

УДК 616.71-008.81-06:[577.128+613.3](043.5)

Abstract**Bushtruk A.N.***Sumy State University,
2, Rymkogo-Korsakova st.,
Sumy, 40007, Ukraine***STANDARD MEASUREMENT OF BONE STRENGTH IN ANIMALS OF DIFFERENT AGE AND 3-D MODELING**

The purpose of our experiment was to investigate the strength parameters of the different ages rat's femur after applying of perforated defect and the creation of an experimental 3-D model. In the experiment were used 54 male rats of 3 ages - young, mature and old age. We performed perforated defect in the middle third of femur from medial surface under sterile condition. The rats were taken out of the experiment at 24 days after injury.

To study the strength properties femur with bone defect were isolated and ensile strength, flexural and compression were determine according to standard methods. To assess the accuracy of the experiment and to compare the experimental data with the calculated values, we performed calculations of bones for tension, compression and bending with sophisticated computational systems Pro/Engineer and Pro / Mechanical.

Using 3-D modeling allows visually evaluate the distribution of the load on the bone during the action of external loads of different directions, and identify weaknesses spots. With the help of the module Pro / Engineer is possible to calculate the tensile strength with a slight deviation from the experimental data. Biomechanical model of the femur, which is based on the actual parameters of the original data allow a high probability to calculate the parameters of bone strength in animals of different age.

Keywords. Femoral bone, strength parameters, 3-D modeling

Corresponding author: *buzina76@mail.ru

Резюме**Буштрук А.М.***Сумський державний
університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
Суми, 40007, Україна***РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ СТЕГНОВОЇ КІСТКИ ТВАРИН РІЗНОГО ВІКУ СТАНДАРТНИМИ МЕТОДАМИ ТА ЗА ДОПОМОГОЮ 3-D МОДЕЛЮВАННЯ**

Метою нашого експерименту було дослідження параметрів міцності стегнової кістки щурів різного віку після нанесення дірчастого дефекту та створення експериментальної 3-D моделі. В експерименті були задіяні щурі-самці 3-х вікових груп – молоді, зрілі та старечого віку в кількості 54 особини. Тваринам експериментальної серії (126 щурів трьох вікових груп) в умовах стерильної операційної наносився дірчастий дефект з медіальної поверхні тіла середньої третини стегнової кістки. Щурів виводили з експерименту на 24 добу після нанесення травми.

Для дослідження тривкісних властивостей виділяли стегнову кістку з дефектом та проводили визначення тривкості на розрив, згин і стиск за стандартними методиками. Для оцінки точності експерименту та порівняння отриманих експериментальних даних з розрахунковими, проводився розрахунок кісток щурів трьох віко-

вих груп для розтягування, стиснення і вигину за допомогою сучасних розрахункових комплексів Pro / Engineer та Pro / Mechanical.

Використання 3-D моделювання дає можливість візуально оцінити розподіл навантаження на кістку під час дії зовнішніх навантажень різного напрямлення та виявити слабкі місця в органі. За допомогою модуля Pro/Engineer можливо розрахувати межу міцності з незначним відхиленням від експериментальних даних. Біомеханічна модель стегнової кістки, яка створена на основі реальних вихідних параметрів органу дозволяє з високою ймовірністю розрахувати параметри міцності кісткової тканини тварин різного віку в умовах пошкодження її цілісності.

Ключові слова: Стегнова кістка, параметри міцності, 3-D моделювання

Резюме

Буштрук А.Н.

Сумський державний
університет,

ул. Римського-Корсакова, 2,
Сумы, 40007, Україна

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ БЕДРЕННОЙ КОСТИ ЖИВОТНЫХ РАЗНОГО ВОЗРАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ МЕТОДИК И 3-D МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью нашего эксперимента было исследование параметров прочности бедренной кости крыс разного возраста после нанесения дырчатого дефекта и создание экспериментальной 3-D модели. В эксперименте были задействованы крысы-самцы 3-х возрастных групп - молодые, зрелые и старческого возраста в количестве 54 особи. Животным экспериментальной серии в условиях стерильной операционной наносился дырчатый дефект с медиальной поверхности тела средней трети бедренной кости. Крыс выводили из эксперимента на 24 сутки после нанесения травмы.

Для исследования прочностных свойств выделяли бедренную кость с дефектом и проводили определение прочности на разрыв, изгиб и сжатие по стандартным методикам. Для оценки точности эксперимента и сравнения полученных экспериментальных данных с расчетными, проводился расчет костей крыс трех возрастных групп для растяжения, сжатия и изгиба с помощью современных расчетных комплексов Pro / Engineer и Pro / Mechanical.

Использование 3-D моделирования дает возможность визуально оценить распределение нагрузки на кость во время действия внешних нагрузок разного направления и выявить слабые места в органе. С помощью модуля Pro / Engineer можно рассчитать предел прочности с незначительным отклонением от экспериментальных данных. Биомеханическая модель бедренной кости, которая создана на основе реальных исходных параметров органа позволяет с высокой вероятностью рассчитать параметры прочности костной ткани животных разного возраста в условиях повреждения ее целостности.

Ключевые слова: Бедренная кость, параметры прочности, 3-D моделирование

Автор, відповідальний за листування: *buzina76@mail.ru

Вступ

Травма кістки зазвичай призводить до порушення структури не лише кісткової тканини а й судин, нервів і м'яких тканин, які знаходяться усередині чи оточують пошкоджений орган. Наявність травми призводить до вивільнення факторів росту та диференціації, які змінюють активність плюрипотентних остеопрогеніторних

клітин, що знаходяться як в червоному кістковому мозку, так і в камбіальному шарі окістя. Остеоіндуктивні протеїни, фактори росту, цитокіни та гормони індують міграцію мезенхімальних клітин та їх проліферацію і диференціацію в клітини, які формують нову кісткову тканину. Зважаючи на складність процесів, які лежать в основі репаративного остеогенезу, безліч



факторів здатні впливати на протікання регенерації кісткового дефекту. За даними різних авторів, від 5 до 15 відсотків травм протікають з порушенням строків загоєння або закінчуються формуванням неповноцінного кісткового мозолу.

Серед чинників, які здатні впливати на процеси репаративного остеогенезу досліджені як ендогенні (інфекційні захворювання, цукровий діабет, порушення кровообігу, ендокринні розлади тощо), так і екзогенні фактори (променеві ураження, надлишок солей важких металів, пестицидів, нітратів, тютюновий дим тощо).

Особливе місце серед факторів, які здатні змінити перебіг репаративної регенерації є вік. Відомо, що кількість мезенхімальних клітин, здатних приймати участь в процесах відновлення кістки, зменшується пропорційно з віком. При цьому, є дані щодо зменшення чутливості ефекторних клітин, які виділяють фактори росту, тобто відбувається зменшення кількості сигнальних молекул, які приймають участь в процесі остеогенезу. Разом з цим, процеси ремоделювання з віком зсуваються у бік переважання резорбції, що також негативно впливає на процеси відновлення втраченої кісткової тканини.

Не зважаючи на чисельні дослідження впливу вікового фактора на протікання репаративного остеогенезу залишається невирішеним питання біомеханічної оцінки травмованої кістки та зв'язок параметрів міцності зі змінами мінерального гомеостазу кісткової тканини.

На сьогодні розроблені методики руйнівної оцінки міцносних параметрів кісток скелета. Проте для проведення експерименту за даними методиками необхідно залучити велику кількість тварин, що значно підвищує вартість дослідження. Математичне модулювання є перспективним напрямом, який використовується в багатьох аспектах прикладних медико-біологічних досліджень. Розроблені математич-

ні моделі суглобів, хребтового стовбуру тощо, які дозволяють визначити параметри біологічної системи без втручання в неї. При цьому, в літературі відсутні дані щодо використання даної методики для визначення міцності кісток дрібних експериментальних тварин.

Тому метою нашого експерименту стало дослідження міцносних параметрів стегнової кістки щурів різного віку після нанесення дірчастого дефекту та створення експериментальної 3-D моделі.

Матеріали та методи дослідження.

В експерименті були задіяні щурі-самці 3-х вікових груп – молоді, зрілі та старечого віку в кількості 54 особини. Тваринам експериментальної серії в умовах стерильної операційної наносився дірчастий дефект з медіальної поверхні тіла середньої третини стегнової кістки. Травма була виконана в місці, де відсутні м'язи та магістральні судини, для зменшення загального травматизму. Дефект наносився стоматологічним бором діаметром від 1 до 2 мм в залежності від віку під наркотановим інгаляційним наркозом з використанням наркозного апарата. Операційну рану зашивали, тварин виводили з наркозу та утримували в стаціонарних умовах виварію. Щурів виводили з експерименту на 24 добу після нанесення травми.

Для дослідження тривісних властивостей виділяли стегнову кістку з дефектом та проводили визначення тривкості на розрив, згин і стиск за стандартними методиками.

Для визначення залежності між силою тривкості на розтягнення та тривкості на стиснення використовували спеціальну установку (рис. 1А), за допомогою якої визначались внутрішні поздовжні сили кісток (P, кгс) через дію на них зовнішніх сил. Для визначення сили руйнації при згинанні використовували стандартну установку для механічних досліджень (рис. 1В).

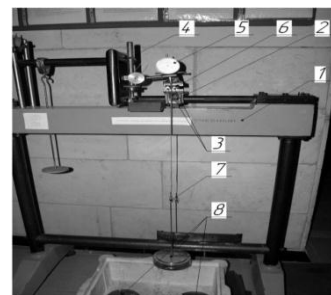
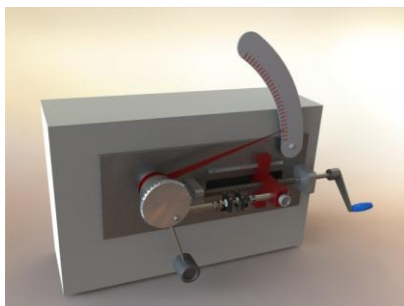


Рис. 1. Пристрій для визначення сили руйнації кістки на розрив та стиск (А) та визначення сили руйнації кістки на згин (В).

Для оцінки точності експерименту та порівняння отриманих експериментальних даних з розрахунковими, проводився розрахунок кісток щурів трьох вікових груп для розтягування, стиснення і вигину за допомогою сучасних розрахункових комплексів Pro / Engineer та Pro / Mechanical.

Результати дослідження.

Графічне відображення розподілу навантаження на розтягнення стегнової кістки показало його нерівномірний розподіл з максимумом біля місця дефекту (зона червоного кольору) та пос-

туповим зменшенням до периферії. При цьому більш виражене навантаження на кістку відбувається у проксимальному напрямі. Показало зростання зони високого навантаження зі збільшенням віку. Як видно з малюнку (рис. 2), зона високого навантаження у тварин зрілого віку у вигляді V-подібного конусу є значно більшою, ніж у тварин молодого віку, а у моделі кістки щура старечого віку – займає майже усю середину діяфізу. При цьому характерним є зростання зони високого навантаження у напрямі до дистального епіфізу.

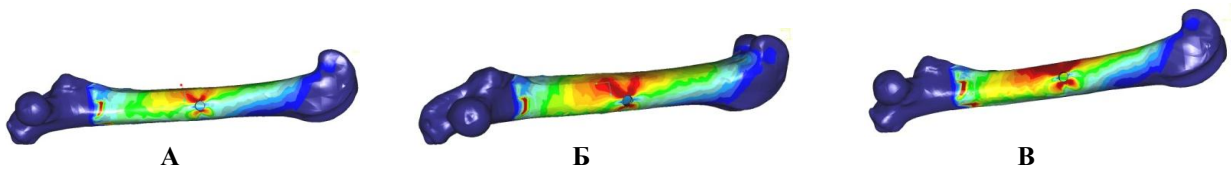


Рис. 2. Графічний розподіл навантаження на розтягнення стегнової кістки в графічному модулі Pro/Engineer (модель кістки щурів молодого (А), зрілого (Б) та старечого віку (В)).

3-D моделювання навантаження на стискання на кістку показало наявність максимального навантаження не лише біля місця перелому а й у напрямі до проксимального епіфізу. Вікові особливості полягають у розширенні зони максимального навантаження з віком, що може свідчити про зниження «якості» кісткової тканини. При цьому ділянка дистального епіфізу характеризу-

ється відсутністю дефектів навантаження, навіть в моделі кістки тварин старечого віку (рис. 3).

Характерною рисою моделі, яка характеризує міцність на стискання є відсутність максимального навантаження в ділянці дефекту в усі вікові періоди. Можливо, розмір дефекту є менше ніж критичний для розвитку механічної неспроможності діяфізу стегнової кістки.

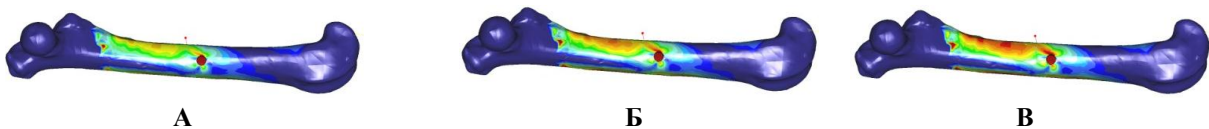


Рис. 3. Графічний розподіл навантаження на стискання стегнової кістки в графічному модулі Pro/Engineer (модель кістки щурів молодого (А), зрілого (Б) та старечого віку (В)).

Найхарактерніші зміни міцності кістки відмічені при моделюванні навантаження на згин. Найбільше навантаження спостерігається в місці дефекту, що свідчить про наявність «слабкого місця» на поверхні органу. При цьому рівень навантаження в інших ділянках недостатній для

розвитку перелому. З віком спостерігається лише зростання зони високого навантаження навколо ділянки дефекту без розповсюдження у напрямку до проксимального та дистального епіфізів (4).

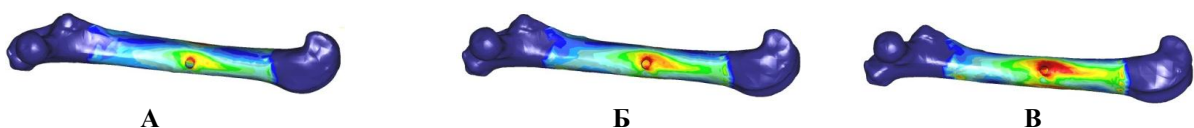


Рис. 4. Графічний розподіл навантаження на згин стегнової кістки в графічному модулі Pro/Engineer (модель кістки щурів молодого (А), зрілого (Б) та старечого віку (В)).

За результатами розрахунку 3-D моделі міцності кісток тварин молодого віку через 10 днів після травми в модулі Pro/Engineer максимальна зміна межі тривкості на розтягнення спостерігається в місці дірчастого дефекту і складає $28,3 \pm 0,28$ кгс/мм². Експериментальні дані межі міцності на розтягнення склали $27,44 \pm 0,52$ кгс/мм², що лише на 3,06% відрізняються від розрахункових. Для міцності для стискання та згину кістки тварин молодого віку різниця між експериментальними та розрахунковими даними склала відповідно 5,66% та 2,91%

У тварин зрілого та старечого віку експериментальні розрахунки межі міцності на розтягнення склали відповідно $27,98 \pm 0,62$ кгс/мм² та $19,67 \pm 0,34$ кгс/мм², що лише на 2,58% та 2,39% відрізняються від показників, отриманих в експерименті через 10 днів після нанесення травми (рис. 5). Розрахункові показники межі міцності на стискання відрізняються від експериментальних відповідно віку на 5,43% та 5,52%. При цьому розрахункові показники межі міцності на згин перевищують експериментальні відповідно віку на 7,01% та 10,02%.

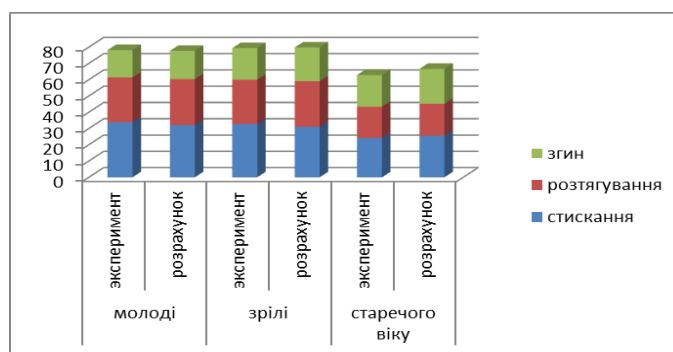


Рис. 5. Показники міцності стегнової кістки тварин різного віку через 10 днів після травми, отримані експериментально та за допомогою 3-D моделювання у графічному модулі Pro/Engineer.

Через 15 днів після травми різниця між експериментальним та розрахунковими даними є дещо більша, проте не виходить за рамки 10%. Можливою причиною збільшення різниці є вихідна гіпотеза про відсутність тканин в місці дефекту при побудові експериментальної моделі. При цьому, під час протікання репаративного остеогенезу ділянка дефекту через 15 днів заповнена тканиною специфічними структурами, з переважанням фібро ретикулярної тканини та

грубоволокнистої кісткової, що не було враховано під час 3-D моделювання. Загалом, різниця між експериментальними та розрахунковими даними для міцності на стискання становить від 2,65% у тварин молодого віку до 7,23% - у щурів старечого віку (рис. 6). Різниця межі міцності на розтягнення між експериментальними та розрахунковими даними складає від 5,8% до 7,2%, межі міцності на згин – від 6,67% до 8,82%.

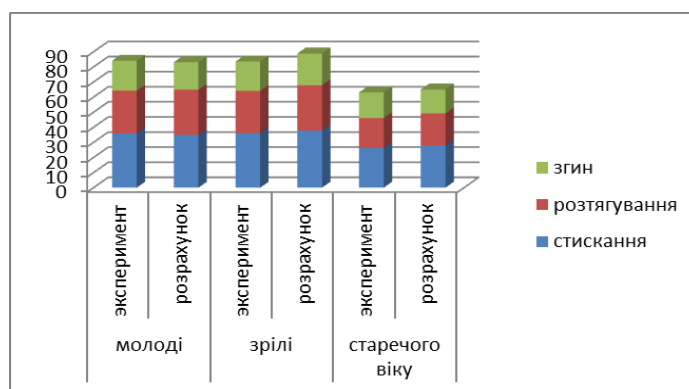


Рис. 6. Показники міцності стегнової кістки тварин різного віку через 15 днів після травми, отримані експериментально та за допомогою 3-D моделювання у графічному модулі Pro/Engineer.

Моделювання міцностних параметрів стегнової кістки через 24 доби після травми показало наявність незначних відмінностей з експериментальними даними. Різниця становить від 4,74% до 8,48% (рис. 7). Через 24 доби після травми ділянка дефекту виповнена переважно

кістковою тканиною, що характеризує завершення основного етапу репаративного остеогенезу. Наявність майже однакової розбіжності між експериментом та розрахунковими даними можливо є свідченням однорідності заповнення дефекту в експерименті кістковою тканиною.

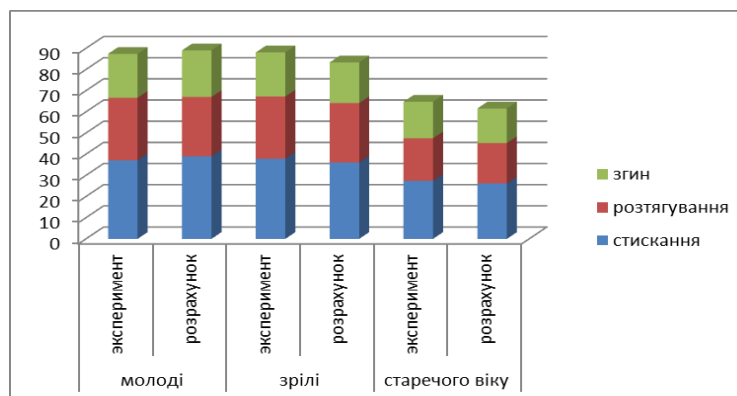


Рис. 7. Показники міцності стегнової кістки тварин різного віку через 24 дні після травми, отримані експериментально та за допомогою 3-D моделювання у графічному модулі Pro/Engineer.

Висновки

Таким чином, використання 3-D моделювання дає можливість візуально оцінити розподіл навантаження на кістку під час дії зовнішніх навантажень різного напрямлення та виявити слабкі місця в органі. За допомогою модуля Pro/Engineer можливо розрахувати межу міцно-

сті з незначним відхиленням від експериментальних даних. Біомеханічна модель стегнової кістки, яка створена на основі реальних вихідних параметрів органу дозволяє з високою ймовірністю розрахувати параметри міцності кісткової тканини тварин різного віку в умовах пошкодження її цілісності.

References (список літератури)

1. Ara Nazarian, F. Araiza Arroyo, Rosso C. Tensile properties of rat femoral bone as functions of bone volume fraction, apparent density and volumetric bone mineral density. *Journal of Biomechanics*. 2011; 44: 2482–2488.
2. Erdal N., Gürgül S., Demirel C. et all. The effect of insulin therapy on biomechanical deterioration of bone in streptozotocin (STZ)-induced type 1 diabetes mellitus in rats. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2012; 97: 461 – 467.
3. Geraets W.G.M., van Ruijven L.J., Verheij J.G.C., van der Stelt P.F. Spatial orientation in bone samples and Young's modulus. *Journal of Biomechanics* – 2008. - Volume 41, Issue 10. – P. 2206-2210.
4. Hamed E, Jasiuk I. Multiscale damage and strength of lamellar bone modeled by cohesive finite elements. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013; 28: 94 – 110.
5. Lagerholm S, Park H-B, Luthman H et all. Genetic loci for bone architecture determined by three-dimensional CT in crosses with the diabetic GK rat. *Bone*. 2010; 47:1039 – 1047.
6. Sirois I, Cheung AM, Ward WE Biomechanical bone strength and bone mass in young male and female rats fed a fish oil diet. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*. 2003; 68: 415 – 421.
7. Starnes JW, Neidre DB, Nyman JS. et all. Synergistic effect of exercise and statins on femoral strength in rats. *Experimental Gerontology*. 2013; 48: 751 – 755.
8. Wanyura H., Kowalczyk P., Bossak M, Samolczyk-Wanyura D. Finite element method for analysis of stresses arising in the skull after external loading in cranio-orbital fractures. *Neurologia i Neurochirurgia Polska*. 2012; 46: 344-350.

(received 16.05.2015, published online 30.06.2015)

(отримано 16.05.2015, опубліковано 30.06.2015)