

грації для об'єднання можливостей спеціалізованого і універсального програмного забезпечення.

Список літератури. 1. Фізика взрива / Под ред. К.П.Станюковича. – М.: Наука, 1975. 2. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А., Степанов Г. В., Кривенюк В. В. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / НАН Украины. Ин-т пробл. прочности. – К.: – 2000. – 366 с. 3. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х. Р., Гришук Л.Б., Куран Д.Р. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с. 4. Харченко В.В., Майстренко А.П., Бабуцкий А.И., Кондряков Е.А. Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении // Проблемы прочности. – 2002. – №3. – С.86-91. 5. Горельский В.А. Численное моделирование при ударе по нормали и под углом к поверхности преграды // Проблемы прочности. – 2002. – №3. – С.109-113. 6. Степанов Г.В., Зубов В.И., Токарев В.М., Дроздов А.В., Клепачко Я.Р. Прочность тонколистового элемента конструкции из композиционного материала при ударном растяжении // Проблемы прочности. – 2001. – №1. – С.38-48. 7. Садовский В.М. К теории ударных волн в сжимаемых пластических средах // Изв. РАН. Мех. тверд. тела. – 2000. – №5. – С.87-95. 8. Композиционные материалы. Справочник. // В.В.Васильев., В.Д.Протасов., В.В.Болотин. и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с. 9. Боровков А.И. Возможности системы конечно-элементного моделирования ANSYS/LS-DYNA // Первая междунар. Конф. пользователей програмного обеспечения ANSYS. 22-23 октября 2003 г. ЕМТ-ANSYS-центр, Москва. Dynamical contact interaction. 10. L.L.Clements, R.L.Moore. Composite properties for E-glass in a room temperature curable epoxy matrix. Lawrence Livermore laboratory, 1977. 11. L.L.Clements, R.L.Moore. Composite properties for S-2-glass in a room temperature curable epoxy matrix. Lawrence Livermore laboratory, 1978. 12. L.L.Clements Problem intesting aramid/epoxy composites. Lawrence Livermore laboratory, 1977.

Поступила в редколлегию 11.01.2006

УДК 539.3:612.76

М.А.ТКАЧУК, докт. техн. наук, **Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**, НТУ “ХПІ”,
В.К. ПІОНТКОВСЬКИЙ, Інститут патології хребта та суглобів
ім. професора Сітенка

БІОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ: УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ОПИС

Стаття присвячена проблемі розвитку узагальненого параметричного підходу для дослідження елементів біомеханічних систем. Були розроблені параметричні моделі, що дозволяють змінювати конструкції ендопротезів, властивості елементів біомеханічних систем та робити обґрунтований вибір ендопротезу за критеріями міцності та жорсткості у відповідності з властивостями живих тканин.

The paper is devoted to the problem of development of generalized parametrical approach to research of biomechanical systems elements. Parametric models has been worked out allow to vary endoprosthesis constructions, properties of the elements of biomechanical systems and perform the based choice of endoprosthesis on the criteria of firmness rigidity and accordance with the properties of live tissues.

Стан проблеми. На даний час підвищення ефективності оперативного втручання для ендопротезування опорно-рухового апарату стримується відсутністю засобів передопераційного моделювання самої операції, розрахунків

міцності та жорсткості елементів, а також прогнозування поведінки опорно-рухового апарату після операції в реальних умовах життєдіяльності людини. В той же час росте потреба в таких операціях в усьому світі. Це приводить до необхідності розробляти принципово нові схеми операцій. Параметри ендопротезів та схеми оперативного втручання при цьому відпрацьовуються протягом тривалого часу. В той же час при цьому утруднено врахування індивідуальних особливостей пацієнта. Всі ці проблеми може усунути комп'ютерне об'ємне параметричне моделювання.

У НТУ „ХПІ” та Інституті патології хребта та суглобів ім. проф. Сітенка протягом останніх десятиріч склалися наукові школи та колективи, які значно просунулися у вирішенні даної актуальної наукової проблеми.

При розв'язанні задачі враховувалися наступні найбільш вагомні світові досягнення в даній галузі: розроблені потужні системи ендопротезів різних типів для оперативного лікування травм та патологій хребта та комп'ютерного моделювання (CAD: Pro/ENGINEER, CATIA, UG, SolidWorks); створені системи комп'ютерного скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану (CAE: ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA-3D, Pro/MECHANICA); розроблено методи дослідження напружено-деформованого стану елементів хребта; створені комп'ютерні системи навігації при проведенні мікрохірургічних операцій. Вчені США, Європи, Японії, Канади та країн СНД приділяють багато уваги розробці моделей та методів проектування та дослідження елементів хребта, ендопротезів різних типів.

На цю тему є багато публікацій в журналах ASME Journal of Biomechanical Engineering (ASME), The Spine Journal (Lippincott Williams & Wilkins), European Spine Journal (Springer-Verlag Heidelberg), Journal of Biomechanics (Elsevier), Journal of Orthopaedic Research (Elsevier), Computer Methods and Programs in Biomedicine (Elsevier), Computerized Medical Imaging and Graphics (Elsevier). Розробкою та виготовленням ендопротезів займаються фірми DePuy Spine, Disc Dynamics, Abbott.

Окремий бік проблеми – розробка систем комп'ютерного моделювання та дослідження складних систем. Фірми PTC, Dassault Systems, UGS, LSTC, ANSYS Inc, MSC Software розробили потужні комп'ютерні системи Pro/ENGINEER, CATIA, UG, SolidWorks, ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA3D, Pro/MECHANICA. Вони являють собою потужні інструменти для створення параметричних моделей складних механічних систем.

Постановка задачі. Аналіз вітчизняної і зарубіжної літератури останнього десятиліття показав, що кількість матеріалів (і конструктивних рішень), що використовуються як заміники біологічних тканин, зокрема для протезування дефектів хребетного стовпа, постійно збільшується. Основна мета хірургічного втручання полягає в отриманні більшої механічної стабільності, підвищенні ймовірності утворення кісткового блоку і поліпшенні клінічних результатів [1, 2].

Велике розповсюдження операцій ендопротезування, які використовуються при захворюваннях і пошкодженнях хребта, коли виникає необхідність видалити його частину і замінити дефекти, що утворилися, а також відносно великий процент незадовільних результатів, визначають жорсткі вимоги до ендопротезів хребта: зберігання корекції деформації, відновлення і зберігання опорної функції не викликаючи негативних наслідків (реакцій тіл хребців), травмування тіл хребців, які розміщені вище і нижче встановленого ендопротеза [3]. Остання вимога може бути реалізована тільки за умови, коли механічні характеристики ендопротеза рівні або близькі до механічних характеристик тіл хребців конкретного пацієнта.

У зв'язку з вищезгаданим є необхідність урахування при оперативному лікуванні індивідуальних особливостей пацієнтів і обґрунтованого підбору конструкцій і параметрів ендопротезів. Це дозволить успішно проводити операції навіть в тих випадках, які до теперішнього моменту були неоперабельні. У ідеальному випадку необхідно врахувати всі особливості кожної конкретної патології. Природно, це неможливо. Тому гостро стоїть питання урахування мінімально можливої кількості параметрів для обґрунтованого підбору конструкції і параметрів ендопротеза.

Основна проблема, що на даний час не вирішена – відсутність методів вирішення проблеми синтезу оптимальних ендопротезів та схем оперативного лікування травм (патологій) хребта з урахуванням *індивідуальних* особливостей пацієнтів.

Методика досліджень. Для вирішення проблеми пропонується розробити *комп'ютерну систему для моделювання хірургічних операцій ендопротезування хребта та дослідження напружено-деформованого стану елементів системи „хребет – ендопротез”*.

Це дасть змогу оптимально підбирати параметри ендопротезів та схеми хірургічних операцій з урахуванням індивідуальних особливостей пацієнтів. Для досягнення мети необхідні наступні дослідження: геометрії та створення бази даних *параметричних* моделей елементів хребта; типів конструкцій *ендопротезів* та створення бази даних їх параметричних моделей; дослідження, класифікація та створення бази даних *травм (патологій) хребта*; розробка *математичної моделі* для параметричного опису поведінки біомеханічної системи „елементи хребта – ендопротез”, *загальної параметричної моделі* біомеханічної системи „елементи хребта – ендопротез” та *комп'ютерної системи* для моделювання *геометрії* та *напружено-деформованого стану* хребта та ендопротезів; дослідження зразків *ендопротезів* методом скінченних елементів та методом голографічної інтерферометрії та розробка *схем хірургічних операцій* з ендопротезування за допомогою розробленої комп'ютерної системи та дослідження результатів у клінічних умовах.

Схема взаємодії етапів досліджень – на рис. 1. Досліджувана біомеханічна система має принципово відмінні складові: біологічні та механічні. Принципові

відмінності складових – на рис. 2. Таким чином, необхідно створити *єдиний метод моделювання* 2-х принципово різних елементів біомеханічної системи: біологічних та механічних.

Для вирішення цієї проблеми пропонується *оригінальний авторський метод* узагальненого параметричного опису складних механічних систем (МУПОСМС). Його суть: досліджувана система S описується множиною параметрів $V = \{P_{Biol}, P_{Surg}, P_{Mech}, P_{Mod}\}$, де P_{Biol} – множина параметрів, що описують параметри *біологічного* об'єкта (у даному випадку – конкретного людського організму); P_{Mech} – множина параметрів, що описують параметри *механічних* складових біомеханічної системи (ендопротез); P_{Surg} – множина параметрів, що описують *схеми оперативних втручань*; P_{Mod} – множина параметрів математичної, геометричної та числової *моделей*, які використовуються для дослідження поведінки біомеханічної системи (наприклад, параметри скінченно-елементної моделі хребець – ендопротез). Взаємозв'язок параметрів – на рис.3.



Рис.1.

| Принципові відмінності біологічних та механічних складових біомеханічної системи | | |
|--|--|---|
| Фактори | Біологічні | Механічні |
| Форма | Задано природою; індивідуальна за параметрами, але загальною-ю однотипна | Штучно створюється; індивідуальні параметри визначаються при процесуванні; розбіри обмежені; топологія варіюється |
| Матеріал | Неоднорідний, анізотропний, непружосильний | Однорідний, ізотропний, пружосильний |
| Комп'ютерні геометричні та скінченно-елементні моделювання | Укладання 3-д форм та властивостей матеріалу | Не виникає принципових проблем |

Рис.2.



Рис. 3.

Задача, що ставиться, може бути формалізована наступним чином: знайти

$$P^* = \arg \min K(p), p \in \bar{P}, \quad (1)$$

де $\bar{P} = P_{Biol} \cap P_{mech} \cap P_{mod} \cap P_{Surg}$.

Таким чином, для визначення шуканих параметрів ендопротезів необхідно: описати множину параметрів P_{Biol} ; описати множину параметрів P_{Mech} ; описати множину параметрів P_{Surg} ; описати множину параметрів P_{Mod} ; сформулювати критерій $K(p)$, що описує складність схеми оперативного лікування та післяопераційних ускладнень; вирішити задачу мінімізації (1) у просторі \bar{P} та отримати оптимальні значення параметрів ендопротезу.

В результаті отримуємо параметричний опис системи $S = S(P^*)$, де S – опис системи за допомогою деяких формальних правил. Під параметрами P розуміємо і конструктивні розміри, і геометрію, і конструкцію ендопротеза, і тип скінченно-елементної моделі і таке інше. Таким чином, узагальнені параметри P – не тільки кількісні величини, але і якісні фактори. Запропонований метод дає можливість створювати математичні, геометричні, числові моделі досліджуваних об'єктів з формальним використанням традиційного параметричного опису.

Програмна реалізація. На основі запропонованого авторами математичного забезпечення створюються алгоритми та програмне забезпечення. Схема функціонування системи наведена на рис. 4.



Рис. 4.

Таким чином, створюється *принципово новий підхід*. Він названий *узагальненим параметричним підходом*. Даний метод дає можливість вирішити 2 принципово різні задачі [4-10]: опис множини об'єктів; опис індивідуальних особливостей конкретного пацієнта (рис. 5). На рис. 6 наведена схема розробки операцій ендопротезування. На рис. 7 – ілюстрації деяких етапів досліджень елементів біомеханічних систем, зокрема, ендопротезів.

Запропонована технологія має *пряме практичне* впровадження. Після його виконання різко підвищиться *якість та ефективність* операцій ендопротезування у хірургічних клініках. При цьому зменшаться кошти та терміни для оперативного лікування. Крім того, з'явиться індивідуальна електронна база даних про протікання операції та реабілітації пацієнта. Ці індивідуальні бази складаються у загальну базу даних пацієнтів, травм та патологій ендопротезів. На базі цієї БД може бути побудована база знань в області ендопротезування елементів опорно-рухового апарату.



Рис. 5.



Рис.6.

Висновки. Принципово *нове та унікальне* у запропонованій технології:

1. Узагальнений авторський метод (*узагальнений параметричний опис елементів біомеханічних систем*) дає можливість створення математичних, геометричних, числових моделей елементів будь-якого типу.
2. Елементи біомеханічних систем розглядаються з урахуванням контактної взаємодії у рамках *єдиної системи*.
3. Запропонований МУПОСМС дає можливість створення *баз даних*: пацієнтів; травм (патологій); ендопротезів; схем оперативного лікування; наслідків операцій ендопротезування.

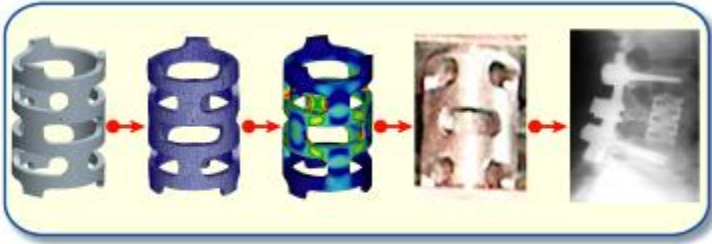


Рис. 7.

4. Комп'ютерна система дає можливість комп'ютерного моделювання форми, напружено-деформованого стану елементів біомеханічних систем з урахуванням **індивідуальних** особливостей пацієнтів.

5. На основі запропонованого підходу можлива комп'ютерна розробка нових схем хірургічних операцій для **ендопротезування та нових типів** ендопротезів.

6. Розрахунково – експериментальні дослідження методом скінченних елементів та методом голографічної інтерферометрії дають принципову можливість отримання **достовірних** моделей та вдалих **конструкцій** ендопротезів.

Список літератури. 1. *Faciszewski T. et al.* The surgical and medical perioperative complications of anterior spinal fusion surgery in thoracic and lumbar spine in adults. A review of 1223 procedures // *Spine*. –1995. – Vol.20, №14. – p.1592-1599. **2.** *J. Kenneth Burkus, M.D.* Update: Spinal Implant Breakthrough Stabilizes Spine, [http://www.spineuniverse.com/displayarticle.php/_article1360.html](http://www.spineuniverse.com/displayarticle.php?_article1360.html). **3.** *Steffen T., Tsantrizos A. et al.* Cages: design and concepts // *Euro Spine*. –2000. –Vol.9(7). –p.5089-5094. **4.** *Korzh N., Filipenko V., Ostrovskaya Ye., Yukhno T., Lytvynov L., Sevidova Ye., Timchenko I., Golukhova A., Pokhyl Yu.* Tribological study of single crystal friction pair for joint endoprosthesis // Вісник ортопедії, травматології та протезування. – 2003. – №3. – С.34-37. **5.** *Filipenko V., Zuman Z., Glushko V., Radchenko V., Mezentsev V.* Nonstoichiometric hydroxyapatite granules for orthopaedic applications // *Journal of materials science: materials medicine* 15(2004) 551-558. **6.** *Radchenko V., Zuman Z., Filipenko V., Glushko V., Mezentsev V.* Nonstoichiometric hydroxyapatite granules for orthopaedic applications // *Ортопедия, травматология и протезирование*. – 2003. – №1. – С.101-107. **7.** *Ткачук Н.А.* Комплексное экспериментальное определение параметров численных моделей элементов механических систем // *Механіка та машинобудування*. – 2001. – №1,2. – С.65-69. **8.** *Веретельник Ю.В.* Моделирование свойств материалов биомеханических систем: модели, подходы, численный эксперимент // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 47. – С.29-35. **9.** *Ткачук М.А., Радченко В.О., Веретельник Ю.В.* Узагальнений параметричний опис складних біомеханічних систем // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 47. – С.173-180. **10.** *Веретельник Ю.В.* Расчетно-экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния титановых эндопротезов // *Вестник НТУ “ХПИ”*. Тематический выпуск “Машиноведение и САПР”. –Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – Вып. 53. – С.40-54.

Поступила в редколлегию 11.01.2006