Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра математической теории
упругости и биомеханики

Расчет напряженно-деформированного состояния тазобедренного сустава в норме и при установке имплантатов

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 237 группы

направления 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

механико-математического факультета

Симкина Ярослава Владимировича

Научный руководитель
доцент кафедры МТУ и БМ,
к.ф.-м.н., доцент _____ А.В. Доль
подпись, дата

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор _____ Л.Ю. Коссович
подпись, дата

Саратов 2017

Введение

Прямохождение стало возможным после морфологической адаптации скелета человека, в частности, нижних конечностей, таза и позвоночника [1]. Таз является ключевым звеном всех преобразований, т.к. подвергается действию силы тяжести от позвоночного столба, а так же силе реакции опоры, передаваемой через головки тазобедренных суставов [2]. Причина возникновения болей в поясничном отделе позвоночника заключается в постоянной нагрузке на мышечный аппарат и в результате этого – его переутомлении, присоединении впоследствии кислородного голодания из-за несоответствия потребления кислорода мышцей и притока к ней крови [3].

Различные заболевания и серьезные травмы частей опорно-двигательной системы, которые негативно влияют на функциональность, работоспособность и комфорт повседневной нормальной жизни, могут устраняться хирургическим путем, в частности протезированием.

Протезирование – замена больных органов или поврежденных частей скелета на искусственные, т.е. замена имплантатом. Постоянное совершенствование имплантатов для тазобедренного сустава позволяет сократить количество повторных операций. По данным исследователей [4] коэффициент ревизии составляет около 13%.

Имплантаты (нем. Implantat < лат. in – в + plantare – сажать) [5] – созданные специальным образом медицинские изделия, которые применяются для установки в организм пациента.

Целью магистерской работы является расчет напряженно-деформированного состояния тазобедренного сустава в норме и при установленных имплантатах.

Задачами выполняемой работы являются:

1) привести литературный обзор по теме расчета напряженно-деформированного состояния тазобедренного сустава;
2) привести медицинскую и математическую постановки задачи;

3) построить 3D модели исследуемых элементов опорно-двигательной системы и имплантатов;

4) провести расчет напряженно-деформированного состояния моделей вертлужной впадины, с учетом установленных имплантатов и без них;

5) сделать выводы на основе полученных результатов.

Структура и объём работы. Магистерская работа состоит из введения, пяти разделов, 4 подразделов и заключения и содержит 62 страницы. Список использованных источников включает 54 наименования.

Раздел 1. Литературный обзор.

Раздел 2. Постановка задачи.

Подраздел 2.1. Медицинская постановка.

Подраздел 2.2. Математическая постановка.

Раздел 3. Построение объемных моделей.

Подраздел 3.1. Создание обобщенных моделей.

Подраздел 3.2. Создание модели по снимкам КТ и МРТ.

Раздел 4. Расчет напряженно-деформированного состояния.

Раздел 5. Анализ результатов.

Научная новизна. Используя программы для расчетов тел различной геометрии, рассчитаны и проанализированы два эндопротеза вертлужного компонента тазовой кости. На основе анализа картины напряжений, возникающих в тазовых костях с установленным протезом, проведена оценка, с точки зрения механики, двух видов имплантатов. Сравнение проводится между уже используемым в операциях имплантирования эндопротезом и недавно разработанным эндопротезом нового вида.

Основное содержание работы

Магистерская работа посвящена расчету напряженно-деформированного состояния тазобедренного сустава в норме и при установленных эндопротезах, а также анализу полученных результатов.

Во введении описываются основные понятия, используемые в работе [1-5], актуальность данной работы на сегодняшний день и научная новизна.

В первом разделе проводится обзор работ, посвящённые определению напряженно-деформированного состояния и математического моделирования элементов опорно-двигательной системы [6 – 15]. Рассмотрены работы по численному анализу напряженного состояния бедренной кости и имплантированной в нее ножки при различных способах фиксации [16] и по исследованию долговечности трех типов искусственных суставов [17].

Построение объемной модели бедренной кости с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) «SolidWorks» и последующее исследование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов было проведено в работе [8].

В работе [9] подробно описывается пример проведения исследования напряженно-деформированного состояния бедренной кости с установленным эндопротезом. Показано определение величины нагружения модели и места сосредоточения нагрузки.

Работы [10, 11] посвящены математическому моделированию биомеханики поведения бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава и биомеханики суставов.

Результаты определения напряженно-деформированного состояния при условиях биологических особенностей, заболеваний, физико-механических свойств имплантатов даны в исследованиях [12 – 15].

В работе также рассматривалась зарубежная литература. В зарубежных работах [16 – 23] отображены исследования, включающие расчеты методом конечных элементов здорового тазобедренного сустава, тазовых и бедренных костей, расчеты с учетом различных заболеваний, травм и возрастных особенностей тканей человека.

Изучены работы посвященные анализу исследований пациентов с установленными имплантатами различных конструкций [24 – 25] и изучены

исследования [26 – 27] посвященные описанию способа цементного фиксирования и подготовки тазобедренного сустава для установки имплантата.

Второй раздел посвящен медицинской и математической постановкам задач. Данный раздел распределен на два подраздела.

В первом подразделе проводится описание частей опорно-двигательной системы, участвующих в расчете и возникающие заболевания, лечение которых проводится операцией протезирования [28 – 44]. Приводится подробное строение тазобедренного сустава (рисунок 1). С медицинской точки зрения целью данной работы является сравнение нового вида коррекционного эндопротеза с эндопротезом, применяемым в операциях эндопротезирования.

Рисунок 1 – Строение тазобедренного сустава

Второй подраздел посвящен математической постановке задачи. В данном подразделе приводятся уравнения, описывающие данную задачу (1) – (4), граничные условия (5) и условия контакта (6) – (9) [45 – 47].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right), \tag{1}$$

$$\varepsilon_{ik,jl} + \varepsilon_{jl,ik} - \varepsilon_{il,jk} - \varepsilon_{jk,il} = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_j = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda\Theta\delta_{ij} + \mu\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right), \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ij} n_j|_{S_t} = t_i, \\ u_i|_{S_u} = u_i^{(s)}, \end{cases} \quad (5)$$

$$u_i|_{S_1} = u_i|_{S_2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x' = x, \\ y' = y\cos\alpha - z\sin\alpha, \\ z' = y\sin\alpha + z\cos\alpha, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x' = x\cos\alpha - y\sin\alpha, \\ y' = y, \\ z' = x\sin\alpha + z\cos\alpha, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x' = x\cos\alpha - y\sin\alpha, \\ y' = x\sin\alpha + y\cos\alpha, \\ z' = z. \end{cases} \quad (9)$$

Третий раздел посвящен построению трехмерных моделей. Рассказывается о применении в медицине методов компьютерного моделирования и конечно-элементных расчетов [48]. Данный раздел распределен на два подраздела.

В первом подразделе описывается процесс моделирования хрящевой гиалиновой ткани и двух видов имплантатов. Для построения данных моделей использовалась программа «SolidWorks». Изложены возможности, предоставляемые программой «SolidWorks» для построения различных трехмерных моделей [49].

Второй подраздел посвящен созданию моделей по снимкам КТ и МРТ. Описывается процесс создания модели на основе результатов томограммы. Часть моделей были взяты из специального архива с построенными моделями [50] и демонстрируются три построенные модели для проведения расчета.

Четвертый раздел посвящен расчету напряженно-деформированного состояния построенных моделей. Решение задачи проводилось в программе «Ansys Workbench». Механические свойства рассматриваемых элементов опорно-двигательной системы и имплантатов были взяты из [51]. Условие подвижности бедренной кости относительно тазовой задается сферическим типом шарнира (Joints). Между тазовой костью и хрящевой тканью задается условие полного контакта, когда перемещения на одной контактной поверхности равно перемещениям на другой контактной поверхности, при помощи условия «bonded». Между имплантатом и тазовой костью задается полный контакт, также при помощи условия «bonded». Для проведения расчета к модели прикладывалась вертикальная сжимающая нагрузка и задавались закрепления [52].

Пятый раздел посвящен анализу полученных результатов. На рисунке 2 показано поле напряжений в первой модели ТБС в норме. Значение максимального напряжения составило 6,7 МПа.

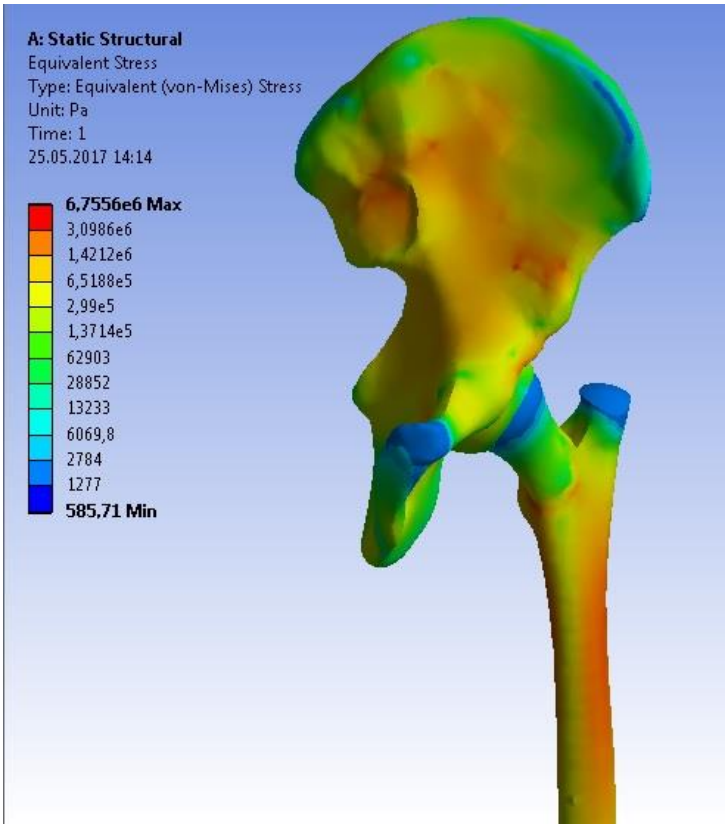

Рисунок 2 – Поле напряжений ТБС в норме

Поле напряжений, с учетом установленного имплантата первого типа, показано на рисунке 3. Поле напряжений, возникающее в имплантате первого типа, показано на рисунке 4. Значение максимального напряжения составило 13,2 МПа.

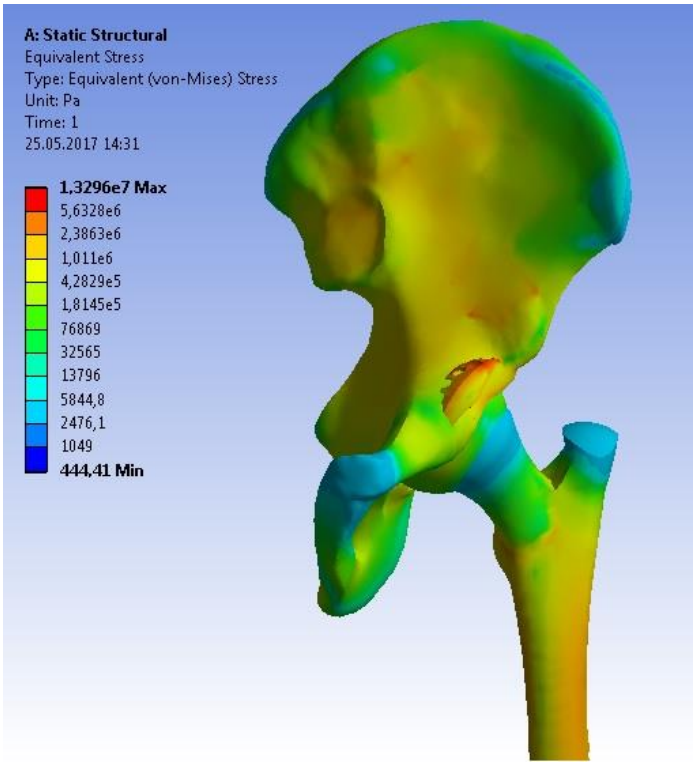

Рисунок 3 – Поле напряжений ТБС с имплантатом первого типа

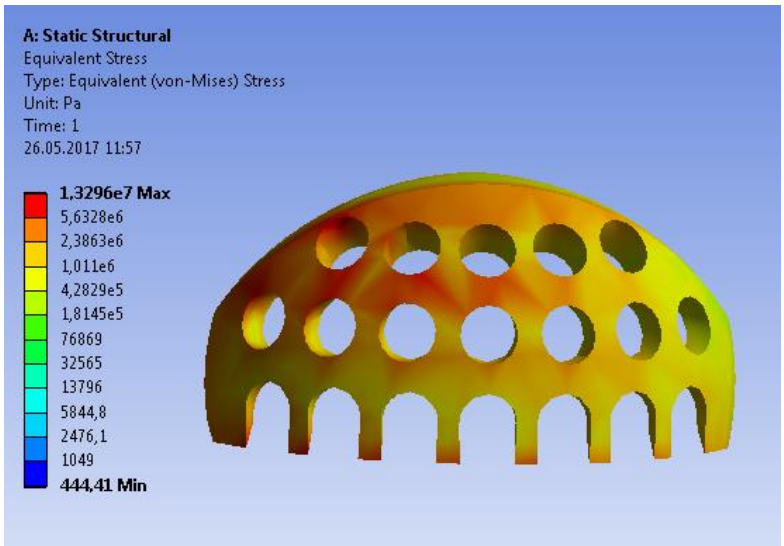

Рисунок 4 – Поле напряжений в имплантате первого типа

Поле напряжений, с учетом установленного имплантата второго типа, показано на рисунке 5. Поле напряжений, возникающее в имплантате второго

типа, показано на рисунке 6. Значение максимального напряжения составило 15,6 МПа.

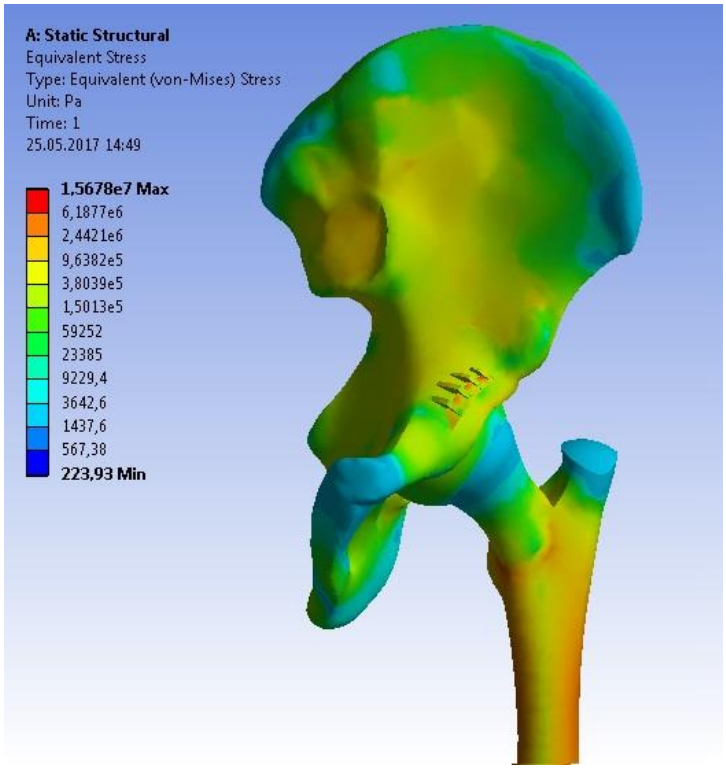

Рисунок 5 – Поле напряжений ТБС с имплантатом второго типа

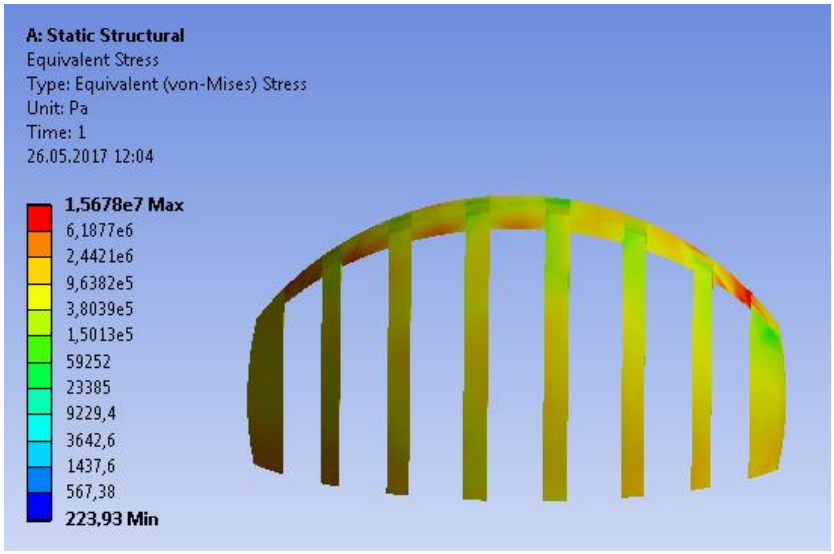

Рисунок 6 – Поле напряжений в имплантате второго типа

На основании данных [53, 54] было проведено сравнение значений полученных максимальных напряжений с разрушающими значениями напряжений. Проведено сравнение двух видов имплантатов по полученным результатам. Установлено, что второй вид эндопротеза хоть и вызывает

большие напряжения, относительно значений напряжений эндопротеза первого типа, но разрушающих напряжений оба вида эндопротезов не достигают.

Заключение

В магистерской работе был приведен литературный обзор по теме исследования напряженно-деформированного состояния эндопротезированного тазобедренного сустава. Приведены медицинская постановка задачи, в которой рассматривались кости тазобедренного сустава и возникающие в данных костях заболевания, а также математическая постановка задачи, в которой представлены уравнения, описывающие решаемую задачу статики. Созданы трехмерные модели элементов опорно-двигательной системы, в которые имплантировались построенные модели эндопротезов, а затем проведен расчет напряженно-деформированного состояния. На основе полученных результатов был проведен анализ и сравнение максимальных напряжений со значениями разрушающих напряжений биологических тканей, а также сделан вывод, что значения максимальных напряжений новой модели имплантата незначительно отличаются от значений максимальных напряжений имплантата первого типа.

Список использованных источников

1. Vaz G. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. / Vaz G., Roussouly P., Berthonnaud E. // *European Spine Journal*. – 2002. – vol. 11. – iss. 1.
2. Legaye J. Ch. Analysis of the Dynamic Sagittal Balance of the Lumbo-Pelvi-Femoral Complex / Legaye J. Ch. // *Biomechanics in Applications*. – 2011. – С. 221 – 246. DOI: 10.5772/19608
3. Палатинская И.П. Исследование резонансных частот человека-оператора автотранспортных устройств / Палатинская И.П., Дружинин П.С., Самойлов С.П. // Наука ЮУрГУ. – 2014. – С. 563 – 567.

4. Батыгин Г.Г. Статистический анализ в регистрах по эндопротезированию суставов / Батыгин Г.Г. // *Вестник последипломного медицинского образования*. – 2012. - № 3. – С. 49 – 52
5. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Имплантаты (дата обращения 20.03.2017). – Имплантаты. – Яз. рус.
6. Лоскутов О.А. Анализ напряженного состояния элементов системы «бедренная кость - имплантат» при функциональных нагрузках эндопротеза тазобедренного сустава / Лоскутов О.А., Левадный Е.В. // *Травма*. – 2015. - Вып. № 6. – Т. 16. – С. 48 – 53.
7. Исследование напряженно-деформированного состояния эндопротезированного тазобедренного сустава / Акулич Ю. В., Подгаец Р. М., Скрябин В. Л., Сотин А. В. // *Российский журнал биомеханики*. – 2007. – Вып. № 4. – С. 9 – 35.
8. Исследование напряженно-деформированного состояния модели бедренной кости в условиях эндопротезирования при переломах ее проксимального отдела / Тяжелов А.А., Бабалян В.А., Кальченко А.В., Карпинский М.Ю., Карпинская Е.Д., Яресько О.В. // *Травма*. – 2016. – Вып. № 3. – Т. 17. – С. 47 – 58.
9. Исследование напряженно-деформированного состояния бедренной кости человека с эндопротезом на основе дискретного подхода / Коноваленко И. С., Смолин А. Ю., Псахье С. Г., Карлов А. В. // *Известия Томского политехнического университета*. – 2006. – Вып. № 3. – Т. 309.
10. Математическое моделирование биомеханики сустава / Закиров Р.Х., Коноплев Ю.Г., Митряйкин В.И., Саченков О.А. // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2012. – № 1. – С. 31.
11. Математическое моделирование биомеханического поведения бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава цементной фиксации / Мамонов А.М., Карпов В.Н., Палтиевич А.Р.,

Левочкин А.А. // *Научные труды (вестник МАТИ)*. – 2007. – № 13. – С. 295 – 299.

12. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния контактных поверхностей тазобедренного сустава в условиях асферичности головки бедренной кости и после хирургической оптимизации фемороацетабулярных соотношений / Лазарев И.А., Филипчук В.В., Скибан М.В., Поладюк Вл. В. // *Вісник ортопедії, травматології та протезування*. – 2013. – № 4. – С. 9 – 13.
13. Численное исследование напряженно-деформированного состояния тазобедренного сустава при ротационной остеотомии проксимального участка бедренной кости / Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Андреев П.С., Коноплев Ю.Г. // *Российский журнал биомеханики*. – 2016. – Вып. №3. – Т. 20. – С.257 – 271.
14. Фёдорова Н.В. Исследование напряженно-деформированного состояния керамического имплантата тазобедренного сустава / Фёдорова Н.В., Пель А.Н. // *Наука. Промышленность. Оборон.* – 2015. – С.805 – 808.
15. Борисов А.В. Определение напряжений и деформаций в модели сферического многослойного шарнира-сустава человека / Борисов А.В., Волкова Ю.Е. // *Проблемы безопасности российского общества*. – 2015. – Вып. № 4. – С. 139 – 158.
16. Influence of the fixation region of a press–fit hip endoprosthesis on the stress–strain state of the “bone–implant” system / Levadnyi I., Awrejcewicz J., Fagundes M.G., Loskutov A. // *Computers in biology and medicine*. – 2017. – Vol. 84. – С. 195 – 204.
17. Stress and strain analysis of the hip joint using FEM / Vaverka M., Návrat T., Vrbka M., Florian Z. Fuis V. // *Technology and health care*. – 2006. – Vol. 14. – С. 271 – 279.

18. Relation of coxarthrosis to stresses and morphogenesis: A finite element analysis / Carter D.R., Rapperport D.J., Fyhrie D.P., Schurman D.J. // *Acta orthopaedica scandinavica*. – 1987. – № 6. – С. 611 – 619.
19. URL: https://bmcsportsscimedrehabil.biomedcentral.com. Loading conditions in the spine, hip and knee during different executions of back extension exercises / Schellenberg F., Schmid N., Häberle R., Hörterer N., Taylor W.R., Lorenzetti S. // *BMC sports science, medicine and rehabilitation*. – 2017. – № 9. – Яз. англ.
20. Evaluation of the magnitude of hip joint deformation in subjects with avascular necrosis of the hip joint during walking with and without Scottish Rite orthosis / Karimi M.T., Mohammadi A., Ebrahimi M.H., McGarry A. // *Medical engineering & physics* – 2016. – С. 1 – 7.
21. Piszczatowski S. Analysis of the stress and strain in hip joint of the children with adductors spasticity due to cerebral palsy / Piszczatowski S. // *Acta bioeng biomech*. – 2008. – № 10. – С. 51 – 56.
22. Studies on stress and strain state of a hip joint endoprosthesis / Sticlaru C., Davidescu A., Crainic N., Faur C. // *DAAAM international scientific book*. – 2009. – № 8. – С. 853 – 854.
23. Strains across the acetabular labrum during hip motion: a cadaveric model / Safran M.R., Giordano G., Lindsey D.P., Gold G.E., Rosenberg J., Zaffagnini S., Giori N.J. // *American journal of sports medicine*. – 2011. – № 39. – С. 92 – 102.
24. Сравнительный анализ среднесрочных и отдаленных результатов первичного эндопротезирования тазобедренного сустава серийными эндопротезами бесцементной и цементной фиксации / Прохоренко В.М., Слободской А.Б., Дунаев А.Г., Воронин И.В. и др. // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. – 2014. – № 3. – С. 21 – 26.
25. Результаты применения бедренных компонентов цементной фиксации при ревизионном эндопротезировании тазобедренного сустава /

Загородний Н.В., Нуждин В.И., Бухтин К.М., Каграманов С.В. // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* – 2012. – № 3. – С. 32 – 38.

26. Проблемы цементной фиксации компонентов при первичном эндопротезировании тазобедренного сустава у больных с переломом шейки бедренной кости / Федосеев А.В., Литвинов А.А., Чекушин А.А., и др. // *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*. – 2015. – Вып. №1. – С. 168 – 174.
27. Configuration of anchorage holes affects cemented fixation of the acetabular component in total hip replacement – An in vitro study / Mootanah R., Jarrett P., Ingle P., et al. // *Technology and health care*. – 2008. – № 1. – С. 19 – 30.
28. Большой атлас по анатомии / Роен Й.В., Йокочи Ч., Лютьен-Дреколл Э. // *Внешсигма*. – 2000г. – С. 408 – 428.
29. URL: http://zsiljy.e-shopp.org/Tazovaya-kost-kartinki [Иллюстрация].
30. Скрипкин Е.В. Костная плотность компонентов тазобедренного сустава у детей с врождённым вывихом и подвывихом бедра / Скрипкин Е.В. // *Гений ортопедии.* – 2011. – № 1.
31. URL: http://nspsun.com/shop/nabory-nsp-dlya-zdorovya/nabor-zdorove-vashih-kostej [Иллюстрация].
32. URL: http://www.polismed.com/articles-koksartroz-artroz-tazobedrennogo-sustava-prichiny-simptomy-diagnostika-lechenie.html [Иллюстрация].
33. Количественная оценка показателей плотности костей, образующих тазобедренный сустав, больных коксартрозом / Сазонова Н.В., Дьячкова Г.В., Суходолова Л.В., Дьячков К.А., Скрипкин Е.В. // *Медицинская визуализация*. – 2010. – № 1. – С. 70 – 75.
34. Менщикова Т.И. Использование метода УЗИ для оценки структурного состояния тазобедренного сустава у больных с различными стадиями коксартроза / Менщикова Т.И., Чегуров О.К., Менщиков И.Н. //

Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 1-1. – С. 42 – 46.

35. Дьячкова Г.В. Количественные параметры оценки методами компьютерной и магнитно-резонансной томографии вертлужной впадины и головки бедренной кости у пациентов различного возраста / Дьячкова Г.В., Корабельников М.А., Дьячков К.А. // *Гений ортопедии*. – 2009. – № 2. – С. 131 – 136.
36. Каграманов С.В. Способ восстановления целости вертлужной впадины при ревизионном эндопротезировании тазобедренного сустава / Каграманов С.В. // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* – 2009. – № 3. – С. 31 – 35.
37. Смирнов А.А. Хирургическая тактика при переломах вертлужной впадины / Смирнов А.А., Павлов Д.В., Варварин О.П. // *травматология и ортопедия России.* – 2009. – № 4. – С. 84 – 88.
38. Оперативные доступы при переломах вертлужной впадины / Кавалерский Г., Якимов Л., Гаркави А., Мурылев В., Кащеев А. // *Врач*. – 2010. – № 6. – С. 67 – 70.
39. Щеткин В.А. Комплексное лечение больных с тяжелыми повреждениями вертлужной впадины / Щеткин В.А., Гусев С.В., Файн А.М., Евстигнеев Д.В. // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. – 2009. – № 3. – С. 31 – 33.
40. URL: http://sustavzdorov.ru/artroz/tazobedrennogo-2.html [Иллюстрация].
41. URL: http://forum.unilang.org/viewtopic.php?p=1009959 [Иллюстрация].
42. Finite element methods in spine biomechanics research / Gilbertson L. G., Goel V. K., Kong W. Z. [et al.] // *Critical reviews in biomedical engineering*. — 1995. — № 23. — С. 411 – 473.
43. Экспериментальное обоснование применения коррекции крыши вертлужной впадины титановым протезом в сочетании с костной пластикой при хирургической профилактике диспластического

коксартроза / Норкин И.А., Петров А.Б., Дохов М.М., Щуковский В.В. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2016. – № 5.

44. Патент № 2318476 – Эндопротез тела безымянной кости / Норкин И.А., Петров А.Б., Рузанов В.И., Саликова О.Н.
45. Демидов С.П. Теория упругости: учебник для вузов / Демидов С.П. // *Высшая школа*. – 1979. – С. 70 – 76.
46. Симоненко В.Г. Теоретическая механика связи и реакции связей / Симоненко В.Г., Лысак В.Г. // *Томский государственный архитектурно-строительный университет*. – 2012. – С. 33.
47. Лурье А. И. Аналитическая механика / Лурье А. И. // *Физматлит*. – 1961 г. – С. 824.
48. Иванов Д.В. Применение томографических изображений для создания трехмерных индивидуальных реалистичных моделей биологических объектов / Иванов Д.В., Доль А.В. // *Кардио-ит*. – 2015. – Т. 2. – № 4.
49. URL: http://gor.h1.ru/eBook/Cad3D/theory/t18.htm (дата обращения 15.11.2016). – Средства создания моделей. – Яз. рус.
50. URL: https://grabcad.com (дата обращения 15.11.2016). [Электронный ресурс]
51. Березовский В. А. Биофизические характеристики тканей человека: справочник / Березовский В. А., Колотилов Н. Н. // *Наукова думка*. – 1990. – С. 224
52. Бушманов А.В. Расчет нагрузки в области тазового кольца / Бушманов А. В., Соловцова Л. А. // *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*. – 2005. – № 21.
53. Кнетс И.В. Деформирование и разрушение твердых биологических тканей / Кнетс И.В., Пфафрод Г.О., Саулгозис Ю.Ж. // *Зинатне*. – 1980. – С. 20 – 31.
54. Экспериментальное исследование сплавов с памятью формы, применяющихся в медицине / Кучумов А.Г., Лохов В.А., Словиков С.В. и др. // *Российский журнал биомеханики*. – 2009. – № 3. – С. 7 – 19