

затухания сигнала. Данный вопрос является одним из критических при использовании данной технологии.

Проведенные эксперименты с использованием трех видеокамер показали работоспособность технологии захвата движения при исследовании движения спортсмена. Фиксировалось только движение человека. На данном этапе исследований деформация, т. е. движение спортивного снаряда, не рассматривалась.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОТКАНЕЙ СЕРДЦА И СОСУДОВ *IN VIVO*

Шилько С. В. \*, Туманов Э. В. †

\* ГНУ «Институт механики металлополимерных систем  
имени В. А. Белого НАН Беларуси», Беларусь, 246050, Гомель, ул. Кирова, 32-а  
[shilko\\_mpri@mail.ru](mailto:shilko_mpri@mail.ru)

† ФГБУ «Российский центр судебно-медицинской экспертизы Минздрава России»  
Россия, 125284, Москва, ул. Поликарпова, 12/13  
[e.tumanov@mail.ru](mailto:e.tumanov@mail.ru)

**Введение.** Объективная аттестация деформационных свойств отделов сердца и сосудов, представляющих собой слоистые анизотропные оболочки, образованные нелинейно-упругими биотканями, и, в ряде случаев, обладающие сократительной (актуаторной) функцией, является весьма сложной проблемой. Вместе с тем, ее решение теоретическими и экспериментальными методами механики позволяет обосновать выбор материала и конструкцию имплантатов, способы диагностики состояния и протезирования органов сердечно-сосудистой системы.

К настоящему времени основные данные о механических свойствах сердца и сосудов в основном получены посредством одноосных испытаний образцов, т.е. изолированных от указанных органов фрагментов (полосок) биотканей [1–3]. Существенное искажение их физиологически нормального состояния (отсутствие связи с прилегающими биотканями, искусственный характер стимуляции актуаторной функции, структурные изменения материала после препарирования) затрудняет экстраполяцию полученных данных на живые органы и систему кровообращения в целом.

Целью работы является определение комплекса механических характеристик сердца и кровеносных сосудов *in vivo* в различных фазах кардиоцикла.

**Метод исследования.** Способность сердца выполнять значительную работу в условиях чрезвычайно большого числа кардиоциклов при минимальной толщине стенок камер (предсердий и желудочков) обусловлена оптимальной ориентацией и концентрацией миокардиальных волокон и капилляров. Вместе с тем, кардиомиоциты (клетки «матричной фазы» миокарда) малы в сравнении с толщиной стенок сердца. Это позволяет в первом приближении отнести миокард к квазиоднородным композитам и определять его вязкоупругие характеристики методом, локальным в масштабе отдела сердца и макроскопическим по отношению к тонкой (клеточной) структуре указанной биоткани.

При математическом моделировании механического поведения кровеносных сосудов и сосудистой сети в целом также могут быть сделаны корректные упрощающие предположения [4], позволяющие создать эффективные программно-аппаратные средства биомеханической диагностики [5].

Преимущество данного расчетно-экспериментального подхода в сравнении с ранее названными методами статических механических испытаний [1–3] заключается в возможности определения деформационных характеристик биотканей без изготовления образцов специальной формы и отсутствии повреждений органа при проведении измерений; высокой производительности и информативности измерений; возможности сканирования свойств по поверхности органа.

Из этих соображений и для максимального сохранения физиологического состояния сердца применяли процедуру идентификации феноменологической модели вязкоупругой среды и метод динамического контактного индентирования, ранее использованный для биомеханической диагностики скелетных мышц *in vivo* [6]. В качестве подопытных животных были взяты крысы, миокард которых по целому ряду признаков анатомически сходен с миокардом человека. Исследовали изолированные сердца белых беспородных крыс обоих полов 5–7 месячного возраста с массой тела 250–300 г.; остановка сердца в фазе систолы и диастолы осуществлялась перфузией соответствующими растворами. На каждом сердце осуществляли не менее 10 измерений на передней поверхности левого желудочка, передней поверхности правого желудочка, задней поверхности левого желудочка и задней поверхности правого желудочка. По временной зависимости скорости отскока индентора путем идентификации феноменологической модели деформирования определяли вязкоупругие параметры материала стенок.

**Результаты исследования.** Анализ полученных данных показал, что определяемые упругие и вязкие параметры имеют достоверные отличия в различные фазы сердечного цикла. В частности, модуль упругости в случае активного (систолического) состояния был заметно выше, чем в диастолическом состоянии: для передней поверхности левого желудочка на 9%, задней поверхности левого желудочка на 21%, передней поверхности правого желудочка и задней поверхности правого желудочка на 31% соответственно. Полученные данные можно использовать для биомеханического моделирования сердца в рамках существующих аналитических и конечноэлементных представлений, например, в [7, 8]. Аналогично, оценка деформационных характеристик кровеносных сосудов выполнялась с применением метода осциллометрии с последующей идентификацией модели гемодинамики, описанной в работах [4, 5].

**Выводы.** Проведенные экспериментальные и расчетные исследования позволили определить *in vivo* параметры упругости и вязкости миокарда в различных анатомических зонах сердца в активной (систолической) и пассивной (диастолической) фазах, а также оценить степень дилатации и тоничности кровеносных сосудов. В частности, установлено существенное повышение жесткостных характеристик миокарда в систолической фазе, что подтверждает

ет выдвинутую гипотезу о его различной устойчивости сердца к механическим воздействиям в различные фазы кардиоцикла.

Полученные данные применимы для создания биомеханических моделей органов системы кровообращения, диагностики состояния сердца и сосудов, объяснения летальных исходов у военнослужащих и спортсменов при динамическом внешнем воздействии на грудную клетку, вызывающем так называемую тупую травму сердца.

Работа выполнена в рамках задания К3.5.01 ГКПНИ «Конвергенция».

#### Литература

1. *The Biomedical Engineering HandBook*, Second Edition. Ed. Joseph D. Bronzino, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. – 3189 p.
2. *Введение в биомеханику пассивного миокарда* / В.Я. Изаков, В.С. Мархасин, Г.П. Ясников и др. – М.: Наука, 2000. – 2008 с.
3. Protsenko Yu. L., Kobelev A. V., Kobeleva R. M., Routkevich S. M. *The Steady-State Property «Force-Deformation» for Passive Myocardium* // Russian Journal of Biomechanics. – 2001. – Vol. 5, № 3. – P. 30 – 40.
4. Shilko S. V. *A Self-Regulation Model of Blood Circulation at Active Mechanical Behavior of Vessels* // Russian Journal of Biomechanics. – 2000. – Vol. 4, № 1. – P. 43 – 48.
5. Шилько С. В., Кузьминский Ю. Г., Борисенко М. В. *Математическая модель и программная реализация мониторинга сердечно-сосудистой системы* // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3. – С. 104 – 112.
6. Shilko S. V., Chernous D. A., Bondarenko K. K. *Method of determination of skeletal muscles viscoelastic characteristics in vivo* // Russian Journal of Biomechanics. – 2007. – Vol. 11, № 1. – P. 9 – 16.
7. *Simulation Analysis of Mechanical Properties of the Canine Heart with Bundle Branch Block Based on a 3-D Electromechanical Model* / Xia L., Dou J.H., Gong Y.L., Zhang Y., Deng D.D. // Computers in Cardiology. – 2007. – № 34. – P. 673 – 676.
8. Liu F., Lu W., Xia L., Wu G. *The Construction of Three-Dimensional Composite Finite Element Mechanical Model of Human Left Ventricle* / JSME. – 2001. – Vol. 44, № 1. – P. 125 – 133.

### ОЦЕНКИ РИСКОВ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ ПОСЛЕ ОСТЕОСИНТЕЗА ОТЛОМКОВ БОЛЬШЕБЕРЦОВОЙ КОСТИ ИНТРАМЕДУЛЛЯРНЫМ ШТИФТОМ

Шукейло Ю. А.<sup>1</sup>, Хомутов В. П.<sup>2</sup>, Шукейло Е. Ю.<sup>1</sup>, Квирикадзе Г. Э.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.СПбГЭТУ

[yashukeylo@mail.ru](mailto:yashukeylo@mail.ru)

<sup>2</sup> Центр стабильно-функционального остеосинтеза при Елизаветинской больнице  
195257, Санкт-Петербург, ул. Вавиловых, 14,

[viktor1352@yandex.ru](mailto:viktor1352@yandex.ru)

Число пострадавших с переломами длинных костей конечностей постоянно увеличивается. Это связано с ростом числа транспортных травм, природных катастроф, военных конфликтов.

Стабильная фиксация переломов направлена на обеспечение безболез-