypłukiwania gazu podczas pojedynczego oddechu. Nie znalazły one zastosowania w badaniach małych dzieci, ponieważ w ich trakcie konieczny jest pomiar pojemności życiowej (VC, *vital capacity*), trudny, a często niemożliwy do wykonania przez dzieci w wieku przedszkolnym. W tej grupie wiekowej najszerzej wykorzystuje się systemy otwarte do pomiaru wypłukiwania gazu obojętnego podczas wielu oddechów [1].

Parametrem ocenianym w badaniu jest *lung clearance index* (LCI), stanowiący iloraz całkowitej objętości gazu, jaka musi być usunięta, aby pozbyć się z płuc gazu znacznikowego, i FRC. Wartości referencyjne LCI u zdrowych dzieci mieszczą się w wąskim przedziale i nie różnią się znacząco w poszczególnych grupach wiekowych, nie zależą od wzrostu ani od masy ciała [17]. Jest to niezwykle korzystne w długofalowej ocenie funkcji płuc u poszczególnych pacjentów [49]. Podwyższony LCI świadczy o nierównomiernej wentylacji płuc, która może wynikać zarówno z uogólnionej obturacji obwodowych dróg oddechowych, jak i zaburzeń ogniskowych. Zmiany takie występują we wczesnym etapie wielu przewlekłych chorób układu oddechowego u małych dzieci, takich jak: mukowiscydoza, dysplazja oskrzelowo-płucna, zarostowe zapalenie oskrzelików po przeszczepieniu szpiku kostnego lub płuc, a także astma oskrzelowa [11, 49]. Zwiększenie oporu obwodowych dróg oddechowych u tych chorych w niewielkim stopniu wpływa na całkowity opór dróg oddechowych i dlatego w chorobach tych wyniki spirometrii mogą początkowo mieścić się w granicach normy [1, 48]. U dzieci chorych na mukowiscydozę LCI przewyższa czułością pomiar FEV<sub>1</sub> [46, 48] czy pomiary oporu dróg oddechowych [17] i dobrze koreluje z wynikami tomografii komputerowej o wysokiej rozdzielczości [46]. Pomiar wypłukiwania gazu (MBW, *multiple breath inert gas wash-out*) znalazł też zastosowanie w ocenie czynności układu oddechowego przedwcześnie urodzonych noworodków [47]. Nie oceniono jak dotąd przydatności MBW w badaniu dzieci w wieku przedszkolnym chorych na astmę oskrzelową [1].

Objętość płuc zmierzona metodą rozcieńczeń gazu może być zaniżona w chorobach przebiegających z obturacją dróg oddechowych. Dzieje się tak, ponieważ mierzona jest tylko objętość gazu, jaka podczas wydechu swobodnie dociera do ust (miejsca pomiaru), a w przypadku znacznej obturacji część gazu pozostaje obwodowo od miejsca zwężenia [50].

Z uwagi na większą niż w późniejszym wieku częstość oddechów u małych dzieci i większy stosunek objętości oddechowej do FRC badanie w tej grupie wiekowej trwa stosunkowo krótko: od 1 do 3 minut u dzieci zdrowych i do 5 minut u dzieci z chorobami płuc [13].

Niestety nie ma obecnie dostępnych komercyjnie aparatów do pomiaru MBW u małych dzieci, a badania kliniczne wykonywano głównie z zastosowaniem sprzętu przygotowanego przez badaczy [50]. Nie przeprowadzono też badań porównujących pomiary dokonywane przy użyciu różnych gazów wskaźnikowych czy różnego sprzętu.

## Podsumowanie

Badania czynnościowe płuc u dzieci w wieku przedszkolnym nie znalazły jak dotąd szerokiego zastosowania w praktyce klinicznej. Wynika to głównie z trudności we współpracy z małymi dziećmi i konieczności stosowania w tym wieku odmiennych metod badania, co wymaga przeszkolonego personelu i odpowiednich urządzeń. Równocześnie wiadomo, że w przebiegu przewlekłych chorób układu oddechowego do nieodwracalnych uszkodzeń dochodzi we wczesnym okresie życia. Małe dzieci stanowią zatem grupę, która mogłaby odnieść ogromne korzyści z wczesnego rozpoznania.

Trudno oczekiwać, że wszystkie zachodzące w rozwijających się płucach zjawiska, zarówno w okresie zdrowia, jak i choroby czy pod wpływem stosowanego leczenia, można opisać za pomocą wyłącznie jednego parametru, takiego jak podatność czy opór dróg oddechowych. W miarę poszerzania się wiedzy na temat patofizjologicznych uwarunkowań najczęstszych chorób układu oddechowego u małych dzieci wzrasta też dążenie do poznania roli, jaką w tych procesach odgrywają poszczególne elementy układu oddechowego. Przedstawione metody wzajemnie się uzupełniają, a ich zastosowanie u dzieci w wieku przedszkolnym przyczyni się do lepszego zrozumienia zmian czynnościowych układu oddechowego, a w konsekwencji doprowadzi do udoskonalenia postępowania diagnostycznego i terapeutycznego w praktyce klinicznej.

## Podziękowania

Autorzy pracy składają podziękowania Profesorowi Grzegorzowi Lisowi za przejrzenie manuskryptu oraz wskazówki merytoryczne oraz Profesorowi Waldemarowi Tomalakowi, którego cenne uwagi były pomocne w czasie powstania tego artykułu.

**Piśmiennictwo**

1. An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement: pulmonary function testing in preschool children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2007; 175: 1304–1345.
2. Gondorowicz K., Siergiejko Z. Procedury wykonywania badań, akceptowalności i powtarzalności pomiarów. *Pneumonol. Alergol. Pol.* 2006; 74 (supl. 1): 17–20.
3. Nystad W., Samuelsen S.O., Nafstad P., Edvardsen E., Stensrud T., Jakkola J.J.K. Feasibility of measuring lung function in preschool children. *Thorax* 2002; 57: 1021–1027.
4. Vilozni D., Bentur L., Efrati O. i wsp. Spirometry in early childhood in cystic fibrosis patients. *Chest* 2007; 131: 356–361.
5. Aurora P., Stocks J., Oliver C. i wsp. Quality control for spirometry in preschool children with and without lung disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2004; 169: 1152–1159.
6. Kanengiser S., Dozor A.J. Forced expiratory maneuvers in children aged 3 to 5 years. *Pediatr. Pulmonol.* 1994; 18: 144–149.
7. Eigen H., Bieler H., Grant D. i wsp. Spirometric pulmonary function in healthy preschool children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2001; 163: 619–623.
8. Marotta A., Klinnert M.D., Price M.P. i wsp. Impulse oscillometry provides an effective measure of lung dysfunction in 4-year-old children at risk for persistent asthma. *J. Allergy Clin. Immunol.* 2003; 112: 317–322.
9. Marostica P.J.C., Weist A.D., Eigen H. i wsp. Spirometry in 3- to 6-year old children with cystic fibrosis. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002; 166: 67–71.
10. Tomalak W., Radliński J., Latawiec W. Jakość badania spirometrycznego u dzieci 10-letnich i młodszych w świetle zaleceń standaryzacyjnych. *Pneumonol. Alergol. Pol.* 2008; 76: 421–425.
11. Frey U. Clinical applications of infant lung function testing: does it contribute to clinical decision making? *Pediatr. Respir. Rev.* 2001; 2: 126–130.
12. Boros P. Metody badań czynnościowych układu oddechowego. W: Kowalski J., Koziorowski A., Radwan L. (red.). Ocena czynności płuc w chorobach układu oddechowego. Wydawnictwo Borgis, Warszawa 2004: 41–72.
13. Merkus P.J.F.M., de Jongste J.C., Stocks J. Respiratory function measurements in infants and children. W: Gosselink R., Stam H. (red.). Lung function testing. European Respiratory Monograph 31; European Respiratory Society 2005: 166–194.
14. Nielsen K.G., Bisgaard H. Discriminative capacity of bronchodilator response measured with three different lung function techniques in asthmatic and healthy children aged 2 to 5 years. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2001; 164: 554–559.
15. Nielsen K.G., Bisgaard H. Lung function response to cold air challenge in asthmatic and healthy children aged 2 to 5 years. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2000; 161: 1805–1809.
16. Nielsen K.G., Pressler T., Klug B., Koch C., Bisgaard H. Serial lung function and responsiveness in cystic fibrosis during early childhood. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2004; 169: 1209–1216.
17. Aurora P., Bush A., Gustafsson P.M. i wsp. Multiple-breath washout as a marker of lung disease in preschool children with cystic fibrosis. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2005; 171: 249–256.
18. Arets H.G.M., van der Ent C.K. Measurements of airway mechanics in spontaneously breathing young children. *Pediatr. Respir. Rev.* 2004; 5: 77–84.
19. Bisgaard H., Klug B. Lung function measurement in awake young children. *Eur. Respir. J.* 1995; 8: 2067–2075.
20. Child F. The measurement of airways resistance using the interrupter technique (Rint). *Pediatr. Respir. Rev.* 2005; 6: 273–277.
21. Chan E.Y., Bridge P.D., Dundas I., Pao C.S., Healy M.J.R., McKenzie S.A. Repeatability of airway resistance measurements made using the interrupter technique. *Thorax* 2003; 58: 344–347.
22. Kannisto S., Vanninen E., Remes K., Korppi M. Interrupter technique for evaluation of exercise-induced bronchospasm in children. *Pediatr. Pulmonol.* 1999; 27: 203–207.
23. Bridge P.D., Ranganathan S., McKenzie S.A. Measurement of airway resistance using the interrupter technique in preschool children in the ambulatory setting. *Eur. Respir. J.* 1999; 13: 792–796.
24. Beydon N., Amsallem F., Bellet M. i wsp. Pulmonary function tests in preschool children with cystic fibrosis. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002; 166: 1099–1104.
25. Beydon N., Pin I., Matran R. i wsp. Pulmonary function tests in preschool children with asthma. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2003; 168: 640–644.
26. Brussee J.E., Smit H.A., Koopman L.P. i wsp. Interrupter resistance and wheezing phenotypes at 4 years of age. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2004; 169: 209–213.
27. Nielsen K.G., Bisgaard H. The effect of inhaled budesonide on symptoms, lung function and cold air and methacholine responsiveness in 2- to 5-year old asthmatic children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2000; 162: 1500–1506.
28. McKenzie S.A., Mylonopoulou M., Bridge P.D. Bronchodilator responsiveness and atopy in 5-10 yr old coughers. *Eur. Respir. J.* 2001; 18: 977–981.
29. Tomalak W. Technika oscylacji wymuszonych w badaniach układu oddechowego. *Terapia* 1999; 11: 22–24.
30. Tomalak W. Technika oscylacji wymuszonych. Część I: Założenia metodyczne, definicje, sprzęt. W: Kowalski J., Koziorowski A., Radwan L. (red.). Ocena czynności płuc w chorobach układu oddechowego. Wydawnictwo Borgis, Warszawa 2004: 330–343.
31. Mazurek H.K., Marchal F., Derelle J., Hatahet R., Moneret-Vaytrin D., Monin P. Specificity and sensitivity of respiratory impedance in assessing reversibility of airway obstruction in children. *Chest* 1995; 107: 996–1002.
32. Oostveen E., MacLeod D., Lorino H. i wsp. The forced oscillation technique in clinical practice: methodology, recommendations and future developments. *Eur. Respir. J.* 2003; 22: 1026–1041.
33. Mazurek H. Technika oscylacji wymuszonych. Część II: Interpretacja wyników badania. W: Kowalski J., Koziorowski A., Radwan L. (red.). Ocena czynności płuc w chorobach układu oddechowego. Wydawnictwo Borgis, Warszawa 2004: 344–358.
34. Smith H.J., Reinhold P., Goldman M.D. Forced oscillation technique and impulse oscillometry. W: Gosselink R., Stam H. (red.). Lung function testing. European Respiratory Monograph 31; European Respiratory Society 2005: 72–105.
35. Ducharme F.M., Davis G.M. Respiratory resistance in the emergency department: a reproducible and responsive measure of asthma severity. *Chest* 1998; 113: 1566–1572.
36. Chalut D.S., Ducharme F.M., Davis G.M. The Preschool Respiratory Assessment Measure (PRAM): a responsive index of acute asthma severity. *J. Pediatr.* 2000; 137: 762–768.
37. Lebecque P., Stanescu D. Respiratory resistance by the forced oscillation technique in asthmatic children and cystic fibrosis patients. *Eur. Respir. J.* 1997; 10: 891–895.
38. Malmberg L.P., Mieskonen S., Pelkonen A., Kari A., Sovijarvi A.R.A., Turpeinen M. Lung function measured by the oscillometric method in prematurely born children with chronic lung disease. *Eur. Respir. J.* 2000; 16: 598–603.
39. Delacourt C., Lorino H., Fuhrman C., Herve-Guillot M., Reinert P., Harf A., Housset B. Comparison of the forced oscillation technique and the interrupter technique for assessing airway obstruction and its reversibility in children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2001; 164: 965–972.
40. Frey U. Forced oscillation technique in infants and young children. *Pediatr. Respir. Rev.* 2005; 6: 246–254.
41. Nowowiejska B., Tomalak W., Radliński J., Siergiejko G., Latawiec W., Kaczmarski M. Transient reference values for impulse oscillometry for children aged 3–18 years. *Pediatr. Pulmonol.* 2008; 43: 1193–1197.
42. Tomalak W., Radliński J., Pawlik J., Latawiec W., Pogorzelski A. Impulse oscillometry vs. body plethysmography in assessing respiratory resistance in children. *Pediatr. Pulmonol.* 2006; 41: 50–54.
43. Song T.W., Kim K.W., Kim E.S., Kim K.E., Sohn M.H. Correlation between spirometry and impulse oscillometry in children with asthma. *Acta Paed.* 2008; 97: 51–54.
44. Vink G.R., Arets H.G.M., van der Laag J., van der Ent C.K. Impulse oscillometry: a measure for airway obstruction. *Pediatr. Pulmonol.* 2003; 35: 214–219.
45. Klug B., Nielsen K.G., Bisgaard H. Observer variability of lung function measurements in 2-6-yr-old children. *Eur. Respir. J.* 2000; 16: 472–475.
46. Gustafsson P.M., De Jong P.A., Tiddens H.A., Lindblad A. Multiple-breath inert gas washout and spirometry versus structural lung disease in cystic fibrosis. *Thorax* 2008; 63: 129–134.
47. Hjalmarson O., Sandberg K. Abnormal lung function in healthy preterm infants. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002; 165: 83–87.
48. Gustafsson P.M., Aurora P., Lindblad A. Evaluation of ventilation maldistribution as an early indicator of lung disease in children with cystic fibrosis. *Eur. Respir. J.* 2003; 22: 972–979.
49. Gustafsson P.M. Inert gas washout in preschool children. *Pediatr. Respir. Rev.* 2005; 6: 239–245.
50. Weiner D.J., Allen J.L., Panitch H.B. Infant pulmonary function testing. *Curr. Opin. Pediatr.* 2003; 15: 316–322.