

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИТНЫХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛОГИИ ПЛОТНОСТЕЙ
ПО ШКАЛЕ ХАУНСФИЛДА**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре Машиноведения и инженерной графики.

Научный руководитель:	Митряйкин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, КНИТУ-КАИ, профессор кафедры «Машиноведения и инженерной графики»
Официальные оппоненты:	Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» (РК-9); Ваньков Юрий Витальевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»;
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Защита состоится «28» декабря 2020 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.079.09 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 31/7 (учебное здание №5, ауд. 301)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.079.09.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». Диссертация и автореферат размещены на сайте <http://old.kai.ru/science/disser/index.phtml>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д.212.079.09,
кандидат технических наук, доцент



Е.С. Денисов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время композиционные материалы стали все активнее и активнее использоваться не только в привычных сферах: машиностроении, самолетостроении, ракетной технике и т.д., но и в других сферах, например, в разработке человекоподобных роботов, близких аналогов человека, не только по внешнему облику и умственным способностям, но и по биологическому функционалу нервных каналов, тканей и костей. При этом одной из актуальных задач для последних является как создание аналогов костей из композитных биосовместимых и других материалов, так и оценка механических свойств изделий из таких материалов, их прочности и надежности.

Наиболее распространенным подходом в этом случае является применение методов неразрушающего контроля (МНК). В этом случае можно получить полную информацию о структуре материала, наличии дефектов, провести оценки механических свойств. МНК включают в себя исследование физических принципов, на которых базируются методы и средства контроля, не ухудшающие эксплуатационную пригодность и не нарушающие целостность объектов. И только МНК дают практически стопроцентную гарантию, что именно это изделие прошло проверку на прочность и пригодно к использованию.

В настоящее время наиболее перспективным направлением для оценки механических свойств является использование компьютерной томографии. Данный подход позволяет получать информацию о структуре сложных анизотропных, мелкозернистых или пористых материалов, а также иных структур с характерной неоднородностью. Эта задача особенно актуальна на этапе диагностики, когда необходимо получить максимально возможную информацию о прочности и жесткости композитной костной ткани и сравнить ее с природным образцом. Самым технологичным в настоящее время является процесс объемного (спирального) сканирования, который реализован в медицинских компьютерных томографах последнего поколения.

Важнейшими достижениями современной композитного материаловедения является создание и внедрение многоуровневых имплантов, которые полностью повторяют структуру человеческих костей. Такие аналоги получены в НИТУ «МИСиС», ИФПМ СО РАН, проводятся работы в СТИ НИЯУ МИФИ и КНИТУ-КАИ. Первый слой полимерного импланта сплошной, он имитирует кортикальную кость для обеспечения механической прочности. Внутренний слой имеет поры. На данном этапе практики важным является определение функциональных зависимостей качества аналога костной ткани и кости в целом с качеством и прочностью их сочленений. Традиционные методы и подходы неразрушающего контроля в большинстве случаев не могут решать такую задачу по ряду причин.

Изучение поведения механических характеристик системы «имплант сочленения-человеческая кость» или «имплант сочленения-искусственная кость» (далее будет использоваться обобщенный вариант «имплант-кость») выявило необходимость внедрения новых биоматериалов, которые обладали бы высокой прочностью со значением модуля упругости близким к костным человеческим

тканям. Эта задача может решаться на основе использования современных композиционных и аддитивных материалов. Между структурой и механическими свойствами материалов имеется определенная взаимосвязь, которая позволяет судить о прочностных характеристиках материала по результатам исследования структуры, не прибегая к измерению механических параметров и для установления статистической взаимосвязи между плотностью и механическими характеристиками.

Одним из современных методов диагностики костных структур является компьютерная томография (КТ), которая применялась для решения этих задач в работах: Закирова Р.Х., Ирматова П.В., Ирматовой М.С., Кошевой В.В., Романишина И.М., Романишина Р.И., Шардакова И.Н., Соловьева В.М., Шарамага Р.В., Щербакова М.Г. и др. Она объединяет информативные достоинства рентгеновского излучения с последними достижениями науки и вычислительной техники, но ее применение для одновременного определения плотности композиционных материалов и костных человеческих структур находится на стадии разработки.

Проблема прочности системы “имплант-кость” в настоящее время также является актуальной задачей. Она может достаточно успешно решаться с помощью современных методов расчета, например, метода конечных элементов (МКЭ). Значительный вклад в разработку методов расчета внесли: Акулич А.Ю., Акулич Ю.В., Ватульян А.О., Гаврюшин С.С., Каюмов Р.А., Кучумов А.Г., Коноплев Ю.Г., Лохов В.А., Няшин Ю.И., Саченков О.А., Тверье В.М., Cowin S.C., Gross T., Zysset P.K. и др. Создание математических моделей для этого метода требует подробных данных о геометрии, нагрузках и механических характеристиках указанной системы, что позволяет оценить вероятность нарушения работы сочленения, например, вывиха.

Таким образом, работа актуальна и посвящена вопросам разработки методики одновременного определения плотности и пористости композиционных структур с использованием компьютерного томографа, получения корреляционных зависимостей для определения плотности композитных и натуральных материалов по единой шкале Хаунсфилда (HU) с дальнейшим определением их прочностных и механических характеристик, разработке практических рекомендаций для заинтересованных организаций при создании методик неразрушающего контроля различных материалов и конструкций из них.

Объект исследования - метод неразрушающего контроля, основанный на использовании рентгеновской спиральной компьютерной томографии.

Предмет исследования - возможность применения компьютерной томографии для одновременной оценки характеристик композитных и биологических материалов, на примере костей и их сочленений, по единой шкале и научно-техническое обоснование указанной возможности.

Цель и задачи работы. Научно-техническое обоснование применения компьютерной томографии как общего метода неразрушающего контроля для анализа структуры и механических характеристик композитных, полимерных, аддитивных материалов, применяемых для создания искусственных костных структур, и их оценка в сравнении с механическими характеристиками челове-

ческих костных структур по единой шкале Хаунсфилда для решения задач построения скелета человекоподобных роботов и его сочленений.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ методов неразрушающего контроля плотности и пористости композиционных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур с целью определения возможности реализации на них единого подхода для технических и природных материалов.

2. Провести исследования на КТ различных технических и природных материалов и определить для них значения единиц Хаунсфилда (HU). Разработать методику определения плотности и пористости композиционных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур с использованием КТ на основе метода аналогии плотностей по единой шкале Хаунсфилда. На базе проведенных исследований построить корреляционные зависимости, позволяющие определить плотность и пористость различных материалов по значениям единиц HU: $\rho = f(HU)$; $V_{II} = f(HU)$.

3. Идентифицировать прочностные и механические характеристики композитных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур по данным полученных измерений с определением коэффициента ослабления.

4. Применить разработанные методы и полученные данные в практических задачах, в частности в задаче расчета напряженно-деформированного состояния элементов системы “имплант-кость”.

Методы исследования. При выполнении данной работы использованы современные программные средства: программа eFilm для обработки рентгеновских изображений томографии, математическое моделирование с применением численного решения МКЭ, решение задачи напряженно-деформированного состояния кости и сочленений в пакете Siemens NX/Nastran, определение линейного контактного взаимодействия с помощью расширенного метода Лагранжа.

Достоверность. Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук, корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам, совпадением теоретических результатов с данными экспериментов и результатами других авторов и обеспечивается применением апробированного аппарата математической статистики, согласованностью полученных результатов теоретических расчетов с результатами экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных, полученных при исследовании, обеспечивается применением аттестованных измерительных средств и апробированных экспериментальных методик, анализом погрешностей и высокой воспроизводимостью результатов измерений.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

- доказана возможность использования методов и средств компьютерной томографии для определения плотностей как природных, так и композитных костей скелета.

- разработана методика, позволяющая определять плотности как природных, так и композитных костей через единицы Хаунсфилда.

- разработана методика и получены корреляционные зависимости, позволяющие идентифицировать прочностные характеристики композитных и человеческих костей по результатам измерения плотностей с помощью КТ и их оценки по единой шкале Хаунсфилда.

- разработана математическая модель, позволяющая методом конечных элементов определить механические характеристики системы «имплант-кость» и оценить вероятность нарушения работы сочленения, например, вывиха.

Практическая ценность работы заключается в разработке практических рекомендаций по применению метода КТ для определения плотности и пористости композиционных и полимерных материалов, материалов, изготовленных аддитивным способом и костных структур по значениям шкалы Хаунсфилда; по применению полученных корреляционных зависимостей, позволяющих идентифицировать прочностные и механические характеристики композитных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур по коэффициентам ослабления; по применению математической модели для расчета критических нагрузок на сочленения системы «имплант-кость».

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований использовались при выполнении грантов РФФИ: №16-08-00416 «Оценка напряженно-деформированного состояния и прочность многослойных конструкций с учетом внутренних дефектов, определенных компьютерным томографом» и №19-08-00577 «Оценка влияния ударных повреждений на прочностные и усталостные характеристики многослойных композиционных конструкций»; в ООО «Ротор Мед», а также в научно-исследовательском процессе КНИТУ-КАИ, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Международной научно-практической конференции (НПК) «Современные технологии, материалы, оборудование и ускоренное восстановление квалифицированного кадрового потенциала – ключевые звенья в возрождении отечественного авиа- и ракетостроения», (г. Казань, 2012 г.); на XX, XXI и XXII Международных молодежных НК Туполевские чтения, (г. Казань, 2012 г., 2013 г., 2014 г.); на ежегодном Международном научном симпозиуме имени А.Г. Горшкова “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред”, (г. Москва, 2013 г., 2017 г., 2018 г.); на VI, VII, VIII и XIV Международных НПК «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности» (АКТО-2012; 2014; 2016; 2018), на VIII, IX и X школах-семинарах молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении”, (г. Казань, 2012 г., 2014 г., 2016 г.); на Международных НТК: АНТЭ-2015; 2018, (г. Казань 2015 г., 2018 г.); на XVII Международной НПК “Современные проблемы гуманитарных и естественных наук”, (г. Москва, 2013 г.); на Международной НТК “Актуальные проблемы физико-математических и гуманитарных наук”, (г. Казань, 2014 г.); на Всероссий-

ской НК “Обратные краевые задачи и их приложения”, посвященной 100-летию со дня рождения проф. М.Т. Нужина, (г. Казань, 2014 г.) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 22 работы, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК, включая две по специальности диссертации, одна статья в зарубежном издании, входящем в базу данных Scopus, один патент на полезную модель и 14 материалов докладов на конференциях различного уровня.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Материал изложен на 120 страницах, включая 17 таблиц, 62 рисунков. Список используемых источников содержит 86 наименований. В приложении приведены акты внедрения результатов работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.13 “Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” по п.1 “Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий” и п.2. “Разработка и оптимизация методов расчета и проектирование элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля”.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика, позволяющая определять плотности композиционных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур с использованием единого метода неразрушающего контроля – компьютерной томографии.

2. Методика, позволяющая определять плотности как биологических, так и композитных костей через единицы Хаунсфилда.

3. Методика и корреляционные зависимости, позволяющие идентифицировать прочностные характеристики композитных и человеческих костей по результатам измерения плотностей с помощью КТ и их оценки по единой шкале Хаунсфилда.

4. Математическая модель, позволяющая методом конечных элементов определить механические характеристики системы «имплант-кость» и оценить вероятность нарушения работы сочленения, например, вывиха.

5. Конструкция экспериментальных стендов и разработанных элементов системы «имплант-кость», внедренных совместно с указанными выше методиками и моделями.

Личный вклад автора. Все экспериментальные и теоретические результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии. Работы, отражающие основные результаты диссертации, написаны автором лично и совместно с научным руководителем.

Автор выражает благодарность кандидату физико-математических наук, доценту кафедры теоретической механики ИММ КФУ Саченкову О.А., заведующему отделением “Компьютерной томографии” Республиканской

клинической больницы, заслуженному врачу РТ Закирову Р.Х. и врачу-травматологу-ортопеду РНИИТО им. Р.Р. Вредена, кандидату медицинских наук Мазуренко А.В. за полезные консультации и предоставленную возможность работы на компьютерном томографе.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе анализируются методы неразрушающего контроля плотности и пористости полимерных композиционных материалов и костных структур. Использование современных методов неразрушающего контроля для определения плотности полимерных композиционных материалов связано в основном с оценкой косвенной статистической взаимосвязи плотности и параметров диагностики. При ультразвуковом контроле к параметрам диагностики относятся, например, скорость и затухание ультразвуковых колебаний, спектральные характеристики сигналов, при емкостном методе - диэлектрическая проницаемость, при радиационном контроле - линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения. После установления корреляционных связей между параметрами диагностики и физико-механическими свойствами материала на эталонных образцах можно оценить прочностные характеристики импланта. Для оценки состояния костной ткани применяются различные подходы, одним из основных методов является рентгеновская денситометрия. Существует несколько ее видов: двухэнергетическая денситометрия, костная периферическая денситометрия, двухфотонный метод и т.д. Кроме этого, применяется ультразвуковая денситометрия. Основное предназначение денсифметров - определение проекционной минеральной плотности (г/см^2) в исследуемых участках скелета. При упругих деформациях “имплант-кость” нагрузка на ткань зависит от соотношения механических характеристик материала импланта и участков костной ткани, и чем это соотношение меньше, тем ниже вероятность разрушения кости давлением импланта. Производители указывают основные механические характеристики имплантов: модуль упругости, предел прочности и т.п. в единицах СИ. Механические характеристики костной ткани также необходимо определять через физическую плотность костной ткани в системе СИ (г/см^3). Для этого требуется совершенствование существующих методов диагностики костной ткани.

Таким образом, рассмотрев методы определения плотности полимерных композиционных материалов и костных структур, сделан вывод, что эти методы не позволяют одновременно оценить плотность кости и импланта. Поэтому для диагностики системы “имплант-кость” наиболее приемлемым оказывается КТ, поскольку она может одновременно оценить плотность кости и импланта и

с использованием соответствующих зависимостей оценить их прочностные характеристики.

Вторая глава посвящена изучению принципа работы рентгеновского компьютерного томографа и оценке его технических возможностей для диагностики композиционных материалов и костных структур.

Самым технологичным в настоящее время является процесс объемного (спирального) сканирования, который реализован в медицинских томографах последнего поколения. Ранее такие томографы для диагностики композиционных материалов и костных структур одновременно, не использовались. В работе для исследования структур материалов имплантов и костных тканей использовался мультиспиральный компьютерный томограф Brilliance 64 Philips.

Перед проведением измерений проводилась оценка чувствительности компьютерной томографической системы. Для этого использовались фантомы, которые обеспечивают измерение параметров качества изображения: проверка шкалы контрастности, пространственное разрешение, определение толщины среза, оценка разрешения при низкой контрастности, оценка шума и однородности. Компьютерный томограф позволяет проводить измерение внутренних размеров с точностью до 0,5 мм, что важно при анализе износа элементов эндопротеза, например, полиэтиленового вкладыша.

Способность вещества поглощать рентгеновское и γ -излучение характеризуется коэффициентом ослабления μ (см^{-1}). В технике КТ принято измерять объемное ослабление не в абсолютных, а в относительных по отношению к ослаблению воды единицах, называемых числами Хаунсфильда (HU):

$$HU = 1000 \frac{\mu - \mu_{\text{воды}}}{\mu_{\text{воды}}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент ослабления исследуемого материала; $\mu_{\text{воды}}$ – коэффициент ослабления воды. В этой системе отсчета: вода = 0 HU, воздух = -1000 HU. В отличие от биологических структур значений коэффициентов HU для композиционных материалов в литературе очень мало. Программное обеспечение КТ позволяет определять значения HU: в точке сечения образца, вдоль выбранного направления или найти среднее значение для соответствующей площади. Пример таких измерений для многослойного композиционного материала показан на рис. 1. Белой линией показан маршрут измерений, а на графике даны значения HU как функции пути. Погрешность измерений единиц HU, определенная при тестировании КТ, составляет 3%. Комплексному исследованию характеристик композиционных материалов на КТ предшествовали тестовые испытания эталонных образцов. Цель этих исследований оценить возможности КТ и подобрать значения параметров излучения.

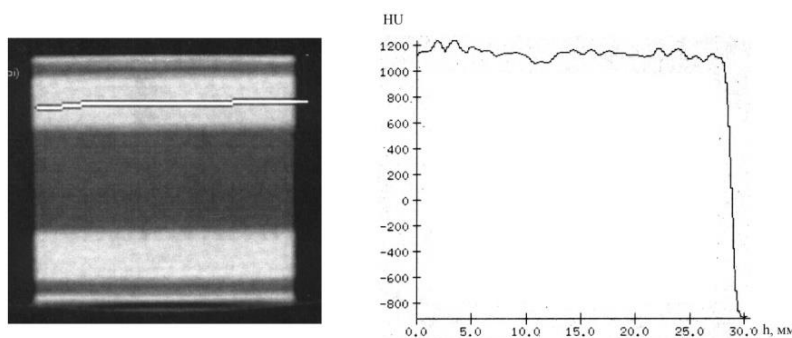


Рис. 1- Томограмма сечения образца и значения HU в исследуемом слое

Были исследованы образцы из различных композиционных материалов, керамики, полимеров, применяемых для изготовления имплантов. Первоначально находилась их плотность по ГОСТ15139-73, а затем они были исследованы на КТ. Результаты плотности ρ и усредненные значения коэффициентов ослабления HU приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материал	Стекло-пластик	Стекло-пластик Т-25	Угле-пластик	Орган-но-пластик	Органист	Резина	Капролон	Во да
ρ , г/см ³	2,5	1,95	1,9	1,4	1,4	1,37	1,09	1
HU	1284	978-1100	191	53	200-250	450-800	50-80	0

Плотность материала зависит от пористости, которая является безразмерной величиной и оценивает процентное содержание пор в твердом теле. Значения пористости при производстве импланта определяют на образцах свидетелях, вырезанных из припусков изготавливаемых конструкций, но в ходе эксплуатации эти показатели от действия влаги, температуры, кислотности и т.д. меняются в худшую сторону. Кроме этого конструкции получают усталостные и ударные повреждения, которые приводят к отслоению волокон наполнителя от эпоксидной основы (матрицы). Это увеличивает объемную пористость и, как следствие, снижаются прочностные характеристики. Следовательно, контролируя значение пористости через числа HU, можно прогнозировать остаточный ресурс импланта.

Величина объемной доли пор в исследуемых образцах определялась на рентгеновском компьютерном томографе Phosnix V tome XS 240 и на электронном микроскопе Axiovert 200 MAT с последующей обработкой изображений.

В настоящее время для изготовления имплантов применяют 3D принтеры. В работе были исследованы аддитивные образцы, изготовленные из различных материалов. Структура этих образцов первоначально была изучена на электронном сканирующем микроскопе AURICA Gross Beamc энергодисперсивным спектрометром INCAX-MAX. На рис.2,а показана структура образца, изготовленного спеканием алюминиевого порошка лазерным лучом, второй образец изготовлен с применением струйной технологии из полимера (рис.2,б). Структура этих образцов пористая, что в дальнейшем способствует заполнению

ее костной тканью. Плотность алюминиевого образца $\rho = 2,64 \text{ г/см}^3$, полимерного образца $\rho = 920,6 \text{ г/см}^3$. Результаты исследования этих образцов на КТ приведены на рис. 3. Среднее значение для первого образца $HU=2500$, для второго $HU = -300$.

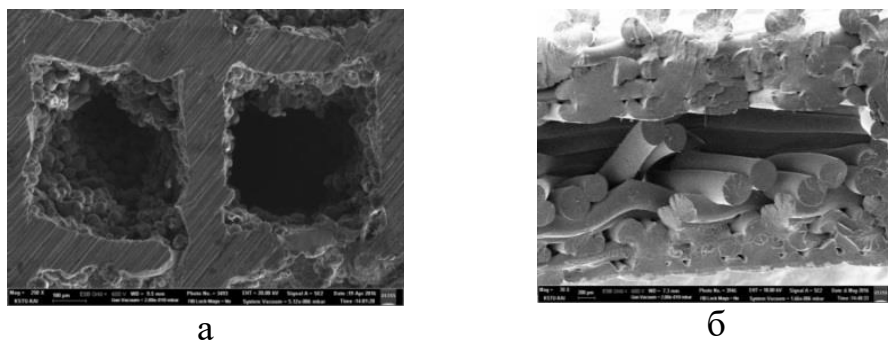


Рис. 2- Результаты исследования пористости образцов

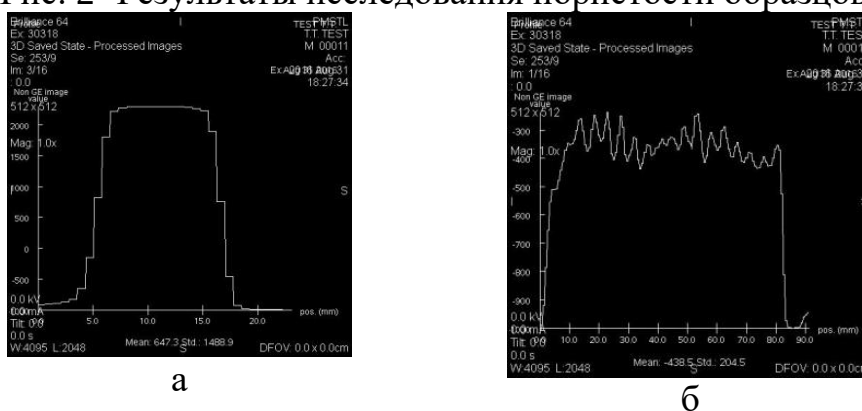


Рис. 3- Томограммы аддитивных образцов

В результате, после проведения тестовых исследований различных композиционных материалов на спиральном компьютерном томографе, был сделан вывод о том, что импланты, изготовленные из полимерных композиционных материалов, могут быть с достаточной точностью исследоваться одновременно с костными структурами.

В третьей главе разработана методика определения плотности и пористости композиционных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур с использованием КТ на основе метода аналогии плотностей по шкале Хаунсфильда.

Использование современных методов неразрушающего контроля для таких задач чаще всего связано с оценкой косвенной статистической взаимосвязи физических параметров и параметров, которые могут быть определены в процессе диагностики. После установления корреляционных связей между этими параметрами на эталонных образцах можно определить физические параметры материала и судить об их прочности. На базе проведенных исследований автором построены корреляционные зависимости, позволяющие определить плотность и пористость стеклопластика СК-211-211Б по значениям единиц HU после обследования на КТ:

$$\rho = 0,0014HU + 0,49, \quad (2)$$

$$V_{II} = 41,5 - 0,039 HU . \quad (3)$$

Эти зависимости можно использовать для оценки механических характеристик с использованием формул для определения прочности при сжатии и прочности при горизонтальном сдвиге (Fried, 1965):

$$\sigma_{b-1} = 112 - 73 \cdot V_{II} , \quad (4)$$

$$\tau_b = 6,7 - 0,55 \cdot V_{II} . \quad (5)$$

Установлено, что прочность при сжатии σ_{b-1} и прочность при горизонтальном сдвиге τ_b убывают почти линейно с ростом пористости.

Подобные зависимости были получены также для углепластика ВКУ-25, изготовленного методом автоклавного формирования и Porher 4510/BCЭ21, изготовленного методом инфузии.

Установление корреляционной зависимости между плотностью ρ и единицами HU для костных структур несколько отличается от методики для композиционных материалов, поскольку изготовить образцы и провести прямые измерения затруднительно. Усредненные значения единиц HU для кортикальной кости составляют примерно 1500 HU, для губчатой ткани 400-500 HU. С изменением значений плотности костных структур коэффициенты HU изменяются. В работе предложено сравнивать значения HU для выбранного участка кости (Рис. 4) со значениями плотности, полученными для этого участка методами денситометрии. Кроме этого использовались формулы, полученные другими авторами. В них предложены эмпирические формулы, связывающие единицы HU костной ткани с плотностью, модулем упругости и с упругими прочностными характеристиками костной ткани.

$$\rho = A \cdot HU + 1000 . \quad (6)$$

где A - корректировочный коэффициент, его значение $A=0,523 \text{ г/м}^3$, однако указано, что его значение необходимо уточнять.

$$E = a_E \cdot \rho^{b_E} ; \quad (7)$$

$$\sigma_{b-1} = a_\sigma \cdot \rho^{b_\sigma} . \quad (8)$$

где E - модуль упругости; σ_{b-1} - предел прочности при сжатии; a_ρ и b_ρ - корректировочные коэффициенты, значения которых необходимо уточнять индивидуально.



Рис. 4- Томограмма ТБС и значения HU

Таким образом, для получения корреляционных зависимостей образцы первоначально исследовались на СКТ, затем определялась их плотность и пористость.

После установления корреляционных связей между этими параметрами на эталонных образцах можно определить физические параметры и судить об их пористости, прочности, что позволяет в дальнейшем учитывать при исследовании различных конструкций при созданиях скелета человекоподобных роботов и его сочленений, определить его пористость на конкретном участке и прогнозировать его механические характеристики.

В четвертой главе с использованием МКЭ решалась задача определения критических нагрузок вывиха эндопротеза ТБС с наличием снижения прочностных характеристик костных структур. Для этого была разработана численная реализация контактного взаимодействия для конечно-элементной модели, были проведены численные исследования влияния степени недопокрытия вертлужного компонента на несущую способность импланта и определение критической силы для различных значений модуля упругости кости.

На рис. 5 представлена базовая расчетная схема исследуемой системы: S_I – поверхность имплантата (дуга AD – чашка вертлужного компонента, дуга A_1D_1 – головка вертлужного компонента), S_p – полная поверхность бедренной кости, $S_p \cap S_I$ – поверхность контакта кости с имплантатом (дуга BD), $S_I \setminus (S_p \cap S_I)$ – область недопокрытия (дуга AB), O – центр головки вертлужного компонента, N – реакция бедренного компонента эндопротеза, EF – направление ножки бедренного компонента, θ – угол наклона шейки бедренного компонента, S_f – поверхность со статическими граничными условиями, S_k – поверхность с кинематическими граничными условиями.

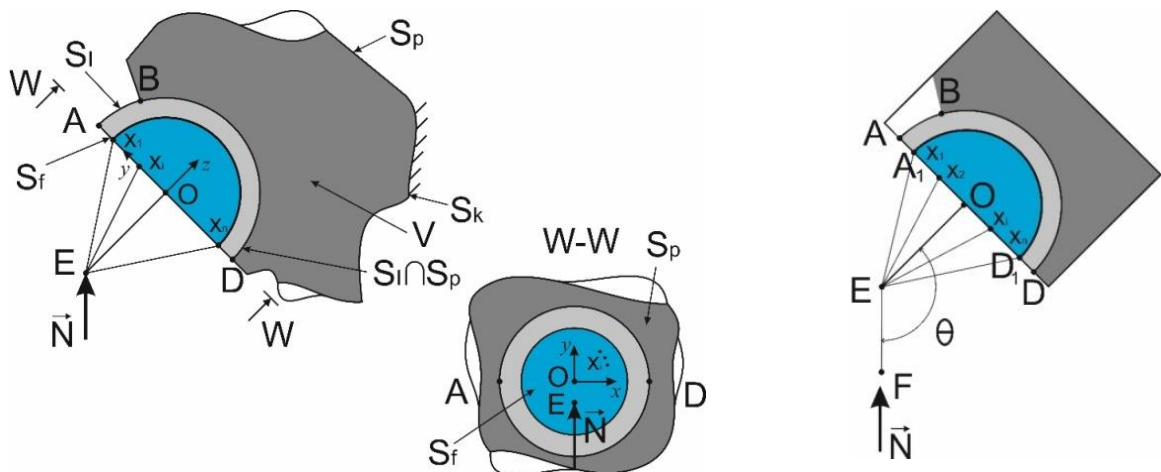


Рис. 5- Расчётная схема

Механическое поведение системы, занимающей область V в R^3 с границей S , в рамках линейной теории упругости описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot \tilde{\sigma} &= 0, & \forall \mathbf{x} \in V, \\
\tilde{\varepsilon} &= \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T), & \forall \mathbf{x} \in \bar{V}, \\
\tilde{\sigma} &= \tilde{E} : \tilde{\varepsilon}, & \forall \mathbf{x} \in \bar{V}, \\
\vec{u} &= 0, & \forall \mathbf{x} \in S_k, \\
\vec{R}(\vec{X}_i), i = \overline{1, n}. & & \forall \vec{X}_i \in S_f.
\end{aligned} \tag{9}$$

Здесь $\bar{V} = V \cup S$, $S = S_k \cup S_f$, $\vec{u}$ – вектор перемещений, $\tilde{\sigma}$ – тензор напряжений; $\tilde{\varepsilon}$ – тензор упругих деформаций; $\vec{r}_p^0, \vec{u}_p$ – начальное положение и перемещение точек кости, $\vec{r}_1^0, \vec{u}_1$ – начальное положение и перемещение точек имплантата, $\tilde{E}$ – тензор упругих свойств, S_f – поверхность со статическими граничными условиями, S_k – поверхность с кинематическими граничными условиями. Для точек, вошедших в контакт, выполняется условие (10). На поверхности контакта тела взаимодействуют друг с другом, что приводит к возникновению нормального давления (11) и сил трения (12).

$$(\vec{r}_p^0 - \vec{r}_1^0) \cdot \vec{n} = (\vec{u}_p - \vec{u}_1) \cdot \vec{n}, \quad \forall \mathbf{x} \in S_p \cap S_l; \tag{10}$$

$$\vec{t}_n = -t_n \vec{n}, t_n > 0, \quad \forall \mathbf{x} \in S_p \cap S_l; \tag{11}$$

$$|t_t| - t_n f \leq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in S_p \cap S_l. \tag{12}$$

Алгоритм реализации МКЭ основан на шаговом во времени поиске нового решения на основании начальных и граничных условий. Ввиду сложности геометрии реализация задачи определения НДС ТБС реализовывалась в МКЭ в пакете Siemens NX/Nastran. Трехмерный элемент объемного НДС с восьмью узлами используется для трехмерного (3D) моделирования объемных конструкций. Для проведения численных исследований была построена трехмерная модель тазобедренного сустава, а также ацетабулярного компонента. В расчетах использовался четырехузловой тетраэдральный конечный элемент с линейной аппроксимацией. Ацетабулярный компонент моделировался как двухкомпонентный объект, внешняя чашка титановая ($E = 112$ ГПа, $\nu = 0.3$), внутренняя чашка керамическая ($E = 102$ ГПа, $\nu = 0.26$, где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона). Первоначально были заданы характеристики кости $E = 6$ ГПа, $\nu = 0.3$, что соответствует плотности кости человека возраста 30 лет. Затем эти значения уменьшались. Коэффициент трения между костной тканью и имплантатом принимался равным 0.95, между титановым и керамическим компонентами задавалось условие прилипания. Диаметр титановой чашки брался на 4 мм больше диаметра вертлужной впадины, проводились расчеты для чашек диаметром 52, 54, 56 мм. Дисплазия вертлужной впадины моделировалась

сферическим вырезом. По стандарту ISO 7206-8, ГОСТ Р 52640 для расчетов первоначально было принято значение нагрузки $F=3300$ Н.

На основании результатов численных расчетов был изучен механизм потери несущей способности ацетабулярного компонента, получены зависимости критической реакции (F , H) в суставе от различных значений модуля упругости кости и величин недопокрытия. С уменьшением модуля упругости костной ткани значения критической силы снижаются, следовательно, будет снижаться и величина недопокрытия. Для случая с изменением костной структуры $0,75E$ величина недопокрытия уменьшается до 24-25%. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Для подтверждения полученных результатов был спланирован и проведен эксперимент. Испытания проводились на универсальной машине УТС 110М-100, с использованием разработанного автором устройства (Патент РФ № 169201). В экспериментах использовались модели тазобедренных суставов на базе костей Large Left Hemi Pelvis фирмы Sawbones. Общий вид испытательного стенда приведен на рис. 7. В процессе проведения экспериментов был изучен механизм потери несущей способности вертлужного компонента (рис. 8).

Таблица 2

E , МПа %	6000	4800	4500	4320
23	2890	2312	2168	2081
26	2400	1920	1800	1728
30	1900	1520	1425	1368
33	1750	1400	1313	1260
35	1620	1296	1215	1166
39	1300	1040	975	936
43	1000	800	750	720

Эксперимент позволил определить допустимые величины степени недопокрытия вертлужного компонента, при которых под действием статистической нагрузки возможно функционирование протезируемого сустава.

Также было оценено влияние винтовой фиксации на несущую способность импланта. Расчетные величины критической силы превышают данные эксперимента. Указанное отличие можно объяснить применяемым критерием потери несущей способности, в экспериментах было отмечено, что после первой (локальной) потери несущей способности чашка под действием внешних сил занимает новое положение, и окончательная потеря несущей способности происходит уже для этого положения. На основании теоретико-экспериментальных исследований сформулированы выводы: при степени недопокрытия до 20% имплант сохраняет несущую способность, до 35% - рекомендуется винтовая фиксация вертлужного компонента, свыше 35% - не гарантируется надежная стабилизация вертлужного компонента.

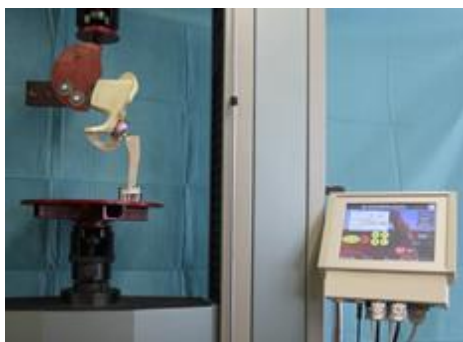


Рис.7- Испытательный стенд



Рис.8- Этапы поворота вертлужного компонента

Результаты расчета критической нагрузки для меньших значений модуля упругости кости (коэффициента недопокрытия 30%) приведены в таблице 3. При снижении модуля упругости E на 28%, нагрузка уменьшается на такую же величину.

В целом, полученные результаты согласуются с данными литературы и с результатами других авторов.

Таблица 3

E (МПа)	6000	4800	4500	4320
F (Н)	1900	1520	1425	1368

Разработанная методика может использоваться в практике заинтересованных организаций при создании методик неразрушающего контроля различных конструкций для создания скелета человекоподобных роботов и его сочленений.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении представлены основные результаты и выводы по работе.

1. Проведен анализ методов неразрушающего контроля плотности и пористости различных материалов: композиционных и полимерных материалов, материалов, изготовленных аддитивным способом и костных структур. Сделан вывод о том, что наиболее приемлемым методом исследования неразрушающего контроля является метод КТ. В случае необходимости, методом КТ можно одновременно оценивать различные технические и биологические материалы, например: костную структуру и эндопротеза (который может быть изготовлен из различных материалов).

2. Проведены исследования на КТ различных технических и биологических материалов и определены для них значения НУ, результаты представлены в работе. Разработана методика определения плотности и пористости композиционных и полимерных материалов, аддитивных образцов и костных структур с использованием КТ на основе метода аналогии плотностей по шкале Хаунсфильда.

В работе предлагается использовать методику на основе КТ, а именно за основу положена шкала Хаунсфильда (погрешность измерения 3%). В начале, определяется плотность образцов по ГОСТ15139-73, затем образцы исследуются на КТ и определяются НУ в различных точках образца или вдоль выбранного сечения. Строятся корреляционные зависимости между числами Хаунсфильда (НУ) и плотностью исследуемого материала (ρ).

Для определения плотности и пористости костных структур, предлагается использовать результаты денситрии и результаты, полученные другими авторами.

3. На базе проведенных исследований для стеклопластиковых и углепластиковых материалов построены корреляционные зависимости, позволяющие идентифицировать их плотность и пористость по значениям единиц НУ и находить различные механические характеристики исследуемых материалов.

Разработана методика определения механических характеристик костной ткани в зоне установки эндопротеза по значениям единиц НУ.

4. На базе МКЭ разработана математическая модель для расчета напряженно-деформированного состояния кости в зоне крепления эндопротеза, позволяющая определить механические характеристики системы «имплант-кость» и оценить вероятность нарушения работы сочленения, например, вывиха.

Также математическая модель позволяет оценить риски вывихов с учетом индивидуальных характеристик костной ткани и недопокрытия вертлужного компонента. Для подтверждения результатов был проведен механический эксперимент.

Разработана методика экспериментальных испытаний, изготовлена экспериментальная установка, на которой определены значения критической нагрузки, при которой происходил вывих эндопротеза.

Проведенный механический эксперимент подтвердил результаты, полученные при конечно-элементном математическом моделировании значения максимальной нагрузки. А именно, при степени недопокрытия до 20% имплант сохраняет несущую способность, до 35% - рекомендуется винтовая фиксация вертлужного компонента, свыше 35% - не гарантируется надежная стабилизация вертлужного компонента.

Результаты расчета критической нагрузки с меньшими значениями модуля упругости кости (коэффициента недопокрытия 30%), а именно: при снижении модуля упругости E на 28%, нагрузка уменьшается на 30%.

В целом, полученные результаты согласуются с данными литературы и с результатами других авторов.

Разработанная методика может использоваться в практике заинтересованных организаций при создании методик неразрушающего контроля различных конструкций для создания скелета человекоподобных роботов и его сочленений.

В приложении представлены акты внедрения результатов работы.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК России по специальности 05.11.13

1. Зайцева Т.А. Исследование плотности и пористости аддитивных материалов с применением спиральной компьютерной томографии / В.И.Митряйкин, **Т.А.Зайцева** // Вестник НЦ БЖД. -2020.-№3(45).-С.168-174.
2. Зайцева Т.А. Применение спиральной компьютерной томографии для расчета предельной нагрузки на эндопротез тазобедренного сустава / **Т.А.Зайцева**, А.Д.Лустин // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. -2020.-№3.-С.97-103.

В изданиях из перечня ВАК России по смежным специальностям

1. Зайцева Т.А. Внедрение спиральной компьютерной томографии для определения механических характеристик материала путем исследования его внутренней структуры / Е.В. Митряйкина, **Т.А.Зайцева** // Научно-технический вестник Поволжья. -2012.-№ 6.-С.311-315.
2. Зайцева Т.А. Математическое моделирование вывиха имплантат в тазобедренном суставе/ Ю.Г. Коноплев, О.А. Саченков, В.И. Митряйкин, **Т.А.Зайцева** // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. -2013.-№ 1.-С.99-104.
3. Зайцева Т.А. Математическое моделирование установки ацетабулярного компонента с недопокрытием/ Ю.Г. Коноплев, О.А. Саченков, В.И. Митряйкин, **Т.А.Зайцева** // Научно-технический вестник Поволжья. -2014.-№ 4.-С.22-25.
4. Зайцева Т.А. Расчетно-экспериментальные исследования лопасти винта вертолета с ударными повреждениями/ В.И. Митряйкин, Е.А. Сидоров, Е.В. Кротова, **Т.А.Зайцева** // Научно-технический вестник Поволжья. -2017.-№ 5.-С.64-68.
5. Зайцева Т.А. Расчет критической нагрузки вывиха эндопротеза тазобедренного сустава с различными патологиями/ В.И. Митряйкин, **Т.А.Зайцева**, Р.М. Габсаттаров, А.А. Хабибуллин // Научно-технический вестник Поволжья. -2018.-№ 9.-С.55-61.

Публикации в иностранных изданиях, входящих в базу данных Scopus

1. Zaitseva T.A. Implementation of contact interaction in a finite-element formulation / O.A. Sachenkov, V.I. Mitryaikin, Yu.G. Konoplev, **T.A. Zaitseva** //Applied Mathematical Sciences. -2014.-Vol.8, no. 159. -С.7889-7897.

Патенты РФ:

1. Пат. № 169201 Российская Федерация, МПК А61F 2/02, А61F 2/30, А61F 2/32, А61F 2/34, G61N 3/08 Устройство для испытания эндопротеза тазобедренного сустава на осевое сжатие. /Митряйкин В.И., Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Мазуренко А.В., **Зайцева Т.А.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский национальный исследователь-

ский технический университет им.А.Н. Туполева-КАИ”. - № 2016100546/14; заявл. 11.01.2016; опуб. 09.03.2017, Бюл. №27-12 с.:ил.

Публикации в других изданиях

1. Зайцева Т.А. Исследование и решение контактной задачи при эндопротезировании тазобедренного сустава/О.А. Саченков, **Т.А.Зайцева**// Международная молодежная научная конференция XX Туполевские чтения. -Казань, 2012. -Т III. Ч.1.- С.344-346.

2. Зайцева Т.А. Исследование и решение контактной задачи при эндопротезировании/ В.И.Митряйкин, О.А.Саченков, **Т.А.Зайцева** // Труды VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова “Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении” – Казань, 2012. - С497-499.

3. Зайцева Т.А. Моделирование вывиха имплантата в тазобедренном суставе. / В.И. Митряйкин, **Т.А. Зайцева**, Р.А. Салыхова//XVII Международная научно-практическая конференция “Современные проблемы гуманитарных и естественных наук”. – М.,2013. -С.26-29.

4. Зайцева Т.А. Исследование биомеханики тазобедренного сустава с дисплазией вертлужной впадины при тотальном эндопротезировании. /О.А. Саченков, Р.А. Салыхова, **Т.А. Зайцева** //Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред, ежегодный международный научный симпозиум имени А.Г. Горшкова. – М., 2013. -С.99.

5. Зайцева Т.А. Диагностика композиционных конструкций спиральным рентгеновским компьютерным томографом /В.И. Митряйкин, А.В. Сачков, **Т.А. Зайцева** // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов IX школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 10-12 сентября 2014г. -Казань: Академэнерго, 2014-. С.241-242.

6. Зайцева Т.А. Результаты исследований плотности и пористости композиционных конструкций с применением спиральной компьютерной томографии/ В.И. Митряйкин, Е.В. Кротова, **Т.А. Зайцева** // Международная научно-практическая конференция АКТО. -Казань,2014. -С.78-80.

7. Зайцева Т.А. Диагностика биомеханических структур спиральным компьютерным томографом/ Митряйкин В.И., Жарков О.А., **Т.А. Зайцева**, Кротова Е.В.//Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики “АНТЭ-2015”: Международная научно-техническая конференция, 19-21 октября 2015 года: материалы конференции, сборник докладов. - Казань: Изд-во “Бриг”, 2015. -С.186-190.

8. Зайцева Т.А. Диагностика состояния композитных элементов конструкций на спиральном компьютерном томографе / В.И.Митряйкин, Е.В. Кротова, **Т.А. Зайцева** // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 13 – 15 сентября 2016 г. – Казань: КазНЦ РАН, 2016. -С.272-273.

9. Зайцева Т.А. Усовершенствование метода спиральной компьютерной томографии для идентификации механических характеристик композитных и биологических материалов при расчете системы «Имплант-кость» / Митряйкин В.И., Е.В. Кротова, **Т.А. Зайцева** // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием АКТО-2016: сборник докладов. - Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2016. -Т.1.-С.103-109.

10. Зайцева Т.А. Применение метода спиральной компьютерной томографии для идентификации механических характеристик композитных и биологических материалов при расчете системы “Имплант-кость”. / В.И.Митряйкин, **Т.А. Зайцева** // Технические науки: от вопросов к решениям: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. - г. Томск, 2016. № 1. -С.86-90.

11. Зайцева Т.А. Идентификация механических характеристик биоматериалов и костных структур/ В.И.Митряйкин, Р.Х.Закиров, **Т.А.Зайцева** //Международный научный симпозиум имени А.Г. Горшкова “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред”, М.,-2017. -С.124-126.

12.Зайцева Т.А. Применение спиральной компьютерной томографии для идентификации механических характеристик композитных и биологических материалов/ В.И.Митряйкин, Р.Х.Закиров, Т.А.Зайцева// сборник публикаций научного журнала “Globus” по материалам XVIII международной научно-практической конференции: “Технические науки - от теории к практике”, С-П.,-2017. -С.29-37.

13. Зайцева Т.А. Влияние прочностных характеристик кости на вывих эндопротеза /В.И.Митряйкин, **Т.А.Зайцева**, С.А.Егоров //Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 8-10 августа 2018 г.: материалы конференции. материалы докладов. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2018. -Т.2. -С.60-63.

14. Зайцева Т.А. Исследование структуры стеклопластиковых конструкций методом спиральной компьютерной томографии/В.И.Митряйкин, Р.Х. Закиров, Е.В. Кротова, **Т.А.Зайцева**//Международный научный симпозиуме имени А.Г. Горшкова “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред”, М.,-2018. -С.103-105.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ.л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ Д78

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, г.Казань, К.Маркса, 10