

Устройство и методика определения упруго-эластичных свойств рубцов кожи человека

Аннотация

Представлены разработанные оригинальное устройство и способ измерения упруго-эластичных свойств рубцов кожи человека *in vivo*. Новизна разработки защищена на уровне патента. Представлены примеры и обсуждены результаты применения предложенных решений при оценке механических свойств рубцов кожи постампутационных культей нижних конечностей в процессе медицинской реабилитации и при протезировании пациентов.

Введение

Ежегодно рубцы различной площади и локализации формируются более чем у 100 млн. пациентов [1]. Патологические рубцы, требующие коррекции, образуются в 5...15 % случаев заживления повреждений кожи [2].

Рубцовые изменения кожи существенно ограничивают ее подвижность, вызывают зуд и болезненные ощущения, приводят к косметическому дефекту, особенно на открытых участках тела, способствуют психоэмоциональным расстройствам и значимо ухудшают качество жизни пациентов [3]-[5].

Дополнительно к этим негативным последствиям рубцы на культе конечности, особенно нижней, мешают пациенту пользоваться протезом, вызывая болевые ощущения в культе от незначительных до выраженных и даже требующих оперативного вмешательства для подготовки культи к протезированию и обеспечения возможности дальнейшей реабилитации.

К настоящему времени разработаны и применяются различные медикаментозные, физические, хирургические методы коррекции рубцов кожи. Однако большой арсенал этих методов, используемых без учета морфогенеза рубцов, предопределяет значительные риски побочных эффектов и рецидивов.

Совершенствование диагностики рубцов наряду с поиском новых методов лечения и изучением механизмов действия используемых лечебных физических факторов входят в состав направлений научного развития современной физиотерапии и дерматокосметологии. Такой подход поможет избежать применения малоэффективных методов лечения.

Особый интерес для выбора тактики и прогноза терапии рубцов кожи представляют их механические характеристики, в частности упруго-эластичные.

В большинстве научных источников представлены результаты исследований механических свойств кожи в условиях *in vitro*. Однако, во-первых, результаты, полученные при оценке свойств образцов кожи в этих условиях, значительно отличаются от таковых *in vivo* [6]-[10] и, во-вторых, в медицинской практике при выборе тактики лечения ставятся задачи опре-

деления свойств кожи и рубца кожи непосредственно на теле пациента.

Нам не удалось выявить результаты научных исследований упруго-эластичных свойств *in vivo* именно рубцов кожи.

Целью статьи является представление авторской разработки устройства и способа измерения упруго-эластичных свойств рубцов кожи человека *in vivo*, а также их практического применения.

Материалы и методы

Для определения упругости тканей известна формула расчета модуля упругости (модуля Юнга) E , характеризующего свойство стержня сопротивляться изменению размеров/формы под воздействием механического напряжения, вызванного растяжением:

$$E = (F \cdot l) / (\delta_l \cdot S), \quad (1)$$

где F – сила растяжения; l – длина стержня; δ_l – изменение длины под действием силы F ; S – площадь сечения стержня.

С аналогичной целью применяют формулу расчета модуля сдвига G , характеризующего свойство однородной пластины сопротивляться изменению размеров/формы под воздействием механического напряжения, вызванного действием силы F , приложенной касательно к «продольной» грани, на которую оказывается воздействие:

$$G = \sigma / \varepsilon; \quad (2)$$

$$\sigma = F / S;$$

$$\varepsilon = \delta_l / l_0 \text{ или } \varepsilon = \operatorname{tg} \gamma,$$

где σ – касательное напряжение сдвига; ε – величина сдвиговой деформации; S – площадь грани; γ – угол сдвига; δ_l – смещение «продольной» грани относительно «поперечной».

Зная величину силы растяжения F (г), приложенной к двум точкам рубца кожи, и приращение δ_l (мм) длины l (мм) участка между этими точками, можно было бы по известной фор-

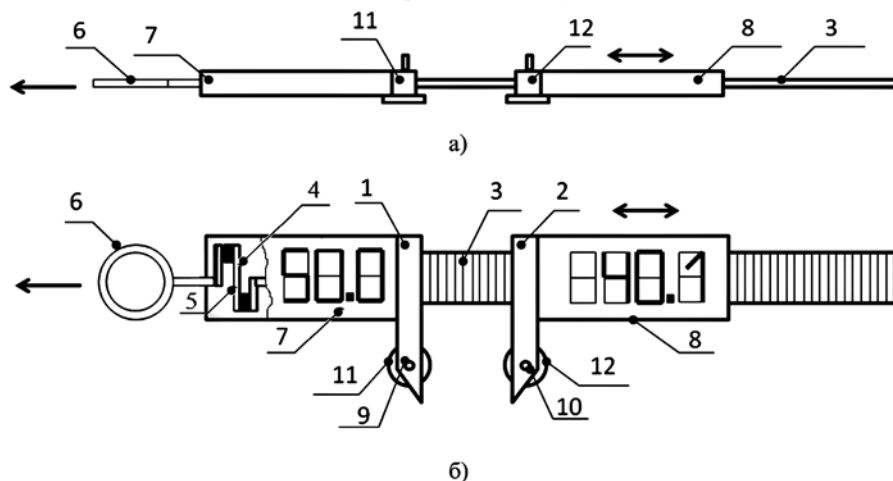


Рис. 1. Структурная схема устройства для определения упругости кожи и рубцов кожи человека: а) вид сбоку; б) вид сверху (пояснения – в тексте статьи)

муле (1) рассчитать модуль Юнга, если бы рубец представлял собой стержень с известной площадью сечения S , а сила F была бы приложена вдоль его оси. Однако это неприменимо к исследованию рубца кожи в условиях *in vivo*. Некорректной была бы в этих условиях и попытка расчета модуля сдвига G по формуле (2), так как кожа и рубец кожи человека представляют собой системы с неоднородными по толщине, составу и механическим свойствам слоями с анизотропными свойствами, что приводит к неоднородности растягивающего усилия и усилия сдвига по глубине рубца и упругости в разных направлениях кожных покровов и рубца [11], [12].

Для исследования упруго-эластичных свойств рубца кожи мы предлагаем использовать метод поверхностного растяжения *in vivo*, реализуемый при помощи оригинального устройства, разработанного с участием авторов (рис. 1) [13].

Устройство содержит две бранши 1 и 2, соединенные между собой планкой 3 с возможностью линейного возвратно-поступательного смещения относительно друг друга. При этом планка 3 закреплена неподвижно на бранше 1 и соединена подвижно с браншей 2, допуская возможность линейного возвратно-поступательного смещения относительно нее.

На бранше 1 закреплен узел создания усилия для раздвижения бранш, внутри которого находится балка 4 с наклеенным на нее тензодатчиком 5. Один конец балки соединен с тягой 6, выполненной в виде кольца для захвата ее пальцем, а другой конец соединен с браншей 1. Тензодатчик 5 посредством электросхемы соединен с электронным индикатором усилия 7 с цифровым табло.

На бранше 2 закреплен узел измерения смещения бранш относительно друг друга, содержащий электронный индикатор перемещения 8.

В браншах 1 и 2 выполнены отверстия 9 и 10, предназначенные для фиксации в них штырей съемных контактных элементов 11 и 12. Съемные элементы имеют с одной стороны штырь, а с другой – контактную площадку для приклеивания их к коже (рубцу кожи).

Для исследования упругих свойств рубца кожи человека с применением этого устройства разработана методика, заключающаяся в следующем.

Контактные элементы 11 и 12 приклеивают медицинским клеем на тело человека в точки, ограничивающие участок, для которого требуется определить упругость кожи, рубца кожи. Бранши устройства 1 и 2 накладывают на контактные элементы 11 и 12 таким образом, чтобы их штыри оказались в отверстиях 9 и 10 бранш 1 и 2. Исходные показания индикатора усилия 7 и индикатора перемещения 8 обнуляют нажатием на соответствующие кнопки.

Для создания усилия растяжения кожи, рубца кожи исследователь одной рукой растягивает браншу 2, а другой рукой тянет пальцем за тягу. При этом бранша 2 смещается вдоль направляющей планки 3 и бранши 1 и 2 отдаляются друг от друга, увлекая за собой контактные элементы 11 и 12, растягивая находящийся между ними участок рубца кожи.

Под усилием тяги балка 4 изгибается и сопротивление наклеенного на нее тензодатчика 5 меняется, передавая на электронный индикатор усилия 7 электросигнал, пропорциональный силе тяги. Изменение расстояния между браншами 1 и 2 регистрируется электронным индикатором перемещения 8 и отображается на цифровом табло. Тягу отпускают в тот момент, когда значение усилия растяжения на табло начинает снижаться, несмотря на увеличение прироста расстояния между браншами, что соответствует моменту отклеивания контактных элементов от рубца.

Значения цифровых табло индикаторов перемещения и усилия в процессе растяжения фиксируют посредством видеосъемки.

Контактные элементы 11 и 12 снимают с кожи при помощи спирта.

Затем таким же образом проводят исследование растяжимости контрольного, т. е. непораженного, участка кожи, например в аналогичной зоне с контралатеральной стороны тела, а если это невозможно, например в случае ампутации конечности, то в соседней с рубцом области. При этом расстояние между контактными элементами в исходном положении должно быть таким же, как и при исследовании рубца.

Результаты

Примеры использования устройства представлены на рис. 2.

Результаты измерения силы растяжения F и приращения длины δ_l участка ткани между контактными элементами следует отображать в осях координат этих переменных, по ним построить линии тренда, наилучшим образом отражающие изменение δ_l от F для рубца кожи и контрольного участка кожи, и сравнить соответствующие им аппроксимирующие формулы (рис. 3). Данные операции легко выполняются средствами «Microsoft Office Excel».

Результаты исследования показали зависимость δ_l от F , описываемую линейной функцией $\delta_l = kF + m$, где k – угловой коэффициент линии тренда.

Отношение коэффициентов k рубца кожи (k_p) и контрольного участка (k_k) удобно использовать как безразмерный показатель нарушения растяжимости рубца кожи K_p :

$$K_p = k_p / k_k.$$

Результат $K_p < 1$ будет означать снижение эластичности (увеличение упругости) рубца кожи, $K_p > 1$ – увеличение эластичности. Тогда показателем результативности R лечебного воздействия, направленного на редукцию рубца, будет результат сравнения показателей нарушения его растяжимости до воздействия (K_{p1}) и после него (K_{p2}):

$$R = |K_{p1}| / |K_{p2}|.$$

Значение $R > 1$ будет указывать на положительный результат воздействия, $R < 1$ – на отрицательный.

Применение метода поверхностного растяжения рубца кожи *in vivo* позволило объективно оценить тип и степень вы-

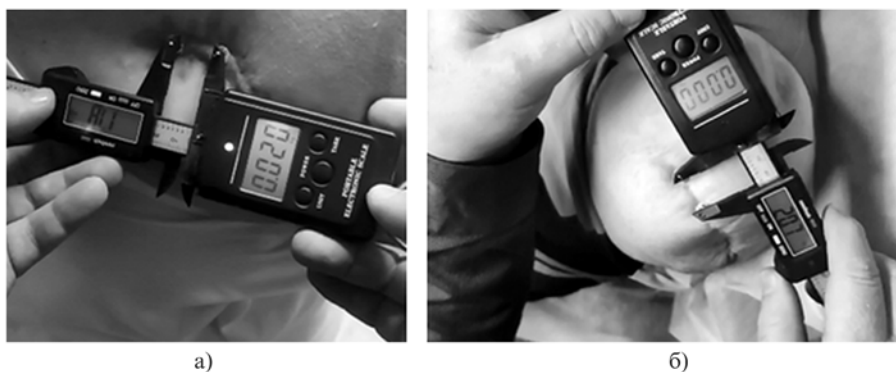


Рис. 2. Применение устройства при оценке состояния рубцов кожных покровов: а) растяжение келоидного рубца в области левого ключично-грудного треугольника; б) растяжение атрофического рубца на торцевой поверхности культы голени

раженности нарушения упруго-эластичных свойств рубцов кожи (продольной упругости) и результатов их лечения.

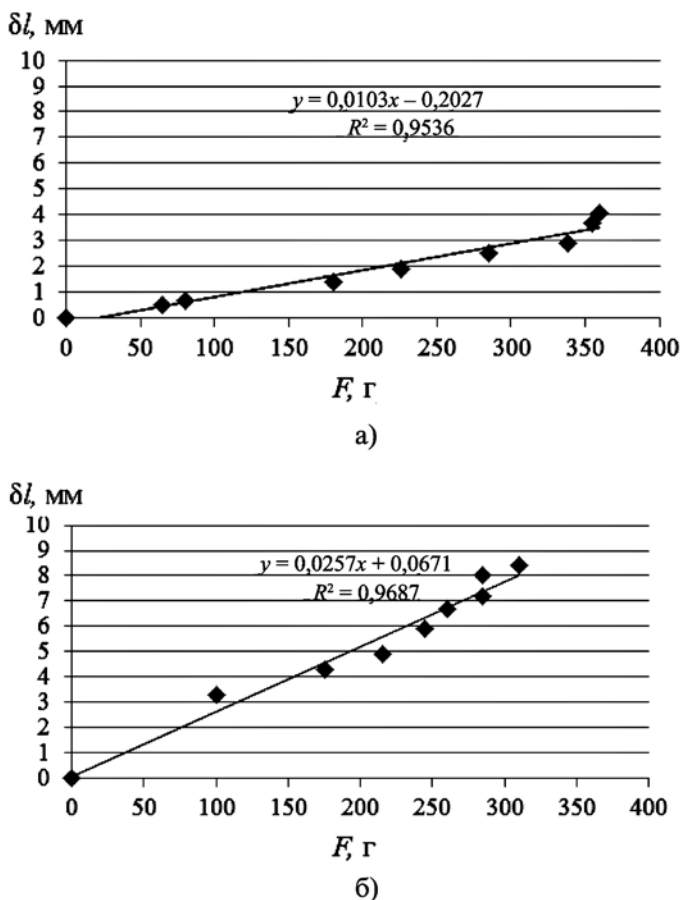


Рис. 3. Зависимость приращения длины участка кожных покровов культи голени от силы растяжения (пациент Ш.): а) в области рубца; б) в контрольной области (δl – приращение длины растягиваемого участка рубца; F – сила растяжения; R^2 – величина достоверности аппроксимации при построении линии тренда)

Выводы

Разработанное устройство и способ, позволяющие в условиях *in vivo* реализовывать тесты на растяжение кожи в области рубца с регистрацией силы растяжения и приращения длины растягиваемого участка, позволяют количественно оценить нарушение упруго-эластичных свойств рубцов кожи человека.

Разработанное устройство и способ целесообразно применять для оценки результатов коррекции рубцов кожи на этапах лечения и определения эффективности методов коррекции рубцов.

Список литературы:

1. Ковалева Л.Н. Клинико-морфологические параллели у пациентов с рубцовой патологией кожи // Дерматовенерология. Косметология. Сексопатология. 2016. Т. 1. № 4. С. 108-117.
2. Tosa M., Ogawa R. Photodynamic therapy for keloids and hypertrophic scars: A review // Scars, Burns & Healing. 2020. Vol. 6. Art. ID: 2059513120932059.
3. Мантурова Н.Е., Тальбова А.М., Круглова Л.С., Стенько А.Г. Профилактика и лечение атрофических рубцов постакне // Клиническая дерматология и венерология. 2018. Т. 17. № 5. С. 91-98.
4. Dreno B., Tan J., Kang S., Rueda M.-J., Lozada V.T., Bettoldi V., Layton A.M. How people with facial acne scars are perceived in society: An online survey // Dermatol. Ther. (Heidelb.). 2016. Vol. 6. № 2. PP. 207-218.

5. Behrangi E., Goodarzi A., Roohaninasab M., Sadeghzadeh-Bazargan A., Nobari N.N., Ghassemi M. A review of scar treatment related to acne and burn // Journal of Critical Reviews. 2020. Vol. 7. № 4. PP. 714-722.
6. Cordes S., Calhoun K.H., Quinn F.B. Tissue Expanders // UTMB Dept. of Otolaryngology Grand Rounds [Electronic resource]. 1997 / <http://www.utmb.edu/otoref/grnds/tissue-expand.html> (Date of access: 10.01.2009).
7. Hendriks F.M. Mechanical Behaviour of Human Skin in Vivo: A Literature Review / Nat. Lab. Unclassified Report 2001/820 [Electronic resource]. 2001 / www.extra.research.philips.com/publ/rep/nl-ur/NL-UR2001-820.pdf (Date of access: 10.01.2009).
8. Пластическая и реконструктивная хирургия лица / Под ред. А.Д. Пейпла; пер. с англ. – М.: БИНОМ, 2007. С. 52.
9. Федоров А.Е., Самарцев В.А., Кириллова Т.А. О механических свойствах кожи человека // Российский журнал биомеханики. 2006. Т. 10. № 2. С. 24-42.
10. Курек М.Ф., Аничкин В.В., Шилько С.В., Дорошенко Р.В. Механические свойства кожи: сократимость и растяжимость, их взаимосвязь, гистологическая основа и возможность прогнозирования // Проблемы здоровья и экологии. 2009. № 3 (21). С. 89-94.
11. Курбанова У.Р., Ботчаева М.С., Гебеннова А.А. Альтернативные методы лечения келоидных и гипертрофических рубцов // Научный альманах. 2018. № 9-2 (47). С. 71-75.
12. Zheng Y., Mak A. Effective elastic properties for lower limb soft tissues from man u-al indentation experiment // IEEEET Transaction on Rehabilitation Engineering. 1999. Vol. 7. № 3. PP. 257-267.
13. Пономаренко Г.Н., Смирнова Л.М., Романов В.В., Белянин О.Л., Курганская И.Г. Устройство для определения упругости кожи и рубцов кожи человека / Патент № 2763843 RU. С1. МПК А61В 5/00 (2021.08). Заявл. 29.03.2021. Опубл. 11.01.2022. Бюл. № 2.

Людмила Михайловна Смирнова,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра биотехнических систем,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
ведущий научный сотрудник,
отдел биомеханических исследований
опорно-двигательной системы,
ФГБУ «Федеральный научный центр
реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта»
Минтруда России,
Геннадий Николаевич Пономаренко,
член-кор. РАН,
д-р мед. наук, профессор,
генеральный директор,
ФГБУ «Федеральный научный центр
реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта»
Минтруда России,
Инга Геннадьевна Пономаренко,
д-р мед. наук, доцент,
кафедра кожных
и венерических болезней,
ФГБВОУВО «Военно-медицинская
академия им. С.М. Кирова»,
г. С.-Петербург,
e-mail: info@diaserv.ru