

DOI: 10.18698/1812-3368-2015-6-63-67

УДК 611.08

ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ ТКАНЬ

В.М. Горшкова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: v_gorshkova@mail.ru

В последнее время ультразвуковое воздействие является наиболее распространенным способом воздействия на кожу. Приведено теоретическое описание действия ультразвука на слой жидкости, находящейся на поверхности кожи. На основе этого описания выполнены экспериментальные исследования и разработана технология очистки кожи с помощью ультразвука. Установлено, что эта технология позволяет уменьшить толщину рогового слоя, увеличить толщину живых слоев эпидермиса, удалить участки гиперкератоза, а также выровнять тон кожи.

Ключевые слова: очистка кожи, ультразвуковое воздействие, биологическая ткань.

IMPACT OF LOW-FREQUENCY ULTRASOUND ON BIOLOGICAL TISSUE

V.M. Gorshkova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: v_gorshkova@mail.ru

The ultrasound skin treatment has recently become the most widely used method in facial therapy. The paper gives a theoretical description of the ultrasound impact on the skin surface liquid layer. Based on the description, the authors carry out research and develop skin-cleaning technology with the help of ultrasound. This technology helps reduce the thickness of a corneal layer, increase the thickness of living epidermal layers, remove epidermolytic hyper keratosis from the skin, and even out the skin tone.

Keywords: skin cleaning, ultrasound impact, biological tissue.

В зависимости от способа воздействия на кожу различают механическое (удаление эпидермиса — дермабразия), химическое (воздействие химическими препаратами, например, фруктовыми кислотами, трихлоруксусной кислотой, фенолом и др.), лазерное и в последнее время ультразвуковое (УЗ) воздействия [1–3].

Цель настоящей работы — теоретическое обоснование физико-химических процессов очистки кожи с помощью низкочастотного ультразвука. При УЗ-очистке (пилинге) проводится воздействие УЗ-колебаний на систему лекарственное вещество в растворе (гель, крем)–биологическая ткань (кожа — роговой слой и эпидермис) [4, 5].

Статическое равновесие пузырька в покоящейся жидкости.

Для описания статического равновесия пузырька в покоящейся жидкости введем следующие обозначения: давление, создаваемое окружающей жидкостью, на поверхность пузырька (каверне) P ; давление насыщенных паров в пузырьке P_n ; давление газов воздуха P_r ; коэффициент поверхностного натяжения σ .

Предположим, что пузырек представляет собой сферу радиусом R . Очевидно, на поверхности раздела сред имеет место баланс давлений, описываемый равенством:

$$P = P_n + P_r - \frac{2\sigma}{R}. \quad (1)$$

Согласно (1),

— если

$$P > P_n + P_r - \frac{2\sigma}{R}, \quad (2)$$

то пузырек сжимается;

— если

$$P < P_n + P_r - \frac{2\sigma}{R}, \quad (3)$$

то пузырек увеличивается.

В соответствии с неравенствами (2), (3), изменение размеров пузырька может происходить в результате воздействия внешних давлений $f(R, T)$. Поэтому из (1)–(3) следует, что $f(R, T) = P - P_n + P_r + \frac{2\sigma}{R}$. Приведем выражение для воздействия внешних давлений $f(R, T)$ для закона Менделеева – Клапейрона:

$$f(R, T) = -P + P_n + \frac{BT}{R^3} - \frac{2\sigma}{R}, \quad (4)$$

где $B = \text{const} > 0$; T — абсолютная температура.

На основании (4) найдем максимальное (критическое) значение радиуса $R_{\text{кр}}$ пузырька, а из (1) — критическое давление $P_{\text{кр}} = P(R)|_{R=R_{\text{кр}}}$.

При фиксированных значениях P , P_n , R_0 (начальный радиус пузырька), σ имеем $\max_R f(R, T) = f(R_{\text{кр}}, T)$. Во всех случаях радиус $R_{\text{кр}}$ является решением уравнения

$$\frac{\partial f(R, T)}{\partial R} = 0. \quad (5)$$

Из (5) и (4) следует, что

$$R_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{3BT}{2\sigma}}; \quad P_{\text{кр}} = P_n - 2\left(\frac{(2/3)\sigma}{BT}\right)^{1/2}.$$

Условия схлопывания газового пузырька. Определим условия, при выполнении которых газовый пузырек кавитирующей жидкости

(лежащей на поверхности) схлопывается. Как уже было отмечено выше, для пузырька (сфера радиусом R), который находится в положении равновесия, справедливо выражение (1). Предположим, что установился стационарный режим кавитации; газ совершенный и его плотность постоянна; жидкость несжимаема, изотропна и однородна; течение жидкости стационарное и безвихревое; размер пузырька меняется только вследствие изменения его радиуса R . Обозначим $u(t) = dR(t)/dt$ — скорость изменения радиуса.

В работе [6] было установлено, что при перечисленных выше предположениях скорость $u(t)$ удовлетворяет уравнению

$$-\rho \left(\frac{du}{dt} - \frac{3}{2}u^2 \right) = P_\infty - P_t, \quad (6)$$

где ρ — плотность газа; P_t — давление на стенку пузырька в момент времени t ; P_∞ — давление в удаленной точке.

В этом случае с учетом формулы (1) запишем $P_t = P_n - \frac{2\sigma}{R} + \frac{BT}{R^3}$. Обозначим давление как $f(R, T) = - \left(P_\infty - P_n + \frac{2\sigma}{R} - \frac{BT}{R^3} \right)$. Из (6) следует, что, если $\partial f(R, T)/\partial R = 0$, то $u(t) \equiv 0$. Поэтому

$$R_{кр} = \left(\frac{3 BT}{2 \sigma} \right)^{1/2}.$$

Экспериментальное подтверждение. Наличие пузырьков приводит к тому, что жидкость становится сжимаемой. Последнее означает, что ее плотность зависит от давления. Приблизительно можно принять, что эта зависимость линейна. Такой факт теоретически и экспериментально установлен в работе [4]. Следовательно, в результате взаимодействия клеток рогового слоя и микропузырьков, последние схлопываются, в результате чего в месте их воздействия образуется избыточное (микролокальное) давление, которое приводит к отшелушиванию мертвых (роговых) клеток.

На поверхности кожи (рогового слоя) есть много неровностей типа трещин. При заполнении их жидкостью в трещинах остается воздух. Кроме того, через поверхность жидкости за счет диффузии происходит растворение газов в ней, развивается кавитация. Таким образом, в результате взаимодействия клеток рогового слоя и микропузырьков последние схлопываются, поэтому в месте УЗ-воздействия создается избыточное давление, которое приводит к отшелушиванию ороговевших (мертвых) клеток.

Роговой слой является несмачиваемой поверхностью [2, 3]. Отметим, что критерий качественного отшелушивания ороговевших кле-

ток — смачиваемость поверхности, которую можно описать следующим образом: пусть σ_1 — поверхностное натяжение на границе раздела кожа–воздух, σ_2 — поверхностное натяжение на границе раздела кожа–раствор, σ_3 — поверхностное натяжение на границе раздела раствор–воздух, θ — краевой угол.

Условие смачиваемости поверхности имеет вид $\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3 \cos \theta$. Если $\theta < 90^\circ$, то поверхность смачиваемая, если $\theta > 90^\circ$, то поверхность не смачиваемая. Следовательно, после проведения УЗ-очистки поверхность кожи становится смачиваемой, что позволяет сделать вывод об эффективности такого воздействия.

Дальнейшие теоретические исследования могут быть основаны на эффекте “расклинивающего” давления, возникающего в тонких слоях жидкости [7, 8].

На основе теоретических и экспериментальных исследований в МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана технология очистки кожи с помощью низкочастотного ультразвука [4].

Ультразвуковая очистка кожи осуществляется при совместном воздействии УЗ-колебаний низкой частоты (26,5 кГц) интенсивностью 0,2... 0,8 Вт/см² в непрерывном режиме и растворов (антисептиков, например, календула, (5... 15)%-ный АНА кислотностью $pH = 3... 5$ (раствор α -гидрокислоты)) на систему раствор (гель)–биологическая ткань (роговой слой кожи). С помощью УЗ-генератора и инструментов, разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, указанная технология эффективна и атравматична, позволяет уменьшить толщину рогового слоя, удалить участки гиперкератоза, увеличить толщину живых слоев эпидермиса, выровнять тон (цвет) кожи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Norris D.A., Whang K., David-Bajar K., Bennion S.D. The influence of ultraviolet light immunological cytotoxicity in the skin // *Photochem Photobiol.* 1997. Vol. 65. P. 636–646.
2. Cross-Linking of collagen by singlet oxygen generated with UVA / A. Ryu, E. Naru, K. Arakane, T. Masunaga, K. Shinomoto, T. Nagano, M. Hirobe, S. Mashiko // *Chem. Pharm Bull (Tokyo)*. 1997. Vol. 45. P. 1243–1247.
3. Эрнандес Е.И. Косметический пилинг. Теоретические и практические аспекты. Сборник статей. М.: Косметика и медицина, 2003. 214 с.
4. Горшкова В.М. Ультразвуковой пилинг // *Технология живых систем*. 2009. № 1. С. 48.
5. Gorshkova V.M., Savchenko S.V. Potential Use Ultrasound for Subcutaneous Delivery of Anesthetics // *Biomedical Engineering*. 2013. Vol. 47. No. 1. P. 36–38.
6. Harway Gr. Cavitation formation and development // *Cellulose Gr. and Comp. Physiol.* 1944. Vol. 24. No. 1. P. 2–21.
7. Романов А.С., Семиколонов А.В. Безнапорное заполнение капилляра в асимптотической теории смачивания // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/699.html>

8. Романов А.С., Семиколонов А.В. Форма свободной поверхности жидкости, находящейся в равновесии со своей α -пленкой // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/872.html>

REFERENCES

- [1] Norris D.A., Whang K., David-Bajar K., Bennion S.D. The influence of ultraviolet light on immunological cytotoxicity in the skin. *Photochem Photobiol*, 1997, vol. 65, pp. 636–646.
- [2] Ryu A., Naru E., Arakane K., Masunaga T., Shinomoto K., Nagano T., Hirobe M., Mashiko S. Cross-Linking of collagen by singlet oxygen generated with UVA. *Chem. Pharm. Bull. (Tokyo)*, 1997, vol. 45, pp. 1243–1247.
- [3] Ernandes E.I. Kosmeticheskiy piling. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty. Sb. statey [Cosmetic Peeling. Theoretical and Practical Aspects. Collected Works]. Moscow, Izd. Dom “Kosmetika i meditsina” Publ., 2003. 214 p.
- [4] Gorshkova V.M. Ultrasonic Peeling. *Tekhnologiya zhivyykh system* [Technologies of Living Systems], 2009, no. 1, p. 48 (in Russ.).
- [5] Gorshkova V.M., Savchenko S.V. Potential Use Ultrasound for Subcutaneous Delivery of Anesthetics. *Biomedical Engineering*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 36–38.
- [6] Harway Gr. Cavitation formation and development. *Cellular Gr. and Comp. Physiol.*, 1944. Vol. 24, no. 1, pp. 2–21.
- [7] Romanov A.S., Semikolenov A.V. Depressurized capillary filling in the asymptotic theory of wetting. *Jelektr. nauchno-tehn. Izd. “Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii”* [El. Sc.-Techn. Publ. “Eng. J.: Science and Innovation”], 2013, iss. 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/699.html>
- [8] Romanov A.S., Semikolenov A.V. Form of a free liquid surface, which is in equilibrium with its alfa-film. *Jelektr. nauchno-tehn. Izd. “Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii”* [El. Sc.-Techn. Publ. “Eng. J.: Science and Innovation”], 2013, iss. 8. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/872.html>

Статья поступила в редакцию 22.04.2015

Горшкова Вера Минировна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Gorshkova V.M. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Горшкова В.М. Воздействие низкочастотного ультразвука на биологическую ткань // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. № 6. С. 63–67.

Please cite this article in English as:

Gorshkova V.M. Impact of low-frequency ultrasound on biological tissue. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2015, no. 6, pp. 63–67.