УДК 51-7

КОМП'ЮТЕРНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКО-ПРУЖНОГО ДЕФОРМУВАННЯ КРОВОНОСНИХ СУДИН ЛЮДИНИ

***Н. О. Фоменко*[1]**, *О. О. Ларін*[2]

[1] *магістрант кафедри Динаміка та міцність машин, НТУ «ХПІ», Харків, Україна*
[2] *професор кафедри Динаміка та міцність машин, док. техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Україна*
Nataliia.Fomenko@infiz.khpi.edu.ua
oleksiy.larin@khpi.edu.ua

Кровоносні судини утворюють одну з найскладніших та найважливіших систем в організмі людини, котра схильна до різноманітних ризиків та погано піддається лікуванню. Вдосконалення якості тканинних трансплантатів, які активно використовуються в кардіохірургії, а також планування операцій потребують моделей з теоретичними розрахунками, а для цього необхідно розробляти нові математичні моделі. Останні роботи з цієї теми [1-6] показують, що для адекватного моделювання поведінки стінок судин раціонально застосовувати в'язко-пружні моделі, наприклад, серію Проні. Це дає змогу наблизити теоретичні розрахунки до практичних.

Метою роботи є дослідження циклів в'язко-пружного деформування біфуркації аорти людини в умовах її нормальної роботи, на основі алгоритму комп'ютерного моделювання, яке дозволяє варіативний параметричний автоматизований аналіз для різних геометричних характеристик моделі.

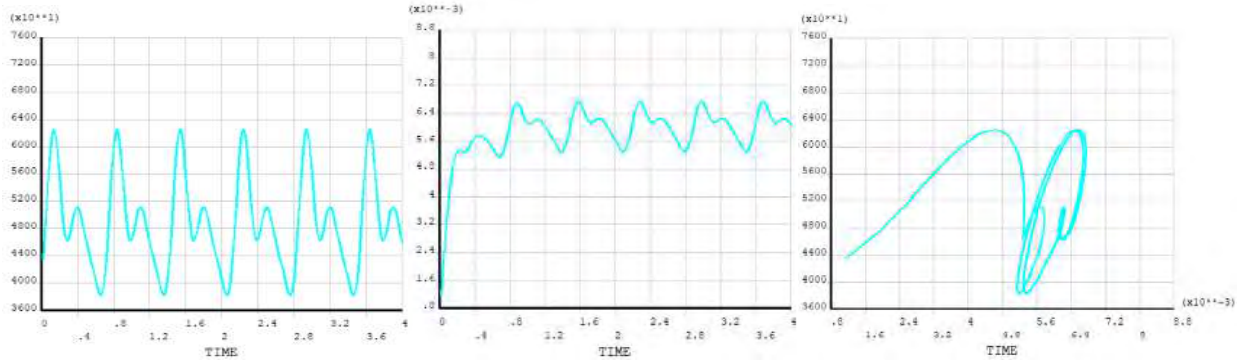
Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі. Розробити математичну постановку задачі комп'ютерного аналізу в'язко-пружного деформування біологічних м'яких матеріалів (провести тестові розрахунки для об'єктів схематизованої простої геометрії); побудувати параметризовану геометричну модель біфуркації аорти людини; нанести розрахункові скінчено-елементі сітки та граничні умови і навантаження; провести дослідження якості розрахункової сітки та оцінити похибку; провести комплекс варіативних розрахунків на основі запропонованої параметризованої моделі для різних геометричних видів біфуркації аорти людини.

В даній роботі аорта моделювалась як оболонка, тому враховувалися основні гіпотези технічної теорії розрахунку оболонок: статична та кінематична гіпотези. Розв'язувалась така система рівнянь: 5 рівнянь рівноваги, 3 рівняння, що задають залежність напружень від деформацій та 6 фізичних рівнянь. В'язко-пружні властивості матеріалу були реалізовані у вигляді серії Проні. В роботі описаний метод скінченних елементів для задач в'язко-пружності, та в теорії розрахунку оболонок.

Розроблено алгоритм побудови геометричної моделі біфуркації аорти людини, на основі якого за допомогою командної мови APDL ANSYS написаний макрос, що автоматизує цю побудову, а також значно її спрощує.

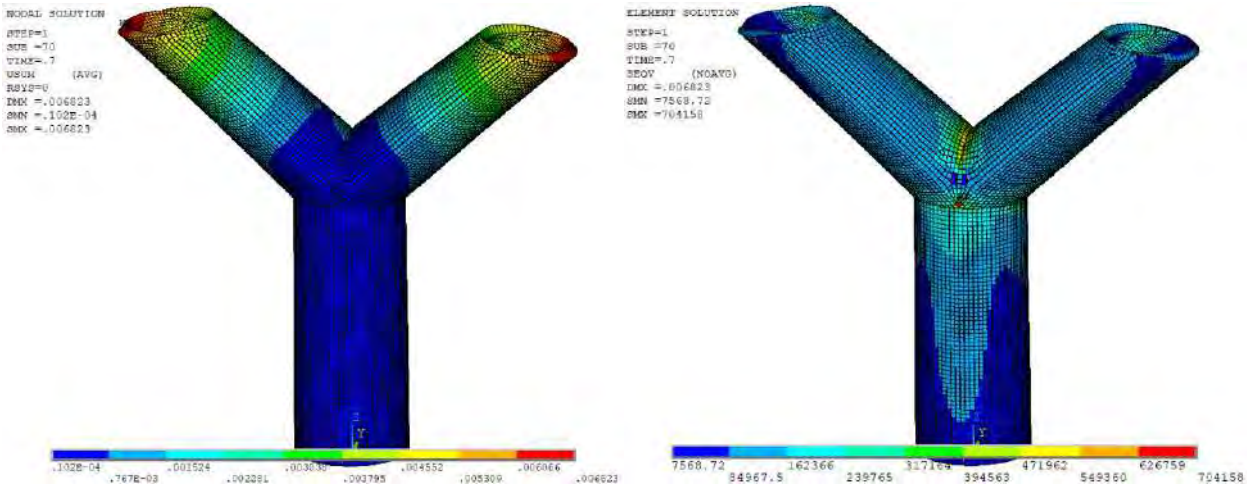
Створено декілька моделей з різною геометрією, прикладено граничні умови і тиск, який відповідає нормальному артеріальному тиску дорослої людини. На кожну з моделей нанесено різні розрахункові скінчено-елементі сітки (від 2000 до 20000 елементів). Проведено статичний аналіз. Дослідження якості сітки показали, що збільшення числа скінченних елементів до 16000-20000 забезпечує доволі густу сітку, що в свою чергу мінімізує відносну похибку, яка наприклад, склала 2.1% для еквівалентних напружень по Мізесу, та 0,001% для сумарних переміщень. В одному з варіантів навантаження до розрахункової моделі було прикладено тиск, заданий у

вигляді функції, який є максимально подібним тому, що діє в аорті. Результати зображені на рисунках 1, 2.



а б в

Рис. 1 – Задання тиску крові по сфігмограмі: а – залежність напружень від часу (за 4 с.); б – залежність деформацій від часу (за 4 с.); в – залежність напружень від деформацій



а б

Рис.2 – Результати: а – векторна сума переміщень; б – еквівалентні напруження по Мізесу

Список літератури:

1. Y. Zou and Y. Zhang, “The orthotropic viscoelastic behavior of aortic elastin,” Biomech. Model. Mechanobiol., vol. 10, no. 5, pp. 613–625, 2011.

2. A. V. Kamenskiy et al., “Biaxial mechanical properties of the human thoracic and abdominal aorta, common carotid, subclavian, renal and common iliac arteries,” Biomech. Model. Mechanobiol., vol. 13, no. 6, pp. 1341–1359, 2014.

3. A. Karimi, A. Shojaei, and R. Razaghi, “Viscoelastic mechanical measurement of the healthy and atherosclerotic human coronary arteries using DIC technique,” Artery Res., vol. 18, pp. 14–21, 2017.

4. T. Plonek et al., “The combined impact of mechanical factors on the wall stress of the human ascending aorta - a finite elements study,” BMC Cardiovasc. Disord., vol. 17, no. 1, Dec. 2017.

5. M. Amabili, P. Balasubramanian, and I. Breslavsky, “Anisotropic fractional viscoelastic constitutive models for human descending thoracic aortas,” J. Mech. Behav. Biomed. Mater., vol. 99, no. April, pp. 186–197, 2019.

6. M. Amabili, P. Balasubramanian, I. Breslavsky, G. Ferrari, and E. Tubaldi, “Viscoelastic characterization of woven Dacron for aortic grafts by using direction-dependent quasi-linear viscoelasticity,” J. Mech. Behav. Biomed. Mater., vol. 82, no. February, pp. 282–290, 2018.