

Prof. dr hab. Krzysztof Warmuziński
Instytut Inżynierii Chemicznej PAN
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

28 października 2014

RECENZJA

pracy doktorskiej Pani lek. med. Magdaleny Kyci-Marków
Analiza przepływu powietrza w krtani przy pomocy obliczeniowej
dynamiki płynów (Computational Fluid Dynamics, CFD)

Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska Pani lek. med. Magdaleny Kyci-Marków poświęcona jest analizie przepływu powietrza w górnych drogach oddechowych pacjentów, którzy poddani zostali częściowej arytenoidektomii z chordektomią tylną; wskazaniem do tego zabiegu było obustronne porażenie fałdów głosowych.

Badania wykorzystywane w diagnozowaniu patologii w obrębie górnych dróg oddechowych obejmują tomografię komputerową, rezonans magnetyczny, laryngoskopię i wideolaryngoskopię oraz spirometrię. Żadna ze stosowanych obecnie metod nie umożliwia jednak pełnej, dynamicznej wizualizacji parametrów przepływu powietrza w górnych drogach oddechowych (przede wszystkim w obrębie krtani). Przyczyny dysfunkcji krtani mogą mieć podłoże strukturalne, związane z upośledzeniem morfologicznym tego narządu, lub

funkcjonalne, wynikające z czynnościowych nieprawidłowości w obrębie jej struktur.

Określenie wpływu prędkości powietrza, ciśnienia oraz oporów przepływu w górnych drogach oddechowych na efektywność wentylacji, funkcje krtani oraz subiektywne poczucie komfortu jest zadaniem trudnym. Trudne jest również określenie ilościowych relacji między morfologią krtani a tymi parametrami. Obliczeniowa dynamika płynów (CFD) stwarza możliwość powiązania struktury anatomicznej górnych dróg oddechowych z charakterystycznymi cechami dynamiki przepływu, a tym samym pewnej obiektywizacji wpływu tych cech na komfort oddechowy pacjenta.

Obliczeniowa dynamika płynów (CFD) jest gałęzią mechaniki płynów stosującą metody numeryczne do rozwiązywania problemów związanych z przepływem gazów i cieczy. W szczególności, obliczeniowa dynamika płynów umożliwia określenie pól prędkości i ciśnień w układach o złożonej geometrii. Podstawą ilościową CFD są równania Navier-Stokesa, oparte na zasadzie zachowania masy i pędu poruszającego się płynu. Choć historia tych równań ma już blisko 200 lat, pozostają one wciąż poważnym problemem matematycznym, a ich rozwiązanie (poza najprostszymi przypadkami) możliwe jest jedynie na drodze numerycznej.

Biorąc pod uwagę geometryczną złożoność górnych dróg oddechowych, a zarazem znaczny stopień trudności i inwazyjności rzeczywistych testów obejmujących ten fragment układu oddechowego doktorantka słusznie dostrzega olbrzymi potencjał analityczny i diagnostyczny, tkwiący w CFD. Przedmiotem jej rozważań jest zatem analiza przepływu powietrza w obszarze głośni u pacjentów z obustronnym porażeniem fałdów głosowych (BVFP), będącym wynikiem uszkodzenia nerwów krtaniowych wstecznych lub zwichnięcia stawu

pierścienno-nalewkowego. Rozpoznanie BVFP można dokonać na podstawie badania laryngoskopowego, stroboskopowego, spirometrycznego lub elektromiografii.

Wybór metody leczenia BVFP nie jest oczywisty wobec mnogości dostępnych technik. Doktorantka stwierdza, że bardzo dobre wyniki daje poszerzenie głośni metodą arytenoidektomii z chordektomią tylną, wykonane z użyciem lasera. Jak jednak podkreśla, w codziennej praktyce brak jest badania, które umożliwiłoby jednocześnie określenie cech morfologicznych krtani oraz dynamicznych parametrów przepływu powietrza, mających również wpływ na pre- i postoperacyjny komfort wentylacyjny pacjenta. Zdaniem doktorantki, potwierdzonym obszernymi studiami literaturowymi, lukę tę wypełnić może (przynajmniej częściowo) obliczeniowa dynamika płynów.

Pani lek. med. Magdalena Kycia-Marków stawia sobie zatem następujące cele:

- wizualizację przepływu powietrza w obszarze głośni u osób poddanych operacji poszerzenia szpary głośni z powodu obustronnego porażenia fałdów głosowych
- ilościowe określenie wpływu parametrów geometrycznych krtani po zabiegu poszerzenia szpary głośni na warunki przepływu powietrza przez analizowany fragment dróg oddechowych (ze szczególnym uwzględnieniem wielkości szpary głośni)
- wykonanie analizy ankietowej, dotyczącej komfortu oddechowego chorych przed i po zabiegu poszerzenia szpary głośni, oraz oparta na tej analizie ocena przydatności laserowej arytenoidektomii z chordektomią tylną

Badania obejmowały 24 chorych, którzy byli leczeni operacyjnie z powodu obustronnego porażenia fałdów głosowych; grupę kontrolną stanowiło 5 osób. Badanie krtani wykonywano przy pomocy wideolaryngoskopu połączonego z kamerą i monitorem, w fazie swobodnego oddechu oraz fonacji. Pomiar powierzchni szpary głóśni prowadzono przy maksymalnym odwiedzeniu fałdów głosowych, wyznaczając jednocześnie wielkości niezbędne do wykonania obliczeń CFD: obwód szpary głóśni, długość odcinka łączącego dwa skrajne punkty na obwodzie oraz tzw. cyrkularność, określającą stopień deformacji światła krtani w stosunku do przekroju kołowego. Doktorantka wykonuje również badania spirometryczne, obejmujące podstawowe parametry wydechowe – natężoną pojemność życiową (FVC), natężoną objętość wydechową pierwszosekundową (FEV1) oraz szczytowy przepływ wydechowy (PEF). Także i te wielkości, po stosownej transformacji, stają się istotnymi parametrami zasilającymi model hydrodynamiczny będący fundamentem obliczeń CFD.

Należy w tym miejscu podkreślić, że jakość obliczeń CFD, a tym samym ich walor poznawczy i użytkowy, zależy w znacznym stopniu właśnie od jakości danych geometrycznych i hydrodynamicznych. Doktorantka jest tego w pełni świadoma i do procesu pozyskiwania danych podchodzi niezwykle starannie, starając się nie wykraczać poza dopuszczalny margines błędów pomiarowych. Pani lek. med. Magdalena Kycia-Marków zdaje sobie sprawę z faktu, że konieczne jest dokonanie pewnych wstępnych założeń upraszczających mających na celu zapewnienie, z jednej strony, funkcjonalności modelu CFD, zaś z drugiej – wiarygodności obliczeń. Racjonalne podejście do relacji między stosowanym opisem ilościowym a stopniem dokładności danych pomiarowych zasilających ten opis jest jednym z istotnych walorów rozprawy.

Doktorantka podejmuje także próbę obiektywizacji oceny głosu i komfortu wentylacyjnego w oparciu o obszerne badania ankietowe, choć próba ta nie kończy się pełnym sukcesem – rozprawa nie zawiera statystycznie uzasadnionej relacji między spadkiem ciśnienia w obrębie głośni (wyliczonym metodą CFD) a wynikami ankietyzacji.

Najistotniejszym, oryginalnym elementem pracy jest wskazanie możliwości diagnostycznych oferowanych przez obliczeniową dynamikę płynów. Doktorantka prezentuje nowatorskie podejście do pooperacyjnej ewaluacji pacjentów, proponując zastosowanie ścisłych metod opisu ilościowego. Podejście to może być także użyteczne w planowaniu zabiegów dotyczących górnych dróg oddechowych, dając pewne wskazówki związane z rozległością interwencji operacyjnej. Cenne jest stwierdzenie, że istnieje pewna graniczna wartość powierzchni szpary głośni, poniżej której następuje gwałtowne upośledzenie wydolności oddechowej. Mimo szeregu uproszczeń związanych z metodą CFD (dotyczących przede wszystkim geometrii badanych układów) doktorantka uzyskuje obraz przepływu powietrza przez szparę głośni oraz w jej sąsiedztwie, który byłby niezwykle trudny lub wręcz niemożliwy do uzyskania metodami klasycznymi (między innymi rozkład prędkości i ciśnień przed i za głośnią, a tym samym obszary zalegania powietrza i upośledzonej wentylacji). Barwną wizualizacją rozkładów prędkości i ciśnień objęto podstawowe, uproszczone struktury geometryczne płaszczyzny głośni (trójkąt równoramienny, trójkąt prostokątny oraz półelipsę), zarówno dla pacjentów pooperacyjnych, jak i dla osób z grupy kontrolnej. Należy przy tym podkreślić, że wyników uzyskanych metodą CFD nie można uzyskać relatywnie prostszym równaniem Bernoulliego czy fenomenologiczną zależnością Darcy-Weisbacha (o ogólnej postaci identycznej z wyprowadzoną przez doktorantkę korelacją na str. 36). Równanie Bernoulliego zakłada bowiem między innymi, że płyn jest nieściśliwy i pozbawiony lepkości, a sam przepływ jest bezwirowy.

W przypadku równania Darcy-Weisbacha promieniowy rozkład prędkości płynu powinien być całkowicie płaski (prędkość powietrza przy krawędzi szpary głośni powinna być taka sama, jak w jej osi), co z pewnością nie ma miejsca w badanych przypadkach. Opis przy pomocy CFD nie wymaga tego typu uproszczeń.

Rozprawa doktorska Pani lek. med. Magdaleny Kyci-Marków stanowi również bardzo dobry punkt wyjścia do dalszych badań w dziedzinie wizualizacji i opisu ilościowego złożonych zjawisk hydrodynamicznych w obrębie górnych dróg oddechowych. Korzystając z możliwości tworzenia wiernych modeli złożonych struktur przy pomocy druku trójwymiarowego, można dokonać wszechstronnej weryfikacji rozmaitych parametrów występujących w algorytmie CFD bez uciekania się do czasochłonnych i kłopotliwych badań na pacjentach.

Analiza CFD prowadzi do szeregu interesujących wniosków. Przede wszystkim okazuje się, że istnieje pewna graniczna wartość powierzchni szpary głośni, poniżej której następuje gwałtowny wzrost oporów przepływu powietrza przez głośnię. Widać to bardzo wyraźnie na rysunkach 14, 15 i 16, na których punkty dla rozmaitych kształtów geometrycznych głośni, a także dla zdrowych osób z grupy kontrolnej układają się wzdłuż krzywych silnie rosnących poniżej pola przekroju równego 40 mm^2 . Choć samą wartość liczbową należy traktować bardzo ostrożnie, przebieg krzywych obrazujących relacje między oporami i prędkościami w obszarze głośni sugeruje przypadki, w których interwencja chirurgiczna może przynieść znaczące efekty.

Raz jeszcze należy podkreślić nowatorski charakter pracy. O ile ta faza badań wiąże się jeszcze z pewnymi uproszczeniami (np. stosunkowo prosty model geometryczny szpary głośni i obszarów przyległych, założenie nieelastyczności ścian górnych dróg oddechowych), o tyle pole do dalszych prac jest znaczne,

włącznie z wykonaniem przynajmniej części badań dotyczących oporów przepływu na wiernym modelu górnych dróg oddechowych, uzyskanym metodą druku trójwymiarowego.

Przedstawione poniżej uwagi szczegółowe nie obniżają wysokiej oceny rozprawy.

(1) Niejasny jest cel badań ankietowych (Rozdział 3.2.5) – doktorantka nie konfrontuje wyników tych badań (opartych na subiektywnej ocenie głosu i komfortu oddechowego przez samych pacjentów) z ilościowymi wnioskami uzyskanymi przy pomocy CFD

(2) Grupa kontrolna składała się wyłącznie z osób zdrowych. Niezwykle cenne byłoby porównanie stanu przed- i pooperacyjnego u tych samych pacjentów, również przy zastosowaniu CFD jako narzędzia ilościowej oceny efektów leczenia

(3) Praca zawiera pewną ilość drobnych nieścisłości i usterek typograficznych:

- *Lichtenberger Needle Career* – powinno być *Carrier* (str. 10, 11, 17)
- *latelarization* – powinno być *lateralization* (str. 14)
- w cytowanym na str. 15 równaniu Navier-Stokesa należy zróżnicować symbole oznaczające prędkość i lepkość oraz zastąpić laplasjan (Δ) operatorem nabra (∇); podany wymiar dotyczy lepkości dynamicznej, a nie kinematycznej
- w Tab. III wartości PEF i w_{wlot} określano w oparciu o pomiary spirometryczne (str. 31)
- *szpary głośni* a nie *kształtu głośni* (str. 36)
- drugi wzór na str. 36 powinien mieć postać $Q = w_{wlot} \cdot S$
- w podpisie pod Ryc. 16 wartość w_{wlot} powinna wynosić 0,169 m/s, a nie 169 m/s (str. 37)

Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa skonstruowana jest w sposób logiczny i konsekwentny, dowodząc wiedzy i umiejętności badawczych kandydatki. Zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej wnioski zaproponowane przez Panią lek. med. Magdalenę Kycię-Marków stanowią istotny postęp w opisie złożonych zjawisk hydrodynamicznych w obrębie górnych dróg oddechowych. Doktorantka wybrała zagadnienie niezwykle oryginalne, a zarazem złożone ze względu na silnie interdyscyplinarny charakter. Coraz liczniejsze publikacje związane z prezentowanymi badaniami również dowodzą wagi i oryginalności podjętej tematyki, a uzyskane wyniki stanowią bardzo dobrą podstawę dalszych prac.

W tej sytuacji, zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz w Ustawie z dnia 27 lipca 2005 – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. Nr 164, poz. 1365, z późn. zm.), bez zastrzeżeń wnoszę o dopuszczenie kandydatki do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

