

УДК 621.317.791

В. Г. ГУСЕВ, Т. Н. МУСТАФИН

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЖНОГО ПОКРОВА ЧЕЛОВЕКА

В статье приведен обзор методов измерения, позволяющих получать объективную информацию о строении и свойствах кожного покрова. Выполнена качественная оценка их эффективности. *Измерительная техника; медицина, кожный покров, измерительные методы*

ВВЕДЕНИЕ

Кожный покров человека несет огромный объем информации о состоянии органов систем и подсистем организма и патологиях, возникших в нем [1–3]. По его физическим параметрам и их изменениям в течение времени можно получить исчерпывающую информацию, позволяющую выполнить диагностику и определить тактику лечения. Несмотря на очевидность и кажущуюся простоту получения диагностической информации, на сегодняшний день практически отсутствуют технические средства, позволяющие проводить объективную оценку физических свойств кожного покрова. При необходимости количественной оценки этих свойств используются приборы и устройства, разработанные для других целей. Например, при измерении температуры локальных зон применяют тепловизоры. Хотя в публикациях имеются описания отдельных методов и технических средств получения количественной информации о физических свойствах кожного покрова человека, результатов систематизации, обобщения и доказательной оценки их информативной значимости обнаружено не было. И это несмотря на то, что состояния зон Захарьина-Геда, точек акупунктуры, временные изменения пульса (тибетская диагностика) несут объективную информацию об отклонениях, имеющихся у локальных зон и организма в целом. Это достоверно установлено и общепризнано. Обладая ей, можно оперативно и с малыми затратами определить то, для чего на сегодняшний день требуется сложнейшее дорогостоящее исследование и значительные временные затраты.

Свойства кожного покрова важны для косметических и клинических приложений, таких как: оценка эффективности косметических продуктов (крема, лосьоны), разработка средств индивидуального ухода (бритвенные станки), изучение старения кожи, в косметической хирургии и при оценке различных стадий заболевания.

Целью статьи является систематизация и осмысливание информации о методах и способах оценки физических свойств кожного покрова человека с помощью технических средств.

При выборе измерительного метода надо учитывать: стоимость оборудования, уровень внешнего воздействия и его характер, требования к обслуживающему персоналу, информативность, надежность, совместимость с другими приборами, длительность измерения и обработки результатов, габариты.

Все обнаруженные в литературе методы можно подразделить на акустические, оптические, механические, электрические.

1. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Ультразвуковая эхоскопия может быть использована для получения информации о строении кожного покрова, без нарушения его целостности. Меняя частоту сканирующего излучения, можно варьировать глубину проникновения и разрешающую способность оборудования.

Принцип работы ультразвукового сканера следующий: высокочастотные акустические колебания, вызванные изменениями толщины пьезоэлемента, способны проникать вглубь биоткани. Различные слои кожного покрова различаются между собой по строению и физическим свойствам, а следовательно, обладают

различными акустическими сопротивлениями. Ультразвуковые волны частично отражаются от границы раздела сред, с различными акустическими сопротивлениями. Степень отражения тем больше, чем больше разность акустических импедансов различных слоев.

На основании времени задержки между моментом изучения пачки звуковых импульсов и моментом возврата импульсов и скорости ультразвука в различных средах по времени задержки рассчитывается, на каком расстоянии находится граница раздела сред, от которых произошло отражение.

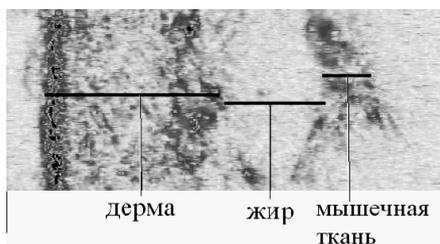


Рис. 1. Ультразвуковое изображение кожи

На рис. 1 представлено двухмерное изображение кожи, полученное при автоматическом движении датчика над поверхностью кожного покрова. При обработке серии двухмерных изображений, с помощью специального оборудования и программного обеспечения можно получить трехмерную картину исследуемого участка. Этот алгоритм справедлив для всех методов, позволяющих визуализировать объемную картину исследуемой области [6].

Акустический анализатор тканей – прибор «АСА». Принцип действия данного прибора основан на оценке скорости распространения поверхностных сдвиговых волн. Незначительные изменения в состоянии сред могут приводить к существенному изменению модуля сдвига и, соответственно, скорости поверхностных сдвиговых волн. Так, в биологических тканях изменение скорости сдвиговых волн при развитии патологических процессов составляет десятки процентов.

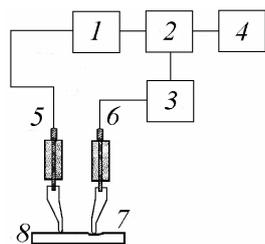


Рис. 2. Структурная схема прибора «АСА»

В состав прибора входят (рис. 2):

- 1) генератор импульсов;
- 2) вычислительное устройство;
- 3) приемник сигналов;
- 4) цифровой индикатор;
- 5) излучающий пьезопреобразователь ИП;
- 6) принимающий пьезопреобразователь ПП;
- 7) контактные щупы;
- 8) исследуемый объект.

Щупы преобразователей прижимаются к исследуемому участку объекта. Изгибные колебания щупа ИП возбуждают в ткани акустический импульс, который принимается щупом другого преобразователя ПП.

$$V = L/t. \quad (1)$$

Обработка сигналов датчика ведется вычислительным устройством, в котором определяется время запаздывания импульса (t), и в соответствии с формулой (1) вычисляется скорость распространения акустических ПСВ. Значения скорости V (м/с) выводятся на цифровой индикатор 4.

На скорость движения поверхностных волн влияют: температура, увлажненность, различные заболевания, возраст, пол, толщина кожи, участок на котором производится измерение, анизотропия [7–8]. Прибор измеряет скорость движения поверхностных волн, на которую влияет целый ряд факторов, удельный вес каждого из которых оценить невозможно. Целесообразно применение этого прибора с другими, оценивающими эти факторы.

2. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Себуметр. Это измерительный прибор для определения количества кожного сала на поверхности кожи (включая кожу волосистой части головы) и волос.

Измерения основаны на фотометрическом анализе сальных пятен. Специальная пленка прикладывается к поверхности кожи. При контакте с кожным салом она становится прозрачной. Для определения количества кожного сала измерительная головка кассеты вставляется в отверстие прибора, где оценивается степень ее прозрачности. Для этого пленку освещают лучом света, который проходит сквозь нее, отражается маленьким зеркальцем, расположенным сзади, и попадает на фотоэлемент, который и анализирует степень прозрачности пленки. Светорассеяние на пленке коррелирует с содержанием кожного сала на измеряемой поверхности.

Прибор недорогой, прост в эксплуатации [8].

Визуализация. Используется для оценки количества кожного сала на поверхности кожи. Принцип действия следующий: различные вещества, способные адсорбировать жиры, наносятся либо непосредственно на кожу, после чего делается цифровой фотоснимок, который обрабатывается специальным программным обеспечением. Либо вещества наносятся на прозрачную пленку, после снятия пробы жирности с поверхности кожи, которая потом фотографируется в проходящем свете с высоким разрешением.

Недорогой, простой в эксплуатации прибор, недостатком является то, что на коже остаются химические вещества [8].

Мексаметрия позволяет измерять количество меланина в коже и степень эритемы. Принцип измерения основан на различной интенсивности поглощения кожей света разных длин волн. Длина волны подбирается таким образом, чтобы она соответствовала максимуму поглощения меланина и гемоглобина (т. е. чем больше этих веществ на исследуемом участке, тем меньшей будет интенсивность отраженного света). Дополнительные гармоники зондирующего сигнала используются для поправки на другие пигменты, в том числе билирубин. Источники и приемники света расположены таким образом, чтобы обеспечить измерения только отраженного от кожи света, исключая помехи от фонового освещения [8].

Хромаметрия. По системе цветового пространства, рекомендованной «Commission Internationale l'Eclairage» (CIE) для оценки цвета кожи, каждому цвету приписывается численная характеристика $L^*a^*b^*$, где L^* – яркость цвета по шкале серого (0–100), a^* – сбалансированное значение между красным и зеленым цветами, b^* – баланс между желтым и синим цветами. Шкала значений a^* хорошо описывает пигментацию и васкуляризацию кожи. Шкала значений b^* хорошо описывает изменение интенсивности пигментации кожи. Данный метод для оценки эритемы и пигментации менее эффективен по сравнению с методом мексаметрии. Но метод хромаметрии интересен тем, что позволяет оценить активность свободнорадикальных процессов в коже при различных патологиях. Также хромаметрия позволяет оценить антиоксидантный эффект косметических средств. Известно, что *b*-каротин представляет собой оранжевый пигмент, который при взаимодействии со свободными радикалами обесцвечивается, именно эта особенность лежит в

основе метода оценки антиоксидантной активности кожи. Значение интенсивности окраски можно измерить по шкале b^* и рассчитать цветовой индекс пропорциональный содержанию *b*-каротина [8].

Метод оптической профилометрии. Суть метода измерения – приготовление силикона и последующее нанесение его на участок кожи. После того, как реплика готова, через нее пропускают свет от источника параллельного излучения, который регистрируется специальной камерой. При помощи программного обеспечения моделируется 3D изображение поверхности кожи и рассчитываются различные показатели ее рельефа, такие как шероховатость, гладкость, морщинистость.

Недостатком является то, что приготовление реплики – достаточно трудоемкий процесс, однако в результате получается достаточно детализированный, объемный рисунок поверхности кожи.

Метод анализа изображений кожи, полученных напрямую с помощью цифровых камер высокого разрешения. Часто в таких системах для увеличения чувствительности применяются специальные камеры с УФ лампой.

Простой в реализации, недорогой метод, однако обработка данных целиком ложится на оператора.

ОКТ. Хорошо известно, что оптические свойства биоткани, а именно – степень светорассеяния и поглощения, определяются многими факторами. Среди наиболее очевидных можно назвать размер, форму и концентрацию рассеивающих центров, плотность их упаковки в окружающей среде, особенности химического состава рассеивающих центров и окружающей их среды (содержание хромофоров – аминокислот, белков, нуклеиновых кислот, пигментов и др.), содержание воды, различия в плотности и коэффициентах преломления в объеме биоткани.

Поэтому послойная структура кожи, в силу того, что различные ее слои отличаются количеством и качеством клеточного состава, находит свое отражение при томографическом исследовании.

Параллельно со сканированием в глубину производится сканирование зондирующим пучком поперек поверхности ткани, что обеспечивает поперечную развертку ОКТ изображения. Полученные в результате данные (ОКТ изображение) образуют двухмерную карту обратного рассеяния (или отражения) от микроскопических оптических неоднородностей (клеточных структур ткани) биоткани; таким

образом, ОКТ изображения, по сути, содержат информацию о морфологическом строении поверхностных тканей.

Разрешающая способность ОКТ составляет 10–15 мкм, глубина проникновения – до 1,5 мм, информация о ткани, получаемая с помощью ОКТ, является прижизненной, т. е. отражает не только структуру, но и особенности функционального состояния тканей. Метод ОКТ неинвазивен, поскольку использует излучение в ближнем ИК-диапазоне (примерно 1300 нм) с мощностью порядка 5 мВт, которое не оказывает повреждающего воздействия на организм [6].

Конфокальная микроскопия. В основе получения оптических срезов исследуемого объекта с помощью конфокального микроскопа лежит принцип пространственной фильтрации и двумерного сканирования. Для визуализации отдельных сечений объекта, микроскоп производит сканирование путем перемещения луча – scanning beam, изображение получается попиксельно. Произведя запись многих слоев объекта, возможно дальнейшее получение его трехмерного изображения.

Такое трехмерное изображение является не трехмерной томограммой, а трехмерным суммарным изображением. Поэтому для обработки полученных результатов необходима сложная система обработки данных.

Максимальная глубина проникновения порядка 0,25–0,3 мм и вертикальное разрешение до 2 мкм. Можно различить различные слои эпидермиса и даже размеры клеточных ядер, движение кровяных клеток по капиллярам.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Метод всасывания или вакуумной кутометрии. Датчик представляет собой полую трубку, внутри которой создается отрицательное давление. В том месте, где отверстие прикладывается к коже, кожа приподнимается (всасывается в трубку). Внутри датчика высота бугорка кожи определяется бесконтактной оптической системой. С помощью датчика давления и учета энергии, затраченной на получение отрицательного давления (например, если используется поршневая система, управляемая электродвигателем), можно оценить сопротивляемость кожи. Сопротивляемость кожи к отрицательному давлению, и ее способность возвращаться в исходное состояние выводятся на дисплей в виде кривых в конце каждого измерения.

Метод вдавливания. В процессе измерения кожа прокалывается индентором (игла с

плоским концом), снабженным датчиком усилия. При внедрении индентора, в коже возникают деформации растяжения, сдвига и сжатия. Используются инденторы различных диаметров. Эксперимент сводится к определению способности кожи противостоять внедрению в нее твердого индентора под действием определенной силы. Интерпретация результатов измерения твердости кожи методом вдавливания вызывает затруднения, поскольку трудно оценить степень влияния нарушения целостности кожи на ее механические свойства.

Баллистометрический метод. Применяется в склерометрии (учение об измерении твердости различных материалов). Его можно использовать для исследования эластичности кожи. Суть метода состоит в определении высоты отскока упругого предмета от кожи. Высота отскока определяется той энергией, которая возвращается кожей падающему предмету и может быть определена коэффициентом «возврата» *e*.

Методы продольной деформации:

1) Метод растяжения. Кожа нагружается параллельно ее поверхности. Тензодатчики жестко фиксируются к коже при помощи биологического клея или пластыря, после чего их тянут в разные стороны.

2) В датчике для метода кручения используется сдвиговая деформация. В основу методики положен принцип смещения кольцевого участка кожи, образованного двумя концентрическими окружностями. Участок в виде плоской кольцевой ленты ограничен неподвижной обоймой и способной к повороту внутренней втулкой. Обойма и втулка при замерах фиксируются биологическим клеем. При нагружении внутренней втулки постоянным крутящим моментом, она поворачивается на угол, который зависит от механических свойств кожи. Этот угол служит критерием для сопоставления механических свойств разных участков кожных поверхностей.

Динамический метод. Суть метода состоит в том, что с помощью специального датчика регистрируется одиночное колебание кожи. После чего рассчитываются коэффициенты, отражающие упругий и вязкий компоненты механического сопротивления.

Еще один вариант динамического метода определения упругости кожи – метод вибрационной реоэластографии. Из биомеханики известно, что упругость биологических тканей можно оценить по частоте их резонанса, что и лежит в основе измерения. У метода есть важное преимущество: он позволяет вести непре-

рывную регистрацию упругости кожи при воздействии на нее различных косметических средств.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

К электрическим свойствам кожного покрова, оцениваемым на сегодняшний день, относят электрическое сопротивление, электрическую активность, проявляющуюся в форме изменений разности потенциалов и электрическую емкость диэлектрической среды.

Корнеометрия. Любые изменения диэлектрической постоянной в результате колебаний содержания воды в поверхностных слоях кожи приводят к изменению емкостных характеристик измерительной системы. Следовательно, оценив эти изменения можно оценить степень увлажненности исследуемого участка.

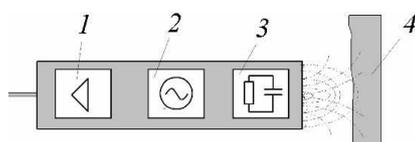


Рис. 3. Описание метода

Основные блоки корнеометра (рис. 3):

- 1 – усилитель;
- 2 – генератор;
- 3 – RC-цепочка;
- 4 – исследуемый объект.

RC-цепочка является чувствительным элементом датчика, этот элемент состоит из двух электродов, расположенных друг относительно друга подобно «открытому» конденсатору. Электроды расположены в обратной связи высокочастотного генератора (возможны и другие схемы включения). По мере приближения датчика к объекту с большой диэлектрической постоянной, емкость чувствительного элемента увеличивается. Она зависит от площади поверхности электродов (S), дистанции (d) и диэлектрической постоянной материала (ϵ):

$$C \sim (\epsilon \cdot S) / d. \quad (2)$$

Изменение емкости напряжения преобразуется в рост напряжения на выходе измерительной схемы.

Импедансометрия. Принцип действия этих устройств следующий: с помощью генератора постоянного тока (напряжения) воздействуют на исследуемый участок и оценивают его сопротивление, по измеренному значению напряжения (тока) между электродами.

Эти методы широко применяются в акупунктурной диагностике, в детекторах лжи, в

устройствах оценивающих степень увлажненности кожи. Но результаты, получаемые с их помощью, малостабильны и имеют плохую повторяемость.

Для изучения строения кожного покрова целесообразно применять объемные визуализирующие методы. Ультразвуковая томография, ОКТ и конфокальная микроскопия – позволяют различить между собой с высокой точностью различные слои кожного покрова. Для изучения верхних слоев кожи (роговой слой, эпидермис) наиболее подходят ОКТ и микроскопия. Для изучения глубоких слоев – лучшие результаты достигаются с помощью ультразвуковой микроскопии. Эти методы являются бесконтактными и безвредными для здоровья пациента, их недостатком является то, что оборудование, реализующее эти методы, является дорогостоящим [6].

Для изучения механических свойств кожи (применяется для оценки косметических средств), наиболее эффективен метод всасывания. Поскольку позволяет оценить совокупность параметров различных слоев кожи, которые в совокупности определяют механические свойства кожного покрова.

При постановке диагноза и слежении за течением раневых процессов и кожных заболеваний – эффективным оказывается анализ изображений, полученных с камер высокого разрешения. Они позволяют оценить изменение окраски аномальных участков по сравнению нормальными участками. Поврежденные участки не допустимо подвергать сильным механическим воздействиям, поэтому метод всасывания здесь применять невозможно. Для таких случаев целесообразно применение прибора АСА, уровень внешнего воздействия которого незначительный.

Методы позволяющие оценивать увлажненность, температуру кожного покрова целесообразно применять для уточнения данных, получаемых вышеописанными методами.

ВЫВОДЫ

Физические свойства кожного покрова оцениваются с помощью различных методов: акустических, оптических, механических и электрических. Информация, получаемая с их помощью, плохо сопоставима и несет информацию об одной из сторон, характеризующей сложный, динамично изменяющийся объект.

Параметры и характеристики, отражающие физические свойства в норме и при патологии плохо определены. Информация носит в основном качественный характер.

Для оценки физических свойств и получения объективной информации о состоянии органов и зон живых объектов целесообразно использовать электрические методы, дающие расширенный объем информации. Требуется доработка известных подходов и исследование с учетом особенностей свойств живой материи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусев В. Г.** Получение информации о параметрах и характеристиках организма и физические методы воздействия на него // М.: Машиностроение, 2004. 597 с.
2. **Тимофеев Г. А.** Методы аппаратного исследования кожи человека // Косметика и медицина. 2005. Вып. 4. С. 28–36.
3. **Сомкин П. Б.** Обзор аппаратных методов исследования кожного покрова человека и его механических свойств // Сб. науч. тр. СевКавГТУ. Сер. «Естественно-научная». Ставрополь: СевКавГТУ, 2007. Вып. 3. С. 214–225.
4. **Балабанов Е. И.** Аналитический обзор. Кожа человека, механические свойства, теплопередача // Медицинская техника. 2005. Вып. 3. С. 15–20.
5. **Hendriks F. M.** Mechanical behavior of human epidermal and dermal layers in vivo // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 108 p.
6. **Федорова В. Н., Новосельцева Г. Д.** Акустические свойства кожи в диагностике и оценке эффективности лечения // Методические рекомендации. М.: РГМУ, 1998. С. 16–23.
7. **Обухов С. А., Сидоренко Е. И.** Акустическая биомеханика глаза и ее значение для клиники. М., 2001. 125 с.

8. Описание медицинских диагностических приборов (Новые идеи в косметике) [Электронный ресурс] (<http://www.nicosmetics.com/>).

ОБ АВТОРАХ

Гусев Владимир Георгиевич, проф. каф ИИТ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1965). Д-р техн. наук по элементам и устройствам выч. техники и системам управления (УАИ, 1987). Засл. деят. науки РБ, засл. изобр. БАССР. Иссл. в обл. электронных преобразователей.



Мустафин Тимур Наилевич, аспирант. Магистр техники и технологии по приборостроению (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. разработки техн. средств для получения информации о параметрах кожного покрова человека.

