

## Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата: состояние и перспективы исследований

### Аннотация

Представлены сведения о состоянии и перспективах исследований в рамках научного направления «Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата» по докладам на XIV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в экологии и медицине – ФРЭМЭ'2020». Отмечена важная роль биомеханических исследований, результаты которых могут рассматриваться в качестве объективного критерия оценки морфофункциональной специфики костной системы, ее адаптационного и компенсаторного потенциала при решении актуальных задач биоимплантологии, биопротезирования и совершенствования диагностических методов.

Значительные успехи, достигнутые в последние десятилетия в области медицинской, инженерной биомеханики, не только определили вектор ее дальнейшего развития, но и создали научно-методические основы для совершенствования методов диагностики, эффективного лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата, решения актуальных задач биоимплантологии, а также развития новых научных направлений, в частности направления «Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата» [1], [2]. Оно является одним из востребованных как в современных биомедицинских исследованиях, так и в практической медицине: травматологии, ортопедии, в инженерных разработках новых биотехнических систем, конструкций и технологий. Подтверждением этому является постоянное включение в программу международной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ» результатов научно-практических работ по данному направлению и обсуждение их на заседаниях секции с аналогичным названием.

Труды конференции [1] дают представление об актуальности и многоплановости научно-технической и медицинской проблематики осуществляемых в России и за рубежом научных разработок по рассматриваемому направлению. Среди приоритетных задач – обеспечение постоянно растущей потребности практической медицины в костно-пластическом материале для проведения восстановительных оперативных вмешательств, вызванных производственным травматизмом, многочисленными локальными военными конфликтами, остеопорозом и другими заболеваниями опорно-двигательного аппарата [2], [3]. Эта потребность, исчисляемая несколькими миллионами имплантатов в год, может быть удовлетворена при использовании современных высокоэффективных технологий на всех этапах изготовления имплантатов – от заготовки и механической обработки костного материала до стерилизации и хранения [1, с. 192]. Работы последних лет свидетельствуют о важности роли качества поверхностного слоя имплантатов с точки зрения его морфофункциональных характеристик [4]. Для его обеспечения необходимо, в частности, исключить нагрев поверхности разрезаемых костных фрагментов при осуществлении их механической обработки как на этапе первичной заготовки костных образцов, так и при их окончательном изготовлении с приданием необходимых размеров и формы. Исследования с использованием инструментальных методов регистрации температуры [5] позволили разработать рекомендации по оптимизации параметров применяемых современных технологий гидродинамического резания, а также получить новые данные о теплофизических характеристиках костной ткани, позволяющие верифицировать существующие и развить новые модельные подходы к изучению температурных полей на поверхности костных фрагментов. Разработка математических моделей тепловых процессов в костной ткани при различных физико-механических воздействиях представляет практический интерес для остеологии, остеосинтеза, позволяет прогнозировать реакцию костной ткани на изменение температуры в зоне оперативных вмешательств при рекон-

структивно-восстановительных мероприятиях в биоимплантологии, при протезировании. В рассматриваемой работе с использованием метода наложения мгновенных точечных источников получена оценочная формула, позволяющая в рамках упрощенной модели в предположении постоянной температуропроводности получить динамику распределения температуры в костном образце при гидродинамической резке с фиксированной скоростью [1, с. 199].

Заслуживают внимания поиски альтернативных источников эффективных пластических материалов для формирования биоискусственных органов и тканей в реконструктивно-пластической хирургии, в качестве которых могут быть использованы проходящие экспериментальную апробацию биосовместимые наноматериалы – каркасные носители клеточных культур [1, с. 197]. При их создании необходимо учитывать характерное для стволовых клеток биоспецифическое распознавание, без которого невозможно создание биоматериалов – матриц для искусственных биоорганов. Это одна из особенностей получения биоматериалов с требуемыми функциональными характеристиками, что обуславливает использование в исследованиях моделирования свойств, определяющих совместимость минеральных материалов и клеточных культур.

Применение биомеханически совместимых материалов позволяет значительно улучшить функциональные возможности создаваемых ортопедических аппаратов для пациентов с поражением опорно-двигательной системы [1, с. 206]. В связи с этим представляют интерес перспективные разработки модульных многофункциональных протезов с унификацией деталей, достигающей 82 % [1, с. 211], изготавливаемых из композиционных материалов и эластомеров. В отличие от распространенных косметических или пассивных механических моделей эти устройства используют модули тактильного виброотклика и сенсорную систему обратной связи с датчиками положения пальцев, силы давления на поверхность предмета, предотвращения выскальзывания удерживаемого предмета. Такое техническое решение позволяет проводить «обучение» протеза с переключением настроек функционирования.

Биоэлектрические сенсоры используются и в активных модификациях конструкций экзоскелета, позволяющих пациентам с утраченными по различным причинам функциями конечностей (парез, рассеянный склероз, ДЦП, последствия инсульта, травм и др.) восстановить способность их движения. Новые разработки компонентов таких устройств [1, с. 236] направлены на совершенствование обратной связи в биотехнической системе «экзоскелет – пациент», модернизацию систем управления и питания, повышение их автономности и эффективности. Все эти работы имеют высокую социальную значимость в связи с большой востребованностью при осуществлении программ реабилитации инвалидов [1, с. 218].

Особую актуальность на современном этапе представляют работы по развитию клинических способов лечения и коррекции опорно-двигательного аппарата. Это в первую очередь исследования возможностей стимуляции остеогенеза для со-

вершенствования инновационных технологий, позволяющих управлять ростом костей и корректировать деформации конечностей у детей [1, с. 210]. Авторами не только представлено медицинское, экономическое и социальное обоснование проведения таких коррекционных мероприятий у пациентов дошкольного возраста с ахондроплазией, но и выработаны практические рекомендации по целесообразности их дополнения стимулирующими методами регенерации костной ткани с использованием, например, магнитных узлов (спицы, зажимы, стержни, кольца) дистракционных аппаратов. Для уменьшения времени оперативного вмешательства, снижения травматичности и повышения эффективности таких операций хирурги рекомендуют уделять особое внимание внедрению в практику новых технологий и оборудования для визуализации костных фрагментов и имплантатов во время операции [1, с. 215]. Используемые в настоящее время для этих целей рентгеновские аппараты довольно громоздки и неудобны в эксплуатации. Кроме того, их применение связано с получением достаточно высокой дозы облучения как персоналом, так и пациентом. Разработка новых аппаратов, использующих другие виды неионизирующего излучения (ультразвук, лазеры), является на современном этапе не просто модным трендом, но настоятельной необходимостью. Именно такие технологии и устройства – малогабаритные, мобильные, экологичные – позволят повысить уровень технологической оснащенности хирурга, обеспечить надежную и безопасную визуализацию его интраоперационных манипуляций, сделав их более точными и эффективными.

Не менее важны научно-практические разработки с применением различных видов коррегирующих остеотомий для лечения взрослых пациентов. Многолетний опыт использования в клинической практике [1, с. 217] не только подтвердил эффективность этих методик, но и выявил ряд связанных с возрастными особенностями этой группы больных проблем. Они обусловлены наличием остеопороза и других патологий костей, что приводит к замедлению процессов консолидации и необходимости аппаратной стимуляции костеобразования с применением ультразвуковых аппаратов. Разработка таких аппаратов – насущная задача для инженеров и врачей.

Многообразие природы пластических материалов имплантатов, поиски оптимальных решений достижения их эффективности не исключают необходимость обеспечения их стерильности. На основе многолетнего исследования этого процесса на базе совместной (МГУ им. М.В. Ломоносова – ФГБНУ ВИЛАР) лаборатории биомедицинских технологий разработана и запатентована инновационная технология комбинированной стерилизации биоимплантатов (патент РФ № 2630464 от 08.09.2017 г.). Она является дальнейшим развитием современных радиационных технологий [6] и позволяет вдвое снизить радиационную нагрузку при сохранении необходимого уровня стерильности за счет достижения синергетического эффекта при сочетанном использовании стерилизующих факторов различной физико-химической природы (озон + радиация). Важно отметить, что при этом степень интенсивности селективного воздействия каждого из этих факторов значительно уменьшается, в результате чего удается избежать существенных морфологических изменений костной ткани, снижения механических характеристик, остеоиндуктивных и остеокондуктивных свойств костных имплантатов, характерных для режимов радиационной стерилизации с высокими дозами поглощения [7].

Полученные экспериментальные данные [1, с. 192], [7] о влиянии стерилизующих факторов (озон и радиация) на морфофункциональные характеристики костных имплантатов, состоянии их поверхности в совокупности с результатами других авторов создали научную базу для дальнейшего развития и совершенствования технологий их изготовления с использованием различных методов физико-химической обработки. Особое внимание при этом акцентируется на оптимизации воздействующих факторов с точки зрения повышения эффективности, безопасности, технологичности, экономичности, до-

ступности методики и оборудования технологического процесса, а также на качестве биоимплантатов. Результаты комплексных исследований по оптимизации технологий изготовления костных имплантатов с использованием различных методов физико-химической обработки защищены патентами РФ (РФ № 2629664 от 31.08.2017 г., № 180532 от 15.06.2018 г., № 2679121 от 06.02.2019 г., № 2708235 от 05.12.2019 г.).

Оценивая важную роль биомеханических исследований для решения задач биоимплантологии, необходимо отметить значение получаемых при их выполнении результатов для дальнейшего развития диагностических методик, получения новых сведений о закономерностях изменения структуры, механических свойств костной ткани в норме с учетом биологических факторов, а также в условиях эксперимента и патологии, при нарушении ее композиционного состава [1, с. 201]. Биомеханические показатели служат объективным критерием оценки морфофункциональной специфики костной системы, ее адаптационного и компенсаторного потенциала, что подтверждает необходимость дальнейших исследований в рассматриваемом направлении.

В связи с этим следует особо подчеркнуть теоретическую важность и практическую значимость дальнейшего развития таких разработок, как открытие в 1970 году В.И. Лоциловым [8] явления возникновения в костях человека и животных собственных напряжений, уравновешиваемых в макрообъемах. Всестороннее изучение особенностей, связанных с этим явлением, установление новых закономерностей важно не только для разработки нового режущего инструмента, создания современных аппаратов и устройств для чрескостного остеосинтеза с учетом дополнительной деформации кости за счет собственных напряжений, но и для прогнозирования процессов формирования новой костной ткани [1, с. 201], [8].

Для получения объективных количественных данных о механических свойствах биологических минерализованных тканей необходимо использовать современные методики. К ним следует отнести методологию комплексного многофакторного биомеханического анализа костной ткани, в которой используются стандартные образцы цилиндрической формы, полученные при помощи полых фрез. Такие образцы, изготавливаемые по авторской методике [3] даже в условиях ограниченного количества исходного костного материала, успешно применяются для определения макро- и микротвердости, прочности на сжатие, плотности костной ткани. Их можно использовать при проведении морфологических, фрактографических исследований, определении композиционного и элементного состава костных фрагментов. Такая комплексная информация необходима при выборе донорского материала, контроле состояния костных имплантатов на различных этапах их изготовления и хранения [1, с. 201].

Новые возможности для разработки методов и создания новых видов диагностической аппаратуры открывает изучение вязкоупругих характеристик мягких биологических тканей и жидкостей. Одним из примеров практической реализации такого подхода является модернизация существующих УЗ-томографов для определения сдвигового затухания с использованием метода эластографии сдвиговой волной [1, с. 226]. Это дает возможность количественного определения параметров упругости зондируемой биоткани, а также величины модуля Юнга как в точке, так и в некоторой области. Такие разработки позволяют клиницистам получить новую информацию о костных образованиях, повысить диагностическую достоверность определения стадии фиброза печени.

Результаты исследований последних лет дают все больше оснований для постановки задач о персонализированном подходе к подбору донорского материала для проведения костной пластики. При этом одним из важных аспектов является необходимость учета физиологического состояния пациента. В установлении последнего существенную роль играет элементный статус [9], при определении которого могут приниматься во внимание не только результаты исследования непосредственно костной ткани, но и опосредованные данные элемент-

ного анализа других биосубстратов: ногтей, волос, слюны и др. Их состав при различных патологических состояниях организма коррелирует с составом костной ткани, результатами биомеханических исследований. Учет этих особенностей при осуществлении предварительной оценки донорского материала позволяет получать важную дополнительную информацию с целью оптимизации процесса репаративного остеогенеза при использовании костных имплантатов [1, с. 201].

Другой современной тенденцией в развитии подходов к повышению эффективности методов лечения опорно-двигательного аппарата является все более широкое использование специально созданных лекарственных средств, для целевой доставки которых непосредственно в зону костной пластики в качестве носителя служат костные имплантаты. Их характеристики должны удовлетворять ряду специфических требований в зависимости от конкретных условий их применения (механические свойства, композиционный состав), которые задаются и контролируются в процессе изготовления [1, с. 201].

Представленные в кратком обзоре сведения о новых медико-технических подходах, практических разработках лечебных методик, опыте их многолетнего применения дают возможность оценить научно-технический уровень и значимость результатов проводимых исследований, выявить общие тенденции их развития. Это способствует успешному решению актуальных научно-практических задач: коррекции и лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата – важнейшей составляющей современных программ здравоохранения по созданию эффективных здоровьесберегающих технологий.

#### Список литературы:

1. XIV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020». Владимир-Суздаль, 2020. Доклады, кн. 1, 2.
2. Воробьев К.А., Божкова С.А., Тихилов Р.М., Черный А.Ж. Современные способы обработки и стерилизации аллогенных костных тканей (обзор литературы) // Травматология и ортопедия России. 2017. № 23 (3). С. 134-147.
3. Розанов В.В., Матвейчук И.В., Литвинов Ю.Ю. Изучение биофизических свойств костной ткани для медико-биологических приложений // Альманах клинической медицины. 2016. Т. 44. № 2. С. 193-202.
4. Краснов В.В., Матвейчук И.В., Розанов В.В. и др. Оптимизация качества поверхностного слоя костных имплантатов с целью повышения их регенеративного потенциала // Гены и клетки. 2019. Т. XIV. № 5. С. 125.

5. Розанов В.В., Матвейчук И.В., Шутеев С.А. Исследование температурных полей на поверхности нативной костной ткани после гидродинамической инцизии // Медицинская техника. 2017. № 3. С. 18-20.
6. Розанов В.В., Матвейчук И.В., Черняев А.П., Николаева Н.А., Краснов С.А. Современное состояние и направления дальнейшего развития высокотехнологичных методов радиационной стерилизации // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 521-524.
7. Розанов В.В., Матвейчук И.В., Черняев А.П., Николаева Н.А. Изменения морфомеханических характеристик костных имплантатов при радиационной стерилизации // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 10. С. 1435-1440.
8. Лоцилов В.И. Внутренние собственные напряжения в трубчатых костях животных // Ортопедия, травматология и протезирование. 1971. № 8. С. 63-68.
9. Матвейчук И.В., Розанов В.В., Скальный А.В., Литвинов Ю.Ю. Вклад биоэлементологии в здоровьесберегающие технологии / Медико-технические технологии на страже здоровья «Медтех-2013», Португалия (о. Мадейра), 20-27.09.2013 г. Материалы XV научно-технической конференции. – М.: МГТУ, 2013. С. 108-110.

*Владимир Викторович Розанов,  
д-р биол. наук, профессор, ведущ. научный сотрудник,  
кафедра физики ускорителей и радиационной медицины,  
физический факультет,  
ФГБОУ ВО Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова,  
гл. научный сотрудник,  
Научно-исследовательский и учебно-методический центр  
биомедицинских технологий,  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
лекарственных и ароматических растений»,  
Игорь Васильевич Матвейчук,  
д-р биол. наук, профессор, гл. научный сотрудник,  
Научно-исследовательский и учебно-методический центр  
биомедицинских технологий,  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
лекарственных и ароматических растений»,  
г. Москва,  
e-mail: vrozanov@mail.ru*

---

*И.О. Козлов, Е.А. Жеребцов, К.В. Подмастерьев, А.В. Дунаев*

## **Цифровая лазерная доплеровская флоуметрия: устройство, обработка сигнала и апробация в клинической практике**

### **Аннотация**

Предлагаются метод и устройство для цифровой лазерной доплеровской флоуметрии, и исследуется подход к обработке сигнала с реализацией анализа распределения амплитудных значений спектра мощности по частотам доплеровского уширения. Представлен прототип устройства, описаны технические характеристики и настройки, согласно которым регистрировались эксперименты. Отработка методики проводилась с привлечением условно здоровых добровольцев разных возрастов и пациентов с сахарным диабетом 2-го типа. Результатом проведенных исследований является разработка бинарных классификаторов, позволяющих отнести добровольцев и пациентов в группы по функциональному состоянию микроциркуляции.

### **Введение**

Лазерная доплеровская флоуметрия – метод неинвазивной медицинской диагностики, развитие которого насчитывает более 40 лет, и активно применяющийся в медицинской практике. В пионерской публикации [1] описана возможность регистрации параметров микротока на основе анализа параметров рассеяния когерентного излучения на движущихся

частицах крови [2]. В дальнейших работах была обнаружена возможность регистрации методом ЛДФ-модуляции кожного микротока, обусловленной наличием физиологических механизмов активной регуляции микрососудистого русла. В последующие годы лазерная доплеровская флоуметрия технически совершенствовалась, были разработаны методы обработки и регистрации сигнала, а также его математическое моделирование.