

УДК 616.284.7–089.844:612.76:612.062:612.79

ИЗУЧЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЖИ СОСЦЕВИДНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОСМЕТИЧЕСКОЙ ОТОПЛАСТИКИ

Д. С. Аветиков, Д. В. Стебловский, И. Ю. Попович, К. П. Локес, И. В. Бойко

Украинская медицинская стоматологическая академия, г. Полтава

STUDYING OF BIOMECHANICAL PROPERTIES OF SKIN IN THE MASTOID REGION WHILE THE COSMETIC OTOPLASTY PERFORMANCE

D. S. Avetikov, D. V. Steblovskiy, I. Yu. Popovich, K. P. Lokes, I. V. Boyko

С каждым годом увеличивается число людей, особенно женщин, которые более тщательно относятся к своей внешности [1, 2]. В связи с этим увеличивается число потенциальных пациентов, что обуславливает развитие реконструктивной и эстетической хирургии лица [3, 4]. Особое место занимают пациенты, у которых выявляют лопухость как врожденную деформацию ушной раковины [5]. Существующие сегодня методики устранения лопухости не гарантируют оптимальный косметический эффект и не учитывают биомеханические свойства кожно—жировых лоскутов, фиброархитектонику кожи, что в дальнейшем обуславливает негативные результаты оперативных вмешательств, прежде всего, образование патологических рубцов кожи [6, 7].

Цель исследования: определить оптимальные границы деформации кожно—жировых лоскутов сосцевидной области и установить оптимальное направление вектора приложенной к лоскуту кожи силы при выполнении косметической отопластики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены кожно—жировые лоскуты, взятые из сосцевидной области у 35 пациентов, оперированных по поводу лопухости разной степени, во время иссечения избытка кожи. Лоскуты подвергали одноосному линейному растяжению [8, 9].

В исследовании использовали следующие методы: испытание кож-

Реферат

Существующие методики устранения лопухости не гарантируют оптимальный косметический эффект. Изучены оптимальные границы деформации кожно—жировых лоскутов сосцевидной области при выполнении косметической отопластики. На основе анализа биомеханических исследований определены оптимальные углы растяжения и направление вектора силы кожно—жировых лоскутов при выполнении отопластики, обеспечивающие условия выполнения хирургического вмешательства с сохранением природных топографоанатомических соотношений тканей лица и шеи.

Ключевые слова: лопухость; косметическая отопластика; кожно—жировой лоскут; биомеханические свойства кожи.

Abstract

The present methods for a droopy ears correction do not guarantee the optimal cosmetic effect achievement. Optimal borders of deformity in cutaneo—adiposal flap of the mastoid region while cosmetic otoplasty performance were studied. Basing on analysis of biomechanical investigations, there were determined the optimal corners of stretching and direction of the strength vector in cutaneo—adiposal flaps while otoplasty performance, securing conditions for surgical intervention performance with preservation of a natural topographo—anatomical ratios in the head and neck tissues.

Key words: droopy ears; cosmetic otoplasty; cutaneo—adiposal flap; biomechanical properties of skin.

но—жировых лоскутов сосцевидной области на одноосное линейное растяжение с использованием разрывной машины, статистические методы обработки данных.

В качестве линейной реологической модели, описывающей механические свойства кожи, выбрана модель Кельвина [9], которая удовлетворительно описывает вязкоупругие свойства кожи.

Для нахождения точных решений системы уравнений использовали численные методы оптимизации. Этот алгоритм реализован с помощью системы компьютерной алгебры — Mathcad версия 14 [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изотонического эксперимента отобраны два образца (лоску-

та) кожи, физические параметры которых соответствовали геометрии лоскутов, мобилизованных при выполнении отопластики. Все лоскуты были прямоугольной формы.

Размеры лоскута: длина (l_0) 8 мм, ширина (w_0) 10 мм, толщина (h_0) 0,9 мм.

Здесь и далее применен индекс, обозначающий операцию: о — отопластика.

Растягивающие постоянные усилия, приложенные к образцам, составляли соответственно 0,4 и 0,35 кг.

Статическое механическое напряжение в образцах определяли выражением:

$$\sigma_o = F/S = F/w \times h.$$

Таким образом, напряжение, рассчитанное по формуле, имело значение:

Результаты изотонического эксперимента.

t, с	l ₀ , мм	Δl ₀ , мм	ε ₀
0,0	8,0	0,0	0,0000
0,1	8,3	0,3	0,0375
0,2	8,5	0,5	0,0625
0,3	8,7	0,7	0,0875
0,4	9,0	1,0	0,1250
0,5	9,3	1,3	0,1625
0,6	9,6	1,6	0,2000
0,7	10,0	2,0	0,2500
0,8	10,3	2,3	0,2875
0,9	10,7	2,7	0,3375
1,0	11,1	3,1	0,3875
1,4	11,9	3,9	0,4875
1,8	12,9	4,9	0,6125
2,2	13,9	5,9	0,7375
2,6	15,1	7,1	0,8875
2,8	15,8	7,8	0,9750
3,0	16,4	8,4	1,0500
3,4	17,5	9,5	1,1875
3,8	18,3	10,3	1,2875
4,2	18,7	10,7	1,3375
4,6	18,9	10,9	1,3625
5,0	19,0	11,0	1,3750

$\eta_r^\circ = 1,78 \times 10^5$ Па, $\eta_o^\circ = 3,81 \times 10^5$ Па.

Результаты изотонических экспериментов приведены в *таблице*.

Значения абсолютного удлинения (Δl_i) и деформации (l_i) рассчитывали по формуле:

$$\Delta l_i = l_i - l_1, \quad \varepsilon_i = \Delta l_i / l_1,$$

где i — индекс, обозначающий номер измерения.

На основании анализа экспериментальных и расчетных данных построен график зависимости деформации от времени $\varepsilon = \varepsilon(t)$ для двух экспериментов, представленные на *рис. 1*.

Дальнейшей задачей были выбор механико—математической модели, описывающей вязкоупругие свойства кожи, проверка адекватности выбранной модели и определение значений параметров, описывающих механические свойства кожи.

Закон упругости $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ для модели в целом:

$$\eta_2 \sigma + (E_1 + E_2) \sigma = \eta_2 E_1 \varepsilon + E_1 E_2 \varepsilon. \quad (1)$$

При изотоническом напряжении образца ($\sigma = \sigma^0 = \text{const}$) решение уравнения (1), описывающего изменение деформации, при начальном условии $\varepsilon|_{t=0} = \varepsilon_0$ имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^* + (\varepsilon_0 - \varepsilon^*) e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon^* = \sigma_0 / E_{\text{eff}}$ — максимальная деформация образца ($\varepsilon^* = \varepsilon(\infty)$),

$E_{\text{eff}} = E_1 E_2 / (E_1 + E_2)$ — эффективный модуль упругости образца.

В изометрическом эксперименте ($\varepsilon = \varepsilon^0 = \text{const}$) решение уравнения (1), описывающего релаксацию напряжения при постоянной деформации с учетом начального условия $\sigma|_{t=0} = \sigma_0$, имеет вид:

$$\sigma(t) = \sigma^* + (\sigma_0 - \sigma^*) e^{-\frac{(E_1 + E_2)t}{\eta_2}}, \quad (3)$$

где $\sigma^* = E_{\text{eff}} \varepsilon^0$ — остаточное напряжение ($\sigma^* = \sigma(\infty)$).

Экспериментальную зависимость деформации от времени $\varepsilon = \varepsilon(t)$ аппроксимируем функцией, полученной из выражения (2), с учетом того, что начальная деформация $\varepsilon_0 = 0$:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^* (1 - e^{-\beta t}), \quad (4)$$

где $\beta = E_2 / \eta_2$.

Задача оптимизации заключалась в том, чтобы найти наилучшие значения неизвестных параметров ε^* и β , максимально приближающие значения функции $\varepsilon(t, \varepsilon^*, \beta)$ к фактическим значениям ε . Эта задача решена с применением метода наименьших квадратов (МНК), который сводится к минимизации суммы квадратов отклонений функции $\varepsilon(t, \varepsilon^*, \beta)$ от искомых параметров ε^*, β :

$$\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon(t_i, \varepsilon^*, \beta))^2 \xrightarrow{\varepsilon^*, \beta} \min. \quad (5)$$

Для нахождения точных решений системы уравнений (5) использовали численные методы оптимизации, реализованные с помощью системы компьютерной алгебры — Mathcad версия 14 [10].

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что эффективный модуль упругости в обоих наблюдениях практически одинаков, что было ожидаемо в приближении изотропности упругих свойств кожи. Для сравнения: модуль упругости эластина (основного упругого компонента кожи) составляет $1 \div 5 \times 10^5$, что также свидетельствовало об адекватности полученных значений.

Косметический эффект пластической операции зависит от многих факторов, в том числе степени деформации кожного—жирового лоскута, который натягивается, и напряжения в коже при деформации.

Мы предположили, что геометрия свободных границ лоскута кожи является центрально симметричной, то есть свободные края кожи считаются дугами кругов соответствующих радиусов R и r (*рис. 2*).

Исходные данные: радиус R , длина дуги $A-OP_1-OP_2-OP_3-OP_4-$

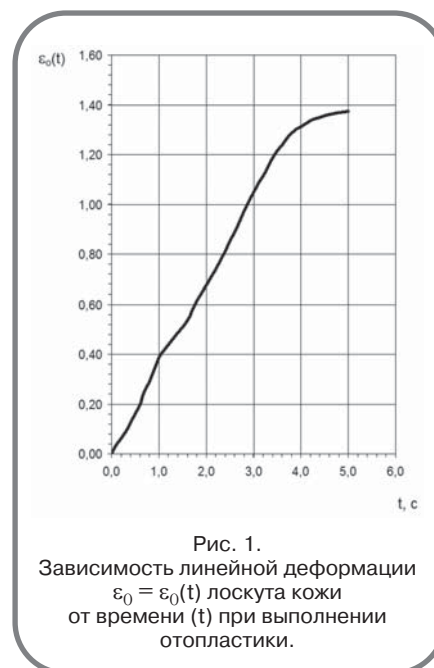


Рис. 1.
Зависимость линейной деформации $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(t)$ лоскута кожи от времени (t) при выполнении отопластики.

В, максимальное смещение кожи δ вдоль оси OO' . Растягивающие усилия, приложенные к точкам OP_1, OP_2, OP_3, OP_4 .

Основным критерием определения направлений является равенство тангенциальных напряжений σ_t областей $A-OP_1', OP_1'-OP_2', OP_2'-OP_3', OP_3'-OP_4', OP_4'-B$. В первом приближении тангенциальные напряжения пропорциональны σ_t тангенциальным деформациям ϵ_t указанных областей. Это предположение позволит определить координаты конечных точек $OP_1', OP_2', OP_3', OP_4'$ на основании исходных данных и координат точек OP_1, OP_2, OP_3, OP_4 . Направления приложенных растягивающих усилий $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и соответствующие радиальные смещения $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ определены формулами:

$$\delta_i = \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2} = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}, \quad (6)$$

где x'_i и y'_i — координаты точек $OP_1', OP_2', OP_3', OP_4'$;

x_i и y_i — координаты точек OP_1, OP_2, OP_3, OP_4 относительно точки O ; индекс $i = 1, 2, 3, 4$ соответствует номеру точки.

Координаты характерных точек определены по формулам:

$$\begin{aligned} x_i &= R \cos(\theta_i), y_i = R \sin(\theta_i), \\ x'_i &= l + r \cos(\theta'_i), y'_i = l + r \sin(\theta'_i), \end{aligned} \quad (7)$$

где $l = R + \delta - r$,

угол θ_i определяется как угол между прямой OO_i и осью OO' ,

угол θ'_i определяется как угол между прямой $O'OP_i'$ и осью OO' .

Радиус r определяется как корень уравнения:

$$r(1 - \cos(\frac{\theta'_i}{2})) - R(1 - \cos(\frac{\theta_i}{2})) - \delta = 0. \quad (8)$$

Подставляя в уравнение (8) значения $\theta = S/R$, и учитывая соотношение между углами θ' та θ : $R \sin(\theta/2) = r \sin(\theta'/2)$, вытекающего из треугольников OAB и $O'AB$, уравнение (8) переписывается в виде:

$$r - \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2(\frac{S}{2R})} - R(1 - \cos(\frac{S}{2R})) - \delta = 0. \quad (9)$$



Рис. 2. Модель деформации кожного лоскута и направления растягивающих усилий при выполнении косметической отoplastики.

Получим решение этого уравнения:

$$r = \frac{(\delta + R(1 - \cos(\frac{S}{2R})) + R^2 \sin^2(\frac{S}{2R}))}{2(\delta + R(1 - \cos(\frac{S}{2R})))}. \quad (10)$$

Условие равенства тангенциальных деформаций каждой области кожно—жирового лоскута запишется в виде:

$$s'_j/s_j = \text{const}, \quad (11)$$

где $j = 1, 2, 3, 4, 5$,

$s_1 = AOP_1, s_2 = OP_1OP_2, s_3 = OP_2OP_3, s_4 = OP_3OP_4, s_5 = OP_4B,$
 $s'_1 = AOP_1', s'_2 = OP_1'OP_2', s'_3 = OP_2'OP_3', s'_4 = OP_3'OP_4', s'_5 = OP_4'B.$

Согласно геометрии лоскута: $s_1 = s_5 = 8$ мм, $s_2 = s_3 = s_4 = 15$ мм, откуда $S = \sum s_j = 61$ мм.

Можно доказать, что соотношение (11) превращается в выражение: $\theta'_j/\theta_j = \text{const}$, откуда определяем соотношение между углами:

$$\theta'_i = \frac{\theta'_i}{\theta_i},$$

где в силу симметрии $\theta_1 = -\theta_4 = \theta_2 + s_2/R, \theta_2 = -\theta_3 = s_3/2R$

Проведем расчеты для $R = 65$ мм, $\delta = 8$ мм.

$\theta = 61/65 = 0,938$ рад.

По формуле (10) определяем:

$$r = 36,26 \text{ мм.}$$

Затем находим соответствующие углы:

$\theta' = 2 \arcsin(R/r \sin(\theta/2)) = 1,89$ рад.
 $\theta_1 = -\theta_4 = 0,346$ рад, $\theta_2 = -\theta_3 = 0,115$ рад,
 $\theta'_1 = -\theta'_4 = 0,697$ рад, $\theta'_2 = -\theta'_3 = 0,232$ рад.

По формулам (6) и (7) находим окончательные значения деформации и направлений приложения растягивающих усилий: $x_1 = x_4 = 61,14$ мм, $y_1 = -y_4 = 22,05$ мм, $x'_1 = x'_4 = 64,54$ мм, $y'_1 = -y'_4 = 23,28$ мм, $x_2 = x_3 = 64,57$ мм, $y_2 = -y_3 = 7,48$ мм, $x'_2 = x'_3 = 72,03$ мм, $y'_2 = -y'_3 = 8,35$ мм, $\delta_1 = \delta_4 = 3,61$ мм, $\delta_2 = \delta_3 = 7,51$ мм, $\alpha_1 = \alpha_4 = 19,93^\circ, \alpha_2 = \alpha_3 = 6,64^\circ$.

Как свидетельствуют полученные результаты, значение радиального смещения кожи и направлений приложения растягивающих усилий коррелируют с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает адекватность модели и достоверность теоретических результатов.

Для достижения полного косметического эффекта операции следует также удовлетворить условие равенства радиального напряжения. Это достигается путем отслоения соответствующих областей кожно—жирового лоскута на разную глубину для выравнивания радиальной деформации.

Таким образом, на основе проведенных целенаправленных биомеханических исследований определены оптимальные углы растяжения и направления вектора силы кожно—жировых лоскутов при выполнении отoplastики, обеспечивающие хирургические вмешательства с сохранением природных топографоанатомических соотношений тканей лица и шеи.

В последующих исследованиях планируется применение полученной математической модели в практике с оптимизацией линий разрезов, их глубины и границ отслойки кожно—жировых лоскутов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветіков Д. С. Сучасні методи проведення розрізів при виконанні верхньої ритидектомії / Д. С. Аветіков, А. А. Гутник, Д. С. Стебловський // Вісн. пробл. біології і медицини. — 2011. — Т. 1(87), вип. 3. — С. 148 — 150.
2. Аветіков Д. С. Особливості проведення верхньої та середньої ритидектомії з урахуванням біомеханіки шкіри / Д. С. Аветіков, І. В. Яценко, А. А. Гутник // Укр. мед. альманах. — 2013. — Т. 16, № 1. — С. 4 — 6.
3. Аветіков Д. С. Роль біомеханічних властивостей шкіри при проведенні нижньої ритидектомії та косметичної отoplastики / Д. С. Аветіков, Д. В. Стебловський // Вісн. пробл. біології і медицини. — 2014. — Т. 1, № 2. — С. 40 — 43.
4. Аветіков Д. С. Клініко—морфофункціональні особливості підйому та мобілізації шкірно—жирових клаптів соскоподібної ділянки / Д. С. Аветіков, Д. В. Стебловський // Актуальні проблеми сучасної медицини. Вісн. укр. мед. стомат. академії. — 2013. — Т. 13, № 2. — С. 180 — 182.

5. Сэдик Н. Косметическая хирургия кожи / Н. Сэдик, Н. Лоуренс, Р. Мой. — М.: МЕДпресс, 2009. — 144 с.
6. Ниамту Дж. III. Минимально инвазивная косметическая хирургия лица / Дж. Ниамту III, Р. Хога. — М.: МЕДпресс—информ, 2007. — 256 с.
7. Oxlund H. The role of elastin in the mechanical properties of skin / H. Oxlund, J. Manschot, A. Viidik // J. Biomech. — 1988. — Vol. 21, N 3. — P. 276.
8. Бранков Г. Основы биомеханики.: пер. с болг. / Г. Бранков. — М.: Мир, 1981. — 256 с.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации; пер. с пол. И. Д. Рудинского / С. Осовский. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
10. Очков В. Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов / В. Ф. Очков. — СПб.: БХВ—Петербург, 2007. — 368 с.

