

ПОСТРОЕНИЕ И ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ «МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ – ДЕФОРМАЦИЯ» ДЛЯ СИЛЬНО РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ОПТИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЯГКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ

Потлов А.Ю.

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

Ключевые слова: оптическая когерентная эластография, биомеханика, область упругих деформаций, механическое напряжение, сильно рассеивающие среды, мягкие биологические ткани, тонкопленочная матрица датчиков давления.

Аннотация. Представлен метод оценки механических свойств биологических тканей на основе оптической когерентной эластографии с экзогенными и эндогенными деформирующими воздействиями. Ключевыми особенностями предложенного решения являются: I) оценка составляющих деформирующей силы на основе профиля деформирующего воздействия; II) эквивалентность области деформирующего воздействия и области сканирования используемого волоконно-оптического зонда; III) векторный подход к оценке абсолютных смещений; IV) вычисление размеров деформируемой области на основе частичного объединения проекций векторов смещений на координатные оси.

COMPUTATION AND EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN CURVE FOR TURBID MEDIA WITH BIOLOGICAL TISSUE-LIKE OPTICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Potlov A.Yu.

Tambov State Technical University, Tambov

Keywords: optical coherence elastography, biomechanics, elastic deformation region, mechanical stress, turbid media, soft biological tissues, array distributed thin film pressure sensor.

Abstract. A method for assessing the mechanical properties of biological tissues based on optical coherence elastography under exogenous and endogenous deforming impacts was presented. The key features of the described method are: I) evaluation of the deforming force components based on the profile of the deforming impact; II) equivalence of the deforming impact region and the scanning area of the fiber-optic probe that was used; III) vector approach to computation absolute displacements; IV) calculation of the dimensions of the deformable region based on partial unification of the projections of displacement vectors onto the coordinate axes.

Оптическая когерентная эластография (ОКЭ) представляет собой модификацию метода оптической когерентной томографии (ОКТ), позволяющую оценивать помимо оптической структуры исследуемого объекта, его способность сопротивляться растяжению и сжатию. Актуальность с точки зрения медицины обусловлена тем, что злокачественные опухоли имеют отличную от здоровых тканей структуру, в частности при пальпации они проявляют себя как уплотнения. С физической точки зрения речь идет о более высоких значениях величины модуля Юнга. Современные ОКТ-системы с функцией эластографии в основном ориентированы на двумерное картирование для последующего ручного сравнения эластичности тканей в терминах «жестче»-«мягче» [1-3].

Целесообразен переход ко качественной оценки биомеханических свойств исследуемых тканей к количественной.

Оценка зависимостей «механическое напряжение – деформация» (σ от ε , соответственно) была осуществлена с использованием авторского метода ОКЭ с реконструкцией динамически изменяющихся профилей эндогенных и экзогенных деформирующего воздействий [2]. Вышеуказанный метод позволяет оценивать величину модуля Юнга, E , по адаптированной версии классической формулы:

$$E = \frac{F_{norm} \cdot l}{S_{IMP} \cdot \Delta l} = \frac{S_{IMP} \cdot P_{PRB} \cdot l}{S_{IMP} \cdot \Delta l} = \frac{P_{PRB} \cdot l}{\Delta l},$$

где F_{norm} – нормально направленная компонента деформирующей силы; S_{IMP} – площадь деформирующего воздействия; l – продольные размеры деформируемой области; Δl – продольные смещения для совокупности контрольных точек; P_{PRB} – величина деформирующего воздействия при поджатии исследуемого объекта волоконно-оптическим зондом, оцениваемая по предварительно построенному профилю [2].

Физические эксперименты проводились с тканеимитирующими фантомами. Для их изготовления применялся широко используемый в ортопедии двухкомпонентный высокопрочный полупрозрачный силикон на платиновой основе «Ecoflex 00-50» фирмы «Smooth-On» (США). Специальные добавки (поглощающий агент «Indian Ink» и обладающий выраженными рассеивающими свойствами мелкодисперсный порошок TiO_2) были использованы для подгонки оптических свойств. Пример полученной кривой напряженно-деформированного состояния показан на рисунке 1, а.

Наличие явно выраженного диапазона деформирующих воздействий, в пределах которого механические свойства биологических тканей считаются линейными является наиболее логичным выводом из рисунка 1. К тому же, этот вывод не противоречит, а лишь подтверждает и уточняет известное представление [3] о том, что мягкие биологические ткани в ситуациях относительно небольших (как правило, не более 8%) деформаций можно воспринимать как упругие (квазилинейные) среды.

Поскольку величина модуля Юнга также может быть оценена как угол наклона, α , участка пропорциональности (красная пунктирная линия на рисунке 1, а) на кривой напряженно-деформированного состояния по отношению к оси продольных деформаций [1, 3]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F_{norm} / S_{imp}}{\Delta l / l} = tg \alpha,$$

то можно определить диапазон величин продольного сжатия, в пределах которого величина модуля Юнга (рис. 1, б) практически не изменяется по мере нарастания магнитуды деформирующего воздействия.

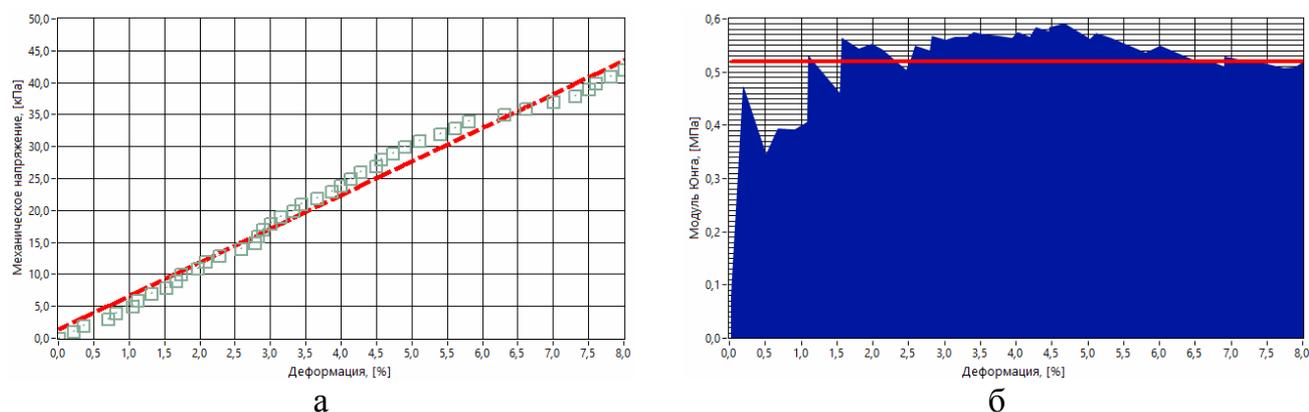


Рис. 1. Область упругих деформаций на кривой напряженного-деформированного состояния (а) и зависимость величины модуля Юнга (б) от магнитуды продольного сжатия для анатомически и физиологически корректного случайно-неоднородного силиконового фантома

Серия лабораторных экспериментов и подтверждающие их теоретические расчеты [4] показали, что для диапазона 2,5-6,5% от начальных размеров поджимаемого объекта удастся эффективнее всего реализовать переход от качественной оценки биомеханических свойств к количественной. Что, в свою очередь, повышает диагностическую ценность метода ОКЭ и открывает возможность (подобные деформации, как правило, безвредны) к его более широкому применению в реальной клинической практике.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-231.2022.4).

Список литературы

1. Bai Y., Zhang Z., He Z., Xie S., Dong B. Dual-Convolutional Neural Network-Enhanced Strain Estimation Method for Optical Coherence Elastography // Optics Letters. 2024, vol. 49, iss. 3, pp. 438-441.
2. Потлов А.Ю. Оценка профиля деформирующего воздействия на исследуемую сильно рассеивающую среду при оптической когерентной эластографии эндоскопическим зондом // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2023. – №15. – С. 118-120.
3. Wang Z. Mechanical and optical methods for breast cancer imaging: Ph. D. Thesis. – Iowa City, 2010. – 184 p.
4. Потлов А.Ю. Фрактальный подход к численному моделированию фотонного транспорта в биологических тканях на основе метода статистических испытаний Монте-Карло // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 3. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1648>.

Сведения об авторе:

Потлов Антон Юрьевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Биомедицинская техника».