

Tomasz Fąs

**Narzędzia oceny właściwości mechanicznych tkanki z obrzękiem limfatycznym.
Zastosowanie metod: wglębnikowej z modelem membranowym
oraz pletyzmografii powietrznej**

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem:
prof. dra hab. inż. Mariusza Kaczmarka

Cel badań:

Celem rozprawy jest propozycja i badanie dwóch narzędzi pomiarowych: metody wglębnikowej z modelem membranowym i pletyzmografii powietrznej, rozwijanych pod kątem wspomagania diagnostyki chorób obrzękowych – szczególnie obrzęku limfatycznego.

Model wciskania wglębniaka w membranę z warstwą nieściśliwej cieczy, może stanowić trafne przybliżenie badania wglębnikowego, realizowanego na kończynie osoby dotkniętej wczesnym stadium obrzęku limfatycznego. W tym kontekście model tego rodzaju nie był wcześniej rozważany i warto sprawdzić jego przydatność.

Pletyzmografia powietrzna była wcześniej wykorzystywana przy możliwie niskich ciśnieniach (poniżej 10 mmHg), minimalizujących wpływ samego nacisku na badaną kończynę. W pracy zaproponowano wersję wysokociśnieniową (do 120 mmHg), mającą połączyć działanie nacisku pneumatycznego z badaniem właściwości tkanki uciskanej. Prace badawcze obejmowały projekt urządzenia, konstrukcję prototypów oraz weryfikację ich możliwości pomiarowych.

Praca stawia następujące hipotezy badawcze:

1. Model membranowy może stanowić podstawę dla wyznaczenia modułu Younga cienkiej powłoki, rozpiętej nad ciałem nieściśliwym, którego moduł Younga jest znacznie niższy (stanowi to przybliżenie modelu skóry na tkance podskórnej wypełnionej płynem);
2. Możliwa jest konstrukcja urządzenia, realizującego pletyzmograficzny pomiar zmian objętości przy ciśnieniach właściwych dla terapii uciskowej (do 120 mmHg).

Przeprowadzone badania:

W pracy sformułowano matematyczny model membrany, wyprowadzony z równań mechaniki ośrodków ciągłych. Szczególny przypadek zadania (membrana z nieściśliwą cieczą

pod spodem poddawana naciskom wgłębnika wchodzącego na określoną głębokość) został rozwiązany metodami numerycznymi w środowisku Matlab z wykorzystaniem algorytmu Rungego-Kutty. Wprowadzono dwie wersje warunku brzegowego dla kontaktu między membraną a wgłębnikiem: poślizg idealny i brak poślizgu (membrana przylegająca do wgłębnika). Dla membrany przyjęto materiał neo-Hookowski.

Dla walidacji uzyskanych wyników wykonano dwa stanowiska pomiarowe:

- stanowisko do wstępnego napinania membrany;
- stanowisko do testów wgłębnikowych;

oraz fizyczny model do zamocowania membrany na zbiorniku z wodą. Narzędzia badawcze umożliwiały pomiar siły nacisku membrany na wgłębnik oraz ciśnienia w cieczy pod membraną.

Dla potwierdzenia hipotezy, dotyczącej wysokociśnieniowej pletyzmografii powietrznej, opracowano rozbudowaną procedurę pomiaru pletyzmograficznego, uwzględniającą możliwość wprowadzenia korekt, wynikających ze zmian temperatury powietrza w układzie oraz wstępną kalibrację z wykorzystaniem zasobnika na sprężone powietrze.

Zgodnie z opracowanymi procedurami przygotowano trzy prototypy urządzenia pomiarowego w różnych konfiguracjach:

- pletyzmograf z kalibracją manualną (wersja 1);
- pletyzmograf z kalibracją klasyczną i pomiarem temperatury (wersja 2);
- pletyzmograf z kalibracją automatyczną (wersja 3).

Dla weryfikacji skuteczności pomiarowej przygotowanych prototypów sporządzono fizyczny model, symulujący kończynę. Model składał się ze zbiornika z wodą, wykonanego z elastycznego tworzywa sztucznego (umożliwiającego przenoszenie nacisku na ciecz), który za pośrednictwem zaworu dławiącego połączono z osobnym zasobnikiem, wyposażonym w podziałkę umożliwiającą bezpośredni pomiar objętości wyciśniętej cieczy.

Ostatni etap testów stanowiły próby dla modelu, w którym gąbka reprezentowała tkankę miękką oraz dla łydki osoby prowadzącej badanie. Na podstawie wyników tych testów zaproponowano prostą procedurę estymacji modułów Younga badanych materiałów.

Rezultaty i wnioski:

Walidację symulacji numerycznych dla modelu membranowego przeprowadzono porównując jej wyniki z wynikami eksperymentalnymi, przy wykorzystaniu wcześniej wyznaczonych wartości modułu Younga. Testy walidacyjne wykazały istotną zgodność przewidywań teoretycznych z wynikami eksperymentalnymi ($R^2 = 0,97$ lub więcej).

Testy wykazały, że model membranowy z warstwą nieściśliwej cieczy może być wykorzystany w projektowaniu testów diagnostycznych i dyskusji ich wyników dla tkanek obrzękowych - szczególnie dla początkowego etapu obrzęku limfatycznego.

Warto rozwijać badania nad doskonaleniem oprzyrządowania, umożliwiającego prowadzenie prób wgłębnikowych na kończynach pacjentów i obiektywizację ich wyników.

Pletyzmograficzne pomiary zmiany objętości były zbliżone do wyników pomiarów bezpośrednich. Różnica nie przekraczała 0,8% całkowitej objętości pod mankietem kompresyjnym. Badania wykazały, że pletyzmograf z kalibracją automatyczną (prototyp w wersji 3) może być także wykorzystywany do wyznaczania modułu Younga badanego ciała fizycznego.

Uzyskane wyniki dają nadzieję, że wysokociśnieniowa pletyzmografia powietrzna znajdzie zastosowanie w diagnostyce i terapii osób cierpiących na obrzęk limfatyczny. Dalsze prace, zmierzające do automatyzacji urządzenia, mogą sprawić, że użytkownik końcowy będzie miał możliwość wykonania zabiegu bez pomocy personelu medycznego.

Zasadne jest prowadzenie badań z mankietami o większej i bardziej złożonej konstrukcji. Warto również rozważyć wprowadzenie oporowych czujników nacisku, jako stałego elementu kolejnych wersji urządzenia. Elementy te mogą zwiększyć skuteczność zabiegu i rozszerzyć zakres zastosowań urządzenia.

W pracy ograniczono się przede wszystkim do testów na modelach fizycznych. Następny etap badań powinien obejmować próby z udziałem pacjentów dotkniętych obrzękiem limfatycznym przy asyście personelu medycznego.

Uzyskane wyniki i sformułowane wnioski pozwalają uznać, że przyjęte w rozprawie hipotezy zostały potwierdzone.

Słowa kluczowe: obrzęk limfatyczny, próba wgłębnikowa, model membranowy, pletyzmografia powietrzna, terapia kompresyjna