

Układ oddechowy

(L, E)

I. Zagadnienia

1. Mechanika procesu oddychania, wentylacja płuc.
2. Statyczne i dynamiczne parametry spirometryczne.
3. Prawa gazowe i przemiany gazu doskonałego.

II. Zadania

1. Zapoznanie się z pracą modelu układu oddechowego
2. Pomiar statycznych i dynamicznych parametrów spirometrycznych modelu
3. Wyznaczenie średniej podatności płuc

III. Wykonanie ćwiczenia

Badany model układu oddechowego (*Rys. 1.*) składa się z przezroczystego naczynia cylindrycznego (klatki piersiowej), w którym znajduje się gumowy mieszek imitujący płaty płucne. Naczynie to zamyka od dołu ruchoma przepona również wykonana w formie gumowego mieszka, poruszana pneumatycznym siłownikiem. Komputerowe sterowanie siłownikiem odbywa się poprzez zamykanie i otwieranie zaworu regulującego przepływ powietrza zasysanego przez pompę ssącą. Ruch przepony w dół powoduje obniżenie ciśnienia w klatce piersiowej (opłucnej) i w konsekwencji w elastycznych płatach płucnych. W wyniku powstałej różnicy ciśnień następuje napływ powietrza atmosferycznego do płatów płucnych – wdech. Analogicznie, ruch przepony ku górze wywołuje przepływ powietrza z płuc do atmosfery - wydech. Drogę przepływu powietrza stanowi układ rurek z wbudowanymi przepływomierzami i sterowanym komputerowo zaworem mogącym zamykać okresowo swobodny wypływ powietrza z płuc – szaterem.

Klatka piersiowa znajduje się w kabinie pletyzmograficznej (prostokątny pojemnik). Wnętrze pletyzmografu może być połączone z otoczeniem przy pomocy zaworu **Z**. Jeśli zawór **Z** jest otwarty, to w pletyzmografie panuje ciśnienie atmosferyczne p_{atm} .

Praca modelu sterowana jest przy pomocy komputera, gromadzi on również dane pomiarowe, a odpowiedzialny jest za to program *Ster_oddech*. W trakcie pracy modelu komputer rejestruje ciśnienia panujące w płucach (pęcherzyki płucne), opłucnej, ustach i kabinie pletyzmograficznej oraz przepływ powietrza do i z płuc. Mierzone parametry przedstawiane są na wykresach: wykres górny przedstawia przepływ powietrza w funkcji czasu, wykres dolny prezentuje zmiany ciśnień w czasie (czerwony - płuca, granatowy - opłucna, zielony - pletyzmograf, żółty - usta). Istnieje możliwość wyboru, które krzywe będą prezentowane na wykresie ciśnień poprzez zaznaczenie właściwych pól wyboru, ale program zapisuje do pliku zawsze kompletne wyniki pomiarów. Po zaimportowaniu wyników pomiaru do programu *Statistica* dane umieszczone są w tabeli w następujący sposób:

Kolumna Var1 - czas [s]

Kolumna Var2 - ciśnienie w ustach [hPa]

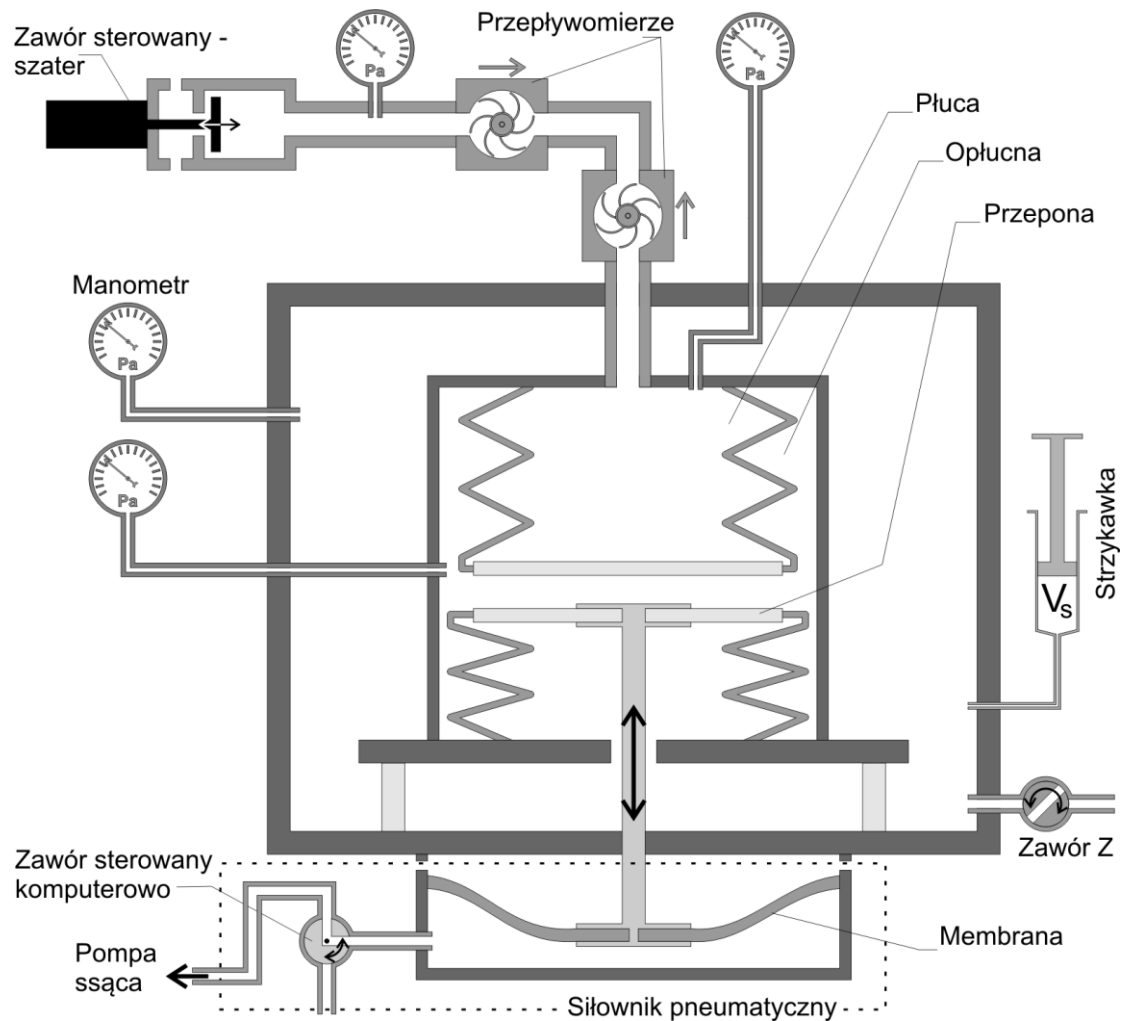
Kolumna Var3 - ciśnienie w pęcherzykach płucnych [hPa]

Kolumna Var4 - ciśnienie w opłucnej [hPa]

Kolumna Var5 - ciśnienie w kabinie pletyzmografu [hPa]

Kolumna Var6 - przepływ w ustach [l/s]

Kolumna Var7 - znacznik pracy szatera w opcji *Compliance*



Rysunek 1 Schemat układu. Szczegółowy opis w tekście.

Uwaga!

- 1) Ciśnienia są mierzone względem ciśnienia atmosferycznego (p_{atm}). Ciśnienie atmosferyczne można odczytać z przenośnej stacji meteorologicznej.
- 2) Przyjęto, że kierunek przepływu powietrza do płuc (wdech) ma wartość ujemną a z płuc (wydech) dodatnią.

1) Przygotowanie do ćwiczenia

- Włączyć zasilacz i uruchomić program *Ster_oddech*
- Otworzyć zawór *Z*
- Uruchomić model opcją *Start* w programie *Ster_oddech*
- Zaobserwować pracę układu, zlokalizować położenie manometrów, przepływomierza i szatera oraz miejsca odpowiednich pomiarów. Powyższe obserwacje przeprowadzić dla różnych czasów „wdechu” (w zakresie 1000 - 2000 ms) z włączonym i

wyłączonym szaterem oraz przy otwartym i zamkniętym zaworze **Z**. Przyporządkować na wykresie miejsca poszczególnych faz pracy układu (wdech, wydech).

2) Pomiar ciśnień w płucach i opłucnej

- Upewnić się, czy zawór **Z** jest otwarty, a szater wyłączony
- Wybrać 10 cykli oddechowych. W tym celu w oknie programu *Ster_oddech* należy zaznaczyć **N** i wpisać liczbę 10.
- Ustawić czasy trwania „wdechu” i „wydechu” na 1500 ms
- Uruchomić model (*Start*). Po zadanej liczbie cykli układ zatrzyma się automatycznie.
- Zapisać rezultaty przy pomocy opcji *Zapisz pomiar*.
- Zaimportować wyniki do programu *Statistica* i wykonać wykres przedstawiający jednocześnie zmiany ciśnienia w płucach i opłucnej w czasie (dwie krzywe na jednym wykresie). Proszę przedstawić na wykresie około trzech cykli oddechowych. Wykres należy opisać uwzględniając jednostki i uaktualniając legendę, a następnie wkleić do sprawozdania. Przebieg krzywych na wykresie należy skomentować.

3) Spirometria

a. Pomiar całkowitego przepływu powietrza w górnych drogach oddechowych

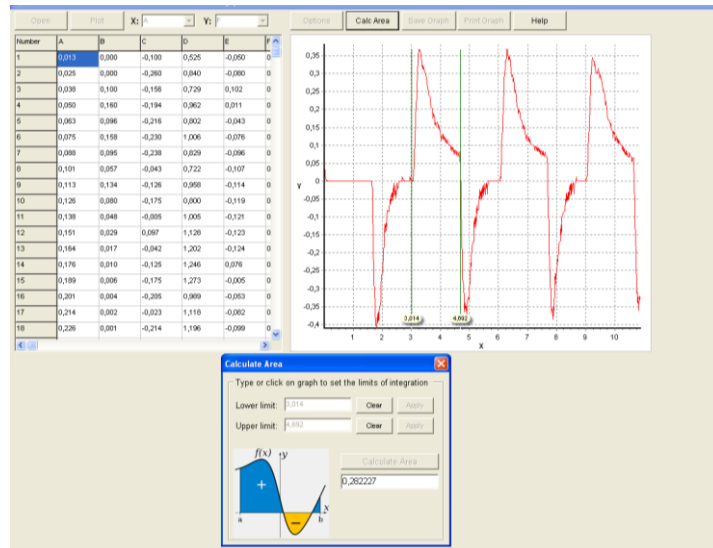
- Wykorzystując wyniki zapisane podczas wykonywania poprzedniego punktu stworzyć wykres przedstawiający przepływ powietrza w ustach. Proszę przedstawić na wykresie około trzech cykli oddechowych.
- Odczytać z wykresu maksymalną wartość przepływu w czasie „wdechu” i „wydechu”.

b. Obliczanie pojemności życiowej płuc (VC)

W tym punkcie należy obliczyć oddzielnie objętości wdychaną i wydychaną w jednym cyklu (obszar pomiędzy krzywą na wykresie przepływu powietrza w ustach w funkcji czasu a osią **X**) i obliczyć ich wartość średnią. Proszę zwrócić uwagę, że w momencie kiedy zaczyna/kończy się wdech/wydech przepływ przyjmuje wartość 0. Aby obliczyć objętości wdychanego i wydychanego powietrza należy posłużyć się programem *Integrate* (Rys. 2):

- Zaimportować zapisany plik używając opcji *Open*.
- Narysować wykres wybierając kolumny **A** oraz **F** odpowiednio jako **X** i **Y**.

- Wybrać opcję **Calc Area** i w pojawiającym się okienku dialogowym określić dolną i górną granicę całkowania (czyli **chwile czasu, pomiędzy którymi należy obliczać powierzchnię pod/nad wykresem**).
- Nacisnąć klawisz **Calculate Area**.
- Wyniki obliczeń umieszczamy w sprawozdaniu i komentujemy.



Rysunek 2 Okno dialogowe programu Integrate.

4) Pomiar ciśnienia w płucach przy użyciu szatera (diagnostyka)

- Ustalić liczbę cykli oddechowych ($N = 10$)
- Ustawić czasy trwania „wdechu” i „wydechu” na 1500 ms
- Włączyć szater (**ON**)
- Uruchomić model (**Start**). Po zadanej liczbie cykli układ zatrzyma się automatycznie.
- Zapisać wyniki (**Zapisz pomiar**)
- Wykonać wykres przedstawiający równocześnie zmian ciśnienia w płucach i ustach w zależności od czasu za pomocą programu **Statistica**. Na wykresie przedstawić maksymalnie 3 cykle oddechowe. Opisany i sformatowany wykres należy wkleić do sprawozdania. Skomentować otrzymane krzywe i reprezentowane przez nie wyniki w kontekście sposobu wykonywania diagnostyki klinicznej. Proszę tak zdefiniować własności krzywych na wykresie, aby po wydruku można było je odróżnić, ale żeby wykres był równocześnie czytelny (linie różnego rodzaju, wyłączyć markery punktów).

5) Wyznaczanie średniej podatności płuc (Compliance)

Termin „podatność” (*compliance*) opisuje sprężystość płuc. Jej miarą jest stosunek przyrostu objętości do wywołującego go wzrostu ciśnienia rozciągającego płuca ($\Delta V/\Delta p$).

- Włączyć zawór sterowany – szater (**ON**); opcja ta powoduje, że podczas wydechu zawór co 0.5 sekundy zamyka wypływ powietrza z dróg oddechowych
- Włączyć opcję **Compliance**
- Ustalić liczbę cykli oddechowych na 5
- Ustawić czasy trwania „wdechu” i „wydechu” na 2500 ms
- Uruchomić pomiar (**Start**); po zadanej liczbie cykli układ zatrzyma się automatycznie
- Zapisać rezultaty (**Zapisz pomiar**)
- Wykonać wykresy przedstawiające ciśnienie w płucach w zależności od czasu dla trzech cykli oddechowych, spośród których należy wybrać jeden „wydech”. Dla wybranego „wydechu” należy odczytać wartości ciśnień w momentach, kiedy szater jest zamknięty, a następnie obliczyć ich zmiany w poszczególnych przedziałach. W celu otrzymania zmian objętości płuc pomiędzy kolejnymi zamknięciami szatera należy dla tego samego „wydechu” obliczyć pola pod wykresem przepływu (scałkować przepływ we właściwych przedziałach czasu, program **Integrate**). Dla ułatwienia określenia granic całkowania została stworzona kolumna **Var7**, której zawartość przyjmuje niezerowe wartości w chwili, kiedy szater jest zamknięty. Dla kolejnych par zmian objętości i ciśnień obliczamy podatności cząstkowe. W sprawozdaniu umieszczamy ich wartość średnią. **Niepewność** szacujemy jako różnicę pomiędzy minimalną i maksymalną otrzymaną wartością.

6) Pletyzmografia

Wyznaczanie objętości pletyzmografu (V_p)

- Odczytać i zanotować wartość ciśnienia atmosferycznego (p_{atm}).
- Otworzyć zawór **Z** i wypełnić powietrzem dołączoną do pletyzmografu strzykawkę. Zanotować objętość powietrza w strzykawce V_s .
- Zamknąć zawór **Z**
- Włączyć opcję **VP START**. Uruchomiony zostanie pomiar ciśnienia w pletyzmografie przy wyłączonej pompie ssącej, czyli wtedy gdy urządzenie pozostaje w spoczynku.
- Wtłoczyć (szybko) zawartość strzykawki do pletyzmografu
- Wyłączyć pomiar (**VP STOP**)

- Odczytać z wykresu (krzywa zielona) największą wartość ciśnienia (p_1) osiągniętą w pletyzmografie podczas wtlaczania powietrza ze strzykawki.
- Wyznaczyć objętość pletyzmografu (V_p) w sytuacji, gdy objętość płuc jest najmniejsza (wydech). Wykorzystując znajomość p_{atm} , p_1 oraz V_s oraz prawo Boyle'a-Mariotte'a (1):

$$p_{atm}(V_p + V_s) = (p_1 + p_{atm})V_p \quad (1)$$

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$V_p = \frac{p_{atm}}{p_1} V_s \quad (2)$$

gdzie:

p_{atm} - ciśnienie atmosferyczne

p_1 - przyrost ciśnienia w zamkniętej kabine pletyzmograficznej po wtłoczeniu zawartości strzykawki,

V_p - objętość powietrza w kabine pletyzmograficznej przy minimalnej objętości modelu płuc („wydech”)

V_s - objętość powietrza w strzykawce

- Wyznaczyć objętość modelu kabiny pletyzmografu w bezpośrednim pomiarze przy użyciu linijki. Proszę obliczyć błąd wyznaczonej w ten sposób objętości.
- Porównać i skomentować wyniki otrzymane przy pomocy obydwu powyższych metod.

IV. Sprawozdanie

Sprawozdanie przygotowane w oparciu o szablon (*Układ oddechowy.dotx*) powinno zawierać:

- 1) Wykres przedstawiający ciśnienie w płucach i opłucnej wraz z komentarzem.
- 2) Maksymalną wartość przepływu powietrza w drogach oddechowych modelu.
- 3) Wykres przedstawiający przepływ powietrza w płucach przy wdechu i wydechu wraz z obliczeniami dotyczącymi objętości wdychanej i wydychanej w jednym cyklu.
- 4) Wykres przedstawiający ciśnienie w płucach i ustach wraz z komentarzem na temat praktycznego zastosowania szatera w pomiarach diagnostycznych.

- 5) Wyniki otrzymane metodą pletyzmograficzną wraz z komentarzem.
- 6) Wyniki pomiarów geometrycznych objętości modelu kabiny pletyzmograficznej z oszacowaniem błędów i komentarzem.

V. Instrukcje obsługi

Instrukcja programu *Statistica*.

Dodatek

Pomiary spirometryczne

Badanie spirometryczne należy do podstawowych badań diagnostycznych układu oddechowego, które służy do oceny wydolności oddechowej człowieka. Ma określić pojemność płuc oraz szybkość przepływu powietrza przez poszczególne odcinki dróg oddechowych podczas wdechu i wydechu. Daje zatem informacje o sprawności wentylacyjnej układu oddechowego. Dzięki temu można określić drożność drzewa oskrzelowego, z orientacyjną lokalizacją miejsca zaburzenia oraz pośrednio nadreaktywność oskrzeli. Wskazaniami do wykonania badania spirometrycznego są choroby układu oddechowego oraz operacje na mięszu płucnym. Spirometria jest również niezbędna do monitorowania procesu leczenia chorób płuc. Wykonanie próby u ludzi zdrowych bywa również użyteczne w ocenie ich predyspozycji do pracy w określonych zawodach lub do uprawiania pewnych sportów.

Badanie polega na pomiarze objętości powietrza wpływającego i wypływającego z układu oddechowego podczas oddychania (cyklu oddechowego). W czasie badania pacjent oddycha poprzez ustnik połączony z aparatem spirometrycznym. Często pacjentowi zakłada się zacisk na nos, który zapewnia, że powietrze oddechowe w całości przechodzi przez ustnik.

Zazwyczaj stosuje się dwa rodzaje testów spirometrycznych: statyczne - objętości oraz dynamiczne - badanie przepływ-objętość. Rezultaty porównuje się z wartościami należnymi, które są uzależnione głównie od wieku, płci i wzrostu badanego oraz od faktu czy jest aktywnym palaczem, byłym palaczem czy osobą niepalącą.

W Polsce dla uzyskanych w testach parametrów stosuje się angielskie skróty ich pełnych nazw. Poniżej przedstawiono opis najbardziej przydatnych parametrów uzyskiwanych w trakcie badania spirometrycznego.

VC (vital capacity - pojemność życiowa) - największa różnica objętości płuc między wdechem i wydechem (*Rys. DI*). W celu jej uzyskania pacjent po kilku spokojnych oddechach wykonuje głęboki, jednostajny wdech, a następnie jednostajny wydech do czasu osiągnięcia plateau wydechowego. Podczas wykonywania tej czynności istotne jest dokładne opróżnienie płuc niezależnie od czasu potrzebnego pacjentowi na zrealizowanie tego procesu. Pomiar VC jest często pomijany, bowiem wymaga dodatkowego badania a zwykle można go zastąpić wskaźnikiem FVC. Wartość diagnostyczna obu parametrów jest podobna.

FVC (forced vital capacity - nasilona pojemność życiowa) - pojemność życiowa mierzona podczas nasilonego wydechu (*Rys. DI*). Za normę przyjmuje się wartości powyżej 80% wartości należnej. W celu uzyskania tego parametru polecamy pacjentowi wykonanie najgłębszego wdechu, a po nim maksymalnie nasilonego (możliwie najszybszego) wydechu aż do całkowitego opróżnienia płuc. Nasilony wydech powinien być wykonany w możliwie najkrótszym czasie. U osób zdrowych różnice pomiędzy VC i FVC są niewielkie, zwykle FVC jest nieco niższe od VC. Różnica ta jest znacząca u osób z obturacją dróg oddechowych.

FEV1 (Forced Expiratory Volume during the first second of expiration – nasilona objętość wydechowa pierwszosekundowa) - objętość powietrza wydychana w ciągu pierwszej sekundy nasilonego wydechu. Wskaźnik ten jest miarą szybkości opróżniania płuc i służy do oceny drożności dróg oddechowych. Ulega zmniejszeniu w chorobach, w przebiegu których dochodzi do zwężenia oskrzeli. Odzwierciedla on stan zarówno dużych jak i małych oskrzeli. Za normę przyjmuje się wartości powyżej 80% wartości należnej.

FEV1%VC (tzw. wskaźnik Tiffeneau) - stosunek FEV1 do VC. Często, podczas badania spirometrycznego, w celu uproszczenia procedury, wykonuje się zwykle tylko manewr nasilonego wydechu. W jego trakcie zmierzone zostaje FVC i FEV1. Z parametrów tych wyliczany jest **wskaźnik FEV1%FVC** nazywany **wskaźnikiem pseudo-Tiffeneau**. Używa się go częściej i zamiennie w stosunku do FEV1%VC. Należy jednak pamiętać, że nawet u osób zdrowych VC jest nieco większe od FVC. U pacjentów ze zmianami obturacyjnymi ta różnica może być jeszcze większa. W efekcie może to prowadzić do zawyżenia wskaźnika Tiffeneau i błędnej diagnozy. Wskaźnik Tiffeneau nie ulega zmianie przy restrykcji, natomiast jest obniżony przy obturacji płuc. Im większe upośledzenie drożności oskrzeli tym jest on niższy. U człowieka zdrowego jego wartość waha się zależnie od wieku w granicach 85% - 65%. Za średnią normę przyjmuje się wartość 70%.

PEF - (Peak Expiratory Flow - szczytowy przepływ wydechowy) oznacza maksymalną szybkość powietrza osiągniętą podczas nasilonego wydechu. Parametr ten dobrze koreluje z FEV1 w astmie oskrzelowej. Korelacja nie występuje natomiast w przebiegu przewlekłej obturacyjnej choroby płuc, w której wskaźnik PEF nie ma wartości diagnostycznej.

FET - (Forced Expiratory Time) oznacza czas trwania nasilonego wydechu.

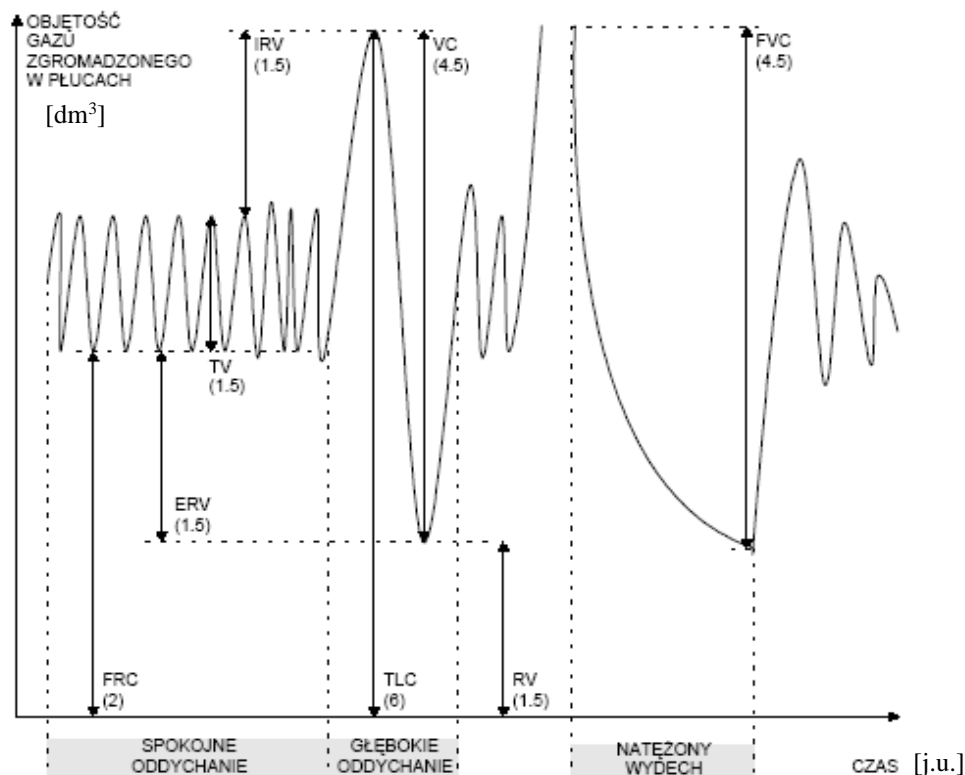
FEF25 - (Forced Expiratory Flow at 25% of FVC) - maksymalny przepływ wydechowy w chwili, gdy wydmuchnięto 25% FVC. Parametr odzwierciedla szybkość przepływu powietrza w początkowej fazie wydechu.

FEF50 - (Forced Expiratory Flow at 50% of FVC) - maksymalny przepływ wydechowy w chwili, gdy wydmuchnięto 50% FVC. Parametr odzwierciedla szybkość przepływu powietrza w środkowej fazie wydechu i informuje o drożności drobnych oskrzeli, czyli o średnicy poniżej 2 mm. Jeżeli u osoby palącej, wartości FEV1 i FEV1%FVC są prawidłowe a wartość FEF50 jest mniejsza od 60% wartości należnej, to oznacza to nieprawidłowy wynik testu drobnych oskrzeli. Zaburzenia w prawidłowym funkcjonowaniu drobnych oskrzeli mogą nawet z kilkuletnim wyprzedzeniem zapowiadać wystąpienie obturacji w drogach oddechowych. Umożliwia to wcześniejsze włączenie profilaktyki antynikotynowej.

FEF75 - (Forced Expiratory Flow at 75% of FVC) - maksymalny przepływ wydechowy w chwili, gdy wydmuchnięto 75% FVC. Parametr opisuje szybkość przepływu powietrza w końcowej fazie wydechu i odzwierciedla drożność najwęższych dróg oddechowych.

FEF2575 - (average flow 25%-75% of FVC) - średni przepływ w środku nasilonego wydechu. Jest to średnia arytmetyczna z przepływów FEF25, FEF50 i FEF75, czyli z przepływów, gdy odpowiednio, 75%, 50% i 25% FVC pozostaje jeszcze do wydmuchnięcia.

Pomiary parametrów FEF nazywane są testami drobnych oskrzeli. Powtarzalność pomiarów tych parametrów jest bardzo mała. Dlatego ich interpretacja powinna być ostrożna. Wskaźniki te są szczególnie przydatne wówczas, gdy przy pozytywnym wywiadzie w kierunku chorób obturacyjnych wymienione wcześniej pozostałe parametry są w normie.



Rys. D1. Objętość gazu zgromadzonego w płucach w zależności od czasu dla różnych sposobów oddychania. Oznaczenia użyte na rysunku omówione są w Tabeli 1.

Tabela 1 Opis oznaczeń użytych na Rys. D1. Ostatnia kolumna pokazuje typowe wartości dla poszczególnych parametrów.

| | | |
|-----------------|--|---------------------|
| TV | Objętość oddechowa. Objętość powietrza wdychana (lub wydychana) przy jednym wdechu (lub wydechu) | 0.4 dm ³ |
| IRV | Zapasowa objętość wdechowa. Największa objętość powietrza, które może być wciągnięte do płuc poczynając od szczytu spokojnego wdechu. | 3.6 dm ³ |
| ERV | Zapasowa objętość wydechowa. Największa objętość powietrza, które może być wydychane z płuc poczynając od szczytu spokojnego wydechu. | 1.2 dm ³ |
| VC (FCV) | Pojemność życiowa. Maksymalna objętość powietrza, które może być wydychane z płuc po głębokim wdechu. | 4.8 dm ³ |
| FRC | Czynnościowa pojemność zalegająca. Objętość powietrza znajdującego się w płucach w chwili zakończenia spokojnego wydechu. | 2.4 dm ³ |
| RV | Objętość zalegająca. Objętość gazu pozostająca w płucach po głębokim wydechu. | 1.2 dm ³ |
| TLC | Całkowita pojemność płuc. Całkowita objętość powietrza znajdującego się w płucach w chwili ukończenia najgłębszego wdechu. | 6.0 dm ³ |