

УДК 615.47-114:616-07-08

## НЕИНВАЗИВНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ В ДИАГНОСТИКЕ ВЯЗКОЭЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЖНОГО ПОКРОВА

© 2010 С.М. Яцун<sup>1</sup>, А.Н. Рукавицын<sup>2</sup>, А.В. Вальков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Курский государственный университет

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Поступила в редакцию 18.10.2010

В статье представлены результаты исследования вязко-эластических свойств кожного покрова. Разработана математическая модель процесса взаимодействия вибровозбудителя и тестируемого материала при безотрывном движении контактного элемента с поверхностью. Рассмотрен способ идентификации коэффициентов уравнения свободных затухающих колебаний, которые характеризуют исследуемые параметры кожного покрова.

Ключевые слова: *кожный покров; неинвазивная диагностика; математическая модель; вязкоэластические свойства*

Основными методами, используемыми врачами в дерматологии и косметологии, являются внешний осмотр, оценка эластичности и упругости кожи путем пальпации. Однако в ряде случаев при решении задач диагностики дерматологических заболеваний традиционно применяемые, субъективные методы оценки состояния кожи являются малоинформативными. В связи с этим актуальной является проблема объективного инструментального контроля состояния кожного покрова.

В последние годы активно ведутся работы по созданию устройств, основанных на получении объективных данных о механических, оптических, акустических, электрических параметрах кожи неинвазивными методами [1, 2]. Диагностика вязкоэластических свойств кожи затруднена из-за сложности ее морфологического строения. Наиболее приемлемым, а в некоторых случаях и единственным, является неразрушающие методы контроля, которые позволяют, не нарушая структуру, проводить диагностику различных состояний кожного покрова [3]. Механические свойства компонентов дермы во многом обусловлены растяжимостью ее эластиновых и коллагеновых волокон, их количественным соотношением и пространственной ориентацией. В процессе возрастных изменений и в случаях развития патологических состояний при нарушении

водного баланса и дезорганизации пространственной структуры соединительно-тканых волокон изменяются механические свойства, кожа теряет эластичность.

**Цель данной работы:** исследование возможности мониторинга состояния кожного покрова путем определения ее упруго-вязких характеристик.

Для использования этого способа и выявления диагностических признаков создана математическая модель, описывающая взаимодействие исследуемого материала с индентором, оснащенным системой датчиков, контролирующих процесс распространения малых возмущений. С точки зрения математического моделирования кожа представляет собой сложный неоднородный многослойный объект, поэтому для определения реакции кожного покрова далее рассматривается упрощенная математическая модель, которая основана на предположении о том, что кожа описывается дискретной моделью, содержащей две массы, связанные между собой упруго-вязкими элементами. Упрощенная расчетная схема представлена на рис.1. На схеме приняты следующие обозначения:  $m_1$  – масса бойка ударника (индентора);  $m_2, m_3$  – приведенные массы слоев кожного покрова, участвующие во взаимодействии;  $c_1, c_2, c_3$  – приведенные коэффициенты жесткостей слоев кожного покрова, участвующие во взаимодействии;  $b_1, b_2, b_3$  – приведенные коэффициенты вязкого сопротивления в слоях кожного покрова;  $c_a, b_a$  – приведенные коэффициенты жесткости и вязкого сопротивления подвески индентора;  $x_1, x_2, x_3$  – обобщенные координаты перемещения эпидермиса ( $x_1$ ), собственно дермы ( $x_2$ ), подкожно-жировой клетчатки ( $x_3$ ).

Яцун Светлана Михайловна, доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой медико-биологических дисциплин. E-mail: jatsun@kursknet.ru  
Рукавицын Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и мехатроники. E-mail: teormeh@inbox.ru  
Вальков Алексей Федорович, аспирант

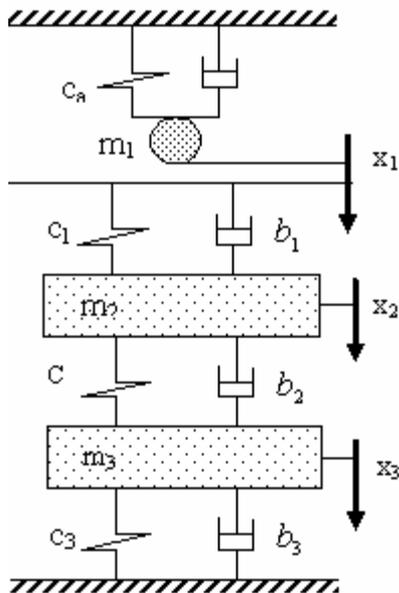


Рис. 1. Упрощенная расчетная схема

Нами была построена математическая модель взаимодействия поверхности кожи с измерительным элементом. На первом этапе выполнены теоретические исследования с применением численного интегрирования дифференциальных уравнений математической модели. Эти исследования позволили определить параметры упругой подвески индентора, обеспечивающей безотрывное движение бойка. Анализ виброграммы показывает, что развитие возмущений в коже происходит с запаздыванием, т.е. сначала индентор деформирует поверхностный слой кожи, далее возмущение распространяется в нижележащие слои. По результатам расчетов было установлено, что перемещение бойка может быть приближенно описано экспоненциальным законом:

$$X(t) = A_0 \cdot \exp(-\beta t) \cdot \cos(\omega t), \quad (1)$$

где  $\beta$  – параметр, определяющий диссипативные свойства,  $\omega$  – параметр, определяющий упругие свойства кожи,  $A_0$  – величина, определяемая начальными настройками упругой подвески индентора. Идентификация коэффициентов  $\beta$  и  $\omega$  по экспериментально полученным данным позволяет количественно оценить упруго-диссипативные свойства кожного покрова.

Целью дальнейших исследований являлось определение упруго-диссипативных параметров кожного покрова по результатам обработки кривой затухающих совместных колебаний индентора и кожного покрова. Предлагаемая методика основана на том, что движение индентора и исследуемого участка кожного покрова осуществляется совместно. Примеры виброграмм перемещений бойка-индентора

в холостом режиме и в контакте с диагностируемым участком кожного покрова представлены соответственно на рис. 2 и рис. 3.

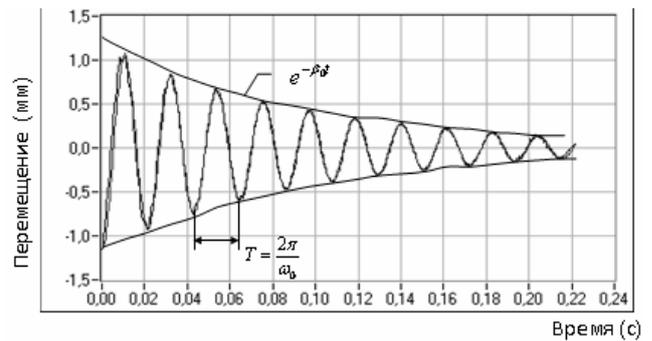


Рис. 2. Виброграмма перемещения бойка-индентора в холостом режиме

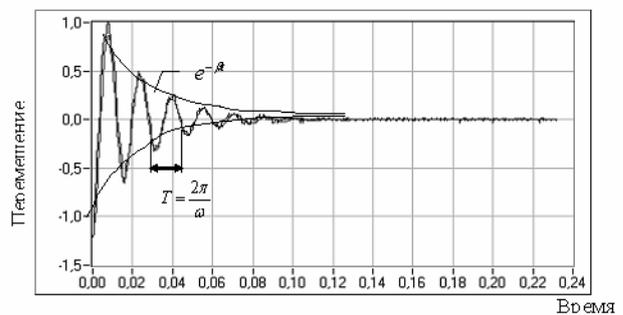


Рис. 3. Виброграмма перемещения бойка-индентора при свободных колебаниях совместно с тестируемым материалом

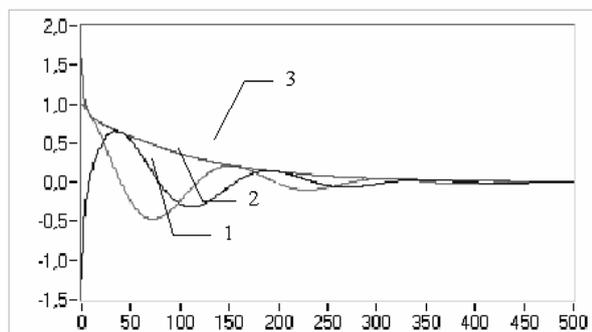
Определение упруго-вязких параметров кожного покрова производилось путем идентификации коэффициентов уравнения свободных затухающих колебаний по формуле (1). При идентификации неизвестных параметров затухания  $\beta$  и частоты  $\omega$  свободных затухающих колебаний участка кожной поверхности в среде LabView использовались два метода: метод Гильберта и метод Левенберга-Макгварда. Метод нелинейной оптимизации Левенберга-Макгварда использует для поиска минимума комбинированную стратегию – линейную аппроксимацию и градиентный спуск; переключение с одного метода на другой происходит в зависимости от того, была ли успешной линейная аппроксимация. Для определения частоты использовалось быстрое преобразование Фурье, а для определения коэффициента затухания воспользуемся построением огибающей при помощи функции Гильберта и дальнейшей аппроксимацией, позволяющий рассчитывать функцию Гильберта  $H(t)$  по исходной функции  $x(t)$ :

$$H(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(s)}{t-s} ds = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{x(t-s) - x(t+s)}{s} ds \quad (2)$$

При этом огибающую получаем по формуле

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + H^2(t)} \quad (3)$$

График, представленный на рис. 4, демонстрирует исходную виброграмму, функцию Гильберта и огибающую.



**Рис. 4.** Расчетные функции (1 – исходный сигнал, 2 – функция Гильберта, 3 – огибающая)

В результате идентификации упруго-диссипативных параметров кожного покрова были получены безразмерные коэффициенты:  $\bar{\beta} = \frac{\beta_0}{\beta}$  – безразмерный коэффициент затухания, оценивающий диссипативные свойства кожи и  $\bar{\omega} = \frac{\omega_0}{\omega}$  – безразмерная частота свободных колебаний, характеризующая упругость, где  $\omega_0$  –

частота свободных колебаний бойка-индентора на упругом подвесе в холостом режиме,  $\beta_0$  – коэффициент затухания в холостом режиме.

**Выводы:** упруго-диссипативные свойства кожи определяются двумя параметрами:  $\bar{\beta}$  – безразмерным коэффициентом затухания и  $\bar{\omega}$  – безразмерной собственной частотой. Разработанная модель позволяет проводить численные исследования поведения упруго-диссипативных характеристик тестируемого материала с учетом взаимодействия экспериментальной установки и кожного покрова.

Работа выполнена в рамках ГК №14.740.11.0249 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тимофеев, Г.А. Методы аппаратного исследования кожи человека // Косметика & медицина. 2005. № 4. С. 28-36.
2. Яцун, С.М. Методы мониторинга объективных параметров кожного покрова // Медико-экологические информационные технологии: Сборник научных трудов. – Курск, 2007. С. 105-112.
3. Yamamoto, T. Investigation mechanical of human skin // T. Yamamoto, H. Oka, N. Narahashi // Clin Pharmacol. 1992. №5. P. 2658-2663.

## NON-INVASIVE CONTROL METHODS IN DIAGNOSTICS OF INTEGUMENT VISCOELASTIC PROPERTIES

© 2010 S.M. Yatsun<sup>1</sup>, A.N. Rukavitsyn<sup>2</sup>, A.V. Valkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kursk State University

<sup>2</sup> South-West State University, Kursk

In article results of research the viscoelastic properties of integument are presented. The mathematical model of process of interaction the vibration exciter and tested material is developed at continuous movement of contact element with the surface. The way of identification of coefficients in the equation of free fading fluctuations which characterize researched parameters of integument is examined.

Key words: *integument, non-invasive diagnostics, mathematical model, viscoelastic properties*

Svetlana Yatsun, Doctor of Medicine, Professor, Head of the Medical-Biology Disciplines Department. E-mail: yatsun@kursknet.ru  
Alexander Rukavitsyn, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics. E-mail: teormeh@inbox.ru  
Aleksy Valkov, Post-graduate Student