

УДК 531/534: [57+61]

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БИОЭЛАСТОМЕРОВ. ЧАСТЬ 2: РАЗЛИЧИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЖИ В ПРЕДЕЛАХ ЭПИ- И ГИПОГАСТРАЛЬНОЙ АНАТОМИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

М.Ф. Курек<sup>1</sup>, С.В. Шилько<sup>2</sup>, В.В. Аничкин<sup>1</sup>, С.Б. Анфиногенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Гомельский государственный медицинский университет, Беларусь, 246000, Гомель, ул. Ланге, 5, e-mail: kurek@gmail.ru

<sup>2</sup> Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Беларусь, 246050, Гомель, ул. Кирова, 32а, e-mail: shilko\_mpr@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрена проблема количественной оценки деформационно-прочностных характеристик эластомеров биологического происхождения на примере кожи человека. В частности, определены упругие характеристики кожи, взятой из эпи- и гипогастральной зон области живота для лиц различного пола и возраста. Установлено, что в пределах названных зон упругие характеристики кожи существенно изменяются, что затрудняет их биомеханическое исследование путем проведения стандартных испытаний на статическое растяжение. Анализируется возможность установления корреляции растяжимости и сократимости кожи.

**Ключевые слова:** биоэластомеры, кожа, статическое растяжение, упругость, гетерогенность, анизотропия.

### ВВЕДЕНИЕ

Механические свойства кожи – важная составляющая ее функций. Обеспечивая поддержку и защиту внутренних органов, кожа сохраняет способность двигаться и смещаться [11]. С точки зрения пластической хирургии А.А. Лимберг выделял три основных механических свойства кожи: сокращение, перемещение, растяжение [3]. В терминах биомеханики для характеристики этого в высшей степени функционального биоматериала чаще других используются понятия упругости, эластичности и твердости.

В большинстве случаев клинической практики оценка указанных параметров носит качественный и субъективный характер. Для количественного определения деформационных характеристик кожи необходимы инструментальные методы. В частности, широко используются испытания на статическое растяжение, которые служат своего рода ее «функциональной биопсией» [8].

Статические испытания на одноосное растяжение позволяют получить зависимость напряжений от деформации ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) [2, 4, 5, 14, 15], типичный вид которой показан на рис. 1. При растяжении кожи на кривой ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) выявляется начальный участок I, когда небольшие нагрузки вызывают значительное растяжение при малом напряжении в образце. На участке II происходит ужесточение биоткани, а на заключительном этапе III деформация сопровождается еще более быстрым ростом напряжений. Можно отметить, что если для участка I характерна упругая деформация,

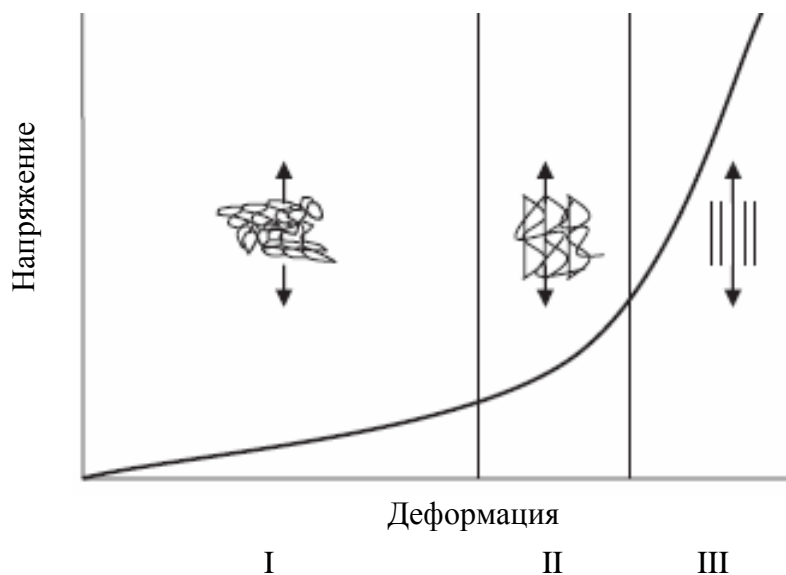


Рис. 1. Диаграмма «напряжение–деформация» в опытах на растяжение образца кожи

то на участках II и III проявляются выраженные вязкоупругие свойства кожи [9]. Такое деформационное поведение объясняется ориентацией и выпрямлением коллагеновых волокон при растяжении, как показано на рис. 1.

Большинство исследователей считает, что главную роль, определяющую механические свойства кожи, играет дерма, насыщенная коллагеном. Раздельное биомеханическое тестирование полнослойной кожи и дермального коллагена дает практически одинаковые результаты [9]. Прочность на разрыв и модуль Юнга в отдельных коллагеновых волокнах, выделенных из разных тканей, различаются несущественно.

В то время как изучению процесса растяжения посвящено достаточно много публикаций, свойства сокращения кожи изучены и освещены недостаточно. Еще меньше исследований посвящено вопросу корреляции растяжения и сокращения.

Известно, что биомеханические свойства кожи зависят от множества внутренних и внешних факторов и отличаются даже в пределах одного организма в зависимости от анатомической области [6, 12, 17]. Представляется, что имеет место изменение деформационных характеристик кожи даже в пределах зон протяженных анатомических областей, однако этот вопрос также получил недостаточное освещение в литературе.

Целью настоящего исследования было выявление различий биомеханических свойств кожи из различных зон одной анатомической области на примере эпигастральной и гипогастральной областей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались деформационные свойства при растяжении образцов кожи из эпи- и гипогастральной областей 30 человек от 23 до 87 лет, из них 10 женщин и 20 мужчин.

В тесте на сокращение на коже эпигастральной и гипогастральной областей размечали маркером образцы в виде полос кожи 80×15 мм, ориентированных по длине в кранио-каудальном направлении. Кожу рассекали скальпелем (лезвие № 23) по размеченным линиям до подкожного слоя, затем кожу отделяли от гиподермы.

Образцы кожи помещались в физиологический раствор, после чего на разрывной машине *Instron-5567* проводились испытания на статическое растяжение по ГОСТ 11262-80. Анализировали характерные участки (фазы) полученных диаграмм «напряжение–деформация», включая момент максимальной деформации, предшествовавшей разрыву лоскута.

Точки перехода фаз I, II и III определяли визуально по графику, в сомнительных случаях дополнительно вычисляли коэффициент роста напряжения (темп роста) – относительную величину, характеризующую интенсивность изменения показателя за определенный промежуток времени:

$$A_i = x_i / x_{i-1}, \quad (1)$$

где  $A_i$  – коэффициент роста напряжения в момент времени  $i$ ,  $x_i$  – напряжение в момент  $i$  (МПа),  $x_{i-1}$  – напряжение в предыдущий момент времени (МПа).

Оценка нормальности распределения проводилась с помощью критерия Шапиро–Уилка. Распределение можно считать приблизительно нормальным, что говорит о влиянии множества факторов на изучаемые явления.

Сравнительный анализ групп проводился с использованием непараметрических критериев (тест совпадающих пар Уилкинсона для связанных групп, критерий Манна–Уитни для несвязанных групп, коэффициент корреляции Спирмена). Разность показателей считали статистически достоверной при  $p \leq 0,05$ . В качестве средних значений в тексте приведены медианы.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных программ *STATISTICA 6.0*.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При растяжении кожи на кривой «напряжение–деформация» выявляется участок небольшой деформации (участок I), который зависит от тонкой эластиновой сети. Вкладом изогнутых коллагеновых волокон на указанной стадии деформирования можно пренебречь [9]. Следовательно, участок I описывает функциональное состояние эластиновых волокон.

Натяжение, присущее коже, проявляется в сокращении краев раны после нанесения разреза и обуславливает некоторое уменьшение размеров лоскута после разреза и отделения лоскута от подлежащих тканей. Отмеченное свойство обусловлено наличием сети эластиновых волокон [9, 10].

Исходя из этого авторами сделано предположение, что измерение параметров деформирования на участке I кривой «напряжение–деформация» и степени сократимости кожных лоскутов после нанесения разрезов и отделения кожи от подкожного жира должно давать близкие результаты. С этой целью были проведены испытания на сокращение и растяжение кожи.

### Тест на сокращение

Тест заключался в измерении кожных лоскутов после нанесения разрезов и после отделения лоскутов от подкожного жира. За 100% размера принималась разметка 8×15 мм. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Разница в сокращении волокон по длине и ширине обусловлена направлением линий Лангера, которые, в первую очередь, отражают направление коллагеновых волокон [7]. Однако в настоящем исследовании представляет интерес сокращение кожи по площади. Статистически значимой разности уменьшения площади кожных образцов из эпи- и гипогастральной областей после нанесения разрезов не выявлено.

Таблица 1

## Результаты испытания на сокращение кожи эпи- и гипогастральной областей

Параметры	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Межквартильный интервал
Длина образцов в эпигастрии после нанесения разрезов, %	93,7	93,8	83,8	112,5	87,5	97,5	10,0
Ширина образцов в эпигастрии после нанесения разрезов, %	77,1	73,3	53,3	93,3	73,3	80,0	6,7
Площадь образцов в эпигастрии после нанесения разрезов, %	72,3	71,3	50,0	88,8	65,1	80,0	14,9
Длина образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	95,5	94,4	87,5	112,5	92,5	98,8	6,3
Ширина образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	74,2	73,3	60,0	86,7	73,3	80,0	6,7
Площадь образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	70,9	71,5	55,5	82,5	66,0	75,2	9,2
Длина образцов в эпигастрии после отделения подкожного жира, %	97,1	94,4	75,0	125,0	90,0	106,3	16,3
Ширина образцов в эпигастрии после отделения подкожного жира, %	68,8	66,7	60,0	80,0	66,7	73,3	6,7
Площадь образцов в эпигастрии после отделения подкожного жира, %	66,6	66,0	54,0	83,3	60,0	70,8	10,8
Длина образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	95,8	95,6	81,3	112,5	90,0	102,5	12,5
Ширина образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	67,2	66,7	53,3	73,3	63,3	73,3	10,0
Площадь образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	64,4	64,3	52,0	78,8	57,0	70,0	13,0

Образцы после разреза, освобожденные от натяжения, обусловленного соседними участками кожи, оставались связанными с подлежащими тканями, что не позволяло выявить их способность к сокращению. Чтобы полностью освободить образцы от влияния окружающих тканей, кожа отделялась от подлежащего жира и соединительнотканых перемычек между адипоцитами. После измерения размеров лоскутов были получены следующие результаты.

Степень сокращения кожи из гипогастральной области оказалась выше по сравнению с кожей из эпигастрия,  $p = 0,027$ . Хотя отмеченная разница не имеет клинического значения, она важна для характеристики деформационного поведения кожи.

Таблица 2

## Сравнение результатов испытания на сокращение кожи эпи- и гипогастральной областей

Параметры	Эпигастральная область		Гипогастральная область		Разность медиан	Разность средних	Критерий Уилкинсона	Z-значение	Статистическая значимость
	медиана	средняя	медиана	средняя					
Длина образцов после нанесения разрезов, %	93,8	93,7	94,4	95,5	0,6	1,83	74,5	2,16	0,031
Ширина образцов после нанесения разрезов, %	73,33	77,1	73,33	74,2	0	2,89	20,5	2,24	0,025
Площадь образцов после нанесения разрезов, %	71,29	72,3	71,5	70,9	0,21	1,35	116,5	1,24	0,216
Длина образцов после отделения подкожного жира, %	94,4	97,1	95,6	95,8	1,25	1,38	103,5	1,33	0,184
Ширина образцов после отделения подкожного жира, %	66,7	68,8	66,7	67,2	38,7	1,56	28	1,54	0,124
Площадь образцов после отделения подкожного жира, %	66	64,4	64,3	64,3	1,67	0,07	88,5	2,21	0,027

Таблица 3

## Сравнение результатов теста на сокращение кожи по полу (критерий Манна–Уитни)

Параметры	Критерий Манна–Уитни	Z-значение	Статистическая значимость	Точная вероятность
Длина образцов в эпигастрии после нанесения разрезов, %	47,5	-2,3	0,02	0,02
Ширина образцов в эпигастрии после нанесения разрезов, %	99	-0,044	0,96	0,98
Площадь образцов в эпигастрии после нанесения разрезов, %	76	-1,056	0,29	0,3
Длина образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	63,5	-1,60	0,11	0,1
Ширина образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	82	0,79	0,43	0,45
Площадь образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	89	-0,48	0,63	0,65
Длина образцов в эпигастрии после отделения подкожного жира, %	67	-1,45	0,15	0,16
Ширина образцов в эпигастрии после отделения подкожного жира, %	85	-0,66	0,5	0,53
Площадь образцов в эпигастрии после отделения подкожного жира, %	64,5	-1,56	0,12	0,12
Длина образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	75,5	-1,08	0,28	0,29
Ширина образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	58,5	-1,83	0,068	0,07
Площадь образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	55,5	-1,96	0,05	0,05

Таблица 4

## Корреляционный анализ возраста и сократимости кожи

Параметры	Ранговый коэффициент корреляции Спирмена	Распределение с числом степеней свободы (N-2)	Статистическая значимость
Корреляция возраста и длины образцов в эпигастррии после нанесения разрезов, %	0,54	3,39	0,002
Корреляция возраста и ширины образцов в эпигастррии после нанесения разрезов, %	0,40	2,32	0,028
Корреляция возраста и площади образцов в эпигастррии после нанесения разрезов, %	0,57	3,63	0,001
Корреляция возраста и длины образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	0,70	5,12	0,00002
Корреляция возраста и ширины образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	0,38	2,15	0,040
Корреляция возраста и площади образцов в гипогастрии после нанесения разрезов, %	0,64	4,35	0,0002
Корреляция возраста и длины образцов в эпигастррии после отделения подкожного жира, %	0,56	3,58	0,001
Корреляция возраста и ширины образцов в эпигастррии после отделения подкожного жира, %	-0,17	-0,89	0,379
Корреляция возраста и площади образцов в эпигастррии после отделения подкожного жира, %	0,38	2,17	0,038
Корреляция возраста и длины образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	0,64	4,43	0,0001
Корреляция возраста и ширины образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	0,25	1,39	0,176
Корреляция возраста и площади образцов в гипогастрии после отделения подкожного жира, %	0,62	4,21	0,0002

Распределение по полу и возрасту в исследованных группах представлено в табл. 3, 4.

Длина образцов в эпигастррии после нанесения разрезов у мужчин оказалась 91,9%, у женщин – 100% (медианы),  $p = 0,02$ . Статистически значимой разности других показателей, в том числе площади, не выявлено.

Подавляющее большинство показателей за исключением ширины образцов после отделения кожи от подкожного жира коррелирует с возрастом. Из табл. 4 видно, что с увеличением возраста растет площадь кожи после сокращения, что свидетельствует о снижении сократительной способности.

Результаты испытания на растяжение представлены в табл. 5, 6.

Таблица 5

## Результаты испытания на растяжение кожи эпи- и гипогастральной областей

Параметры деформирования	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Межквартильный интервал
Напряжение кожи эпигастральной области в конце фазы I, МПа	0,2	0,2	0,0	0,7	0,1	0,3	0,2
Деформация кожи эпигастральной области в конце фазы I, %	14,1	12,6	2,7	55,6	6,9	17,3	10,4
Напряжение кожи эпигастральной области в конце фазы II, МПа	1,7	1,5	0,6	3,8	1,0	2,2	1,2
Деформация кожи эпигастральной области в конце фазы II, %	30,7	28,2	9,6	83,3	20,3	39,7	19,4
Предел прочности кожи эпигастральной области, МПа	19,6	18,9	9,6	38,1	12,9	25,0	12,1
Предельная деформация кожи эпигастральной области, %	118,6	111,1	65,2	201,9	82,2	138,9	56,7
Напряжение кожи гипогастральной области в конце фазы I, МПа	0,2	0,2	0,0	0,9	0,1	0,3	0,2
Деформация кожи гипогастральной области в конце фазы I, %	12,9	9,8	3,8	48,6	6,9	14,7	7,8
Напряжение кожи гипогастральной области в конце фазы II, МПа	1,3	1,3	0,4	3,1	0,9	1,5	0,6
Деформация кожи гипогастральной области в конце фазы II, %	25,3	22,0	8,7	62,5	17,7	28,7	10,9
Предел прочности кожи гипогастральной области, МПа	13,3	12,5	5,6	26,1	9,0	16,7	7,7
Предельная деформация кожи гипогастральной области, %	101,7	98,4	50,8	176,7	83,3	123,8	40,5
Модуль Юнга в конце фазы I в эпигастральной области, МПа	0,026	0,019	0,001	0,097	0,008	0,038	0,031
Модуль Юнга в конце фазы I в гипогастральной области, МПа	0,026	0,015	0,001	0,102	0,011	0,033	0,022
Модуль Юнга в конце фазы II в эпигастральной области, МПа	0,066	0,058	0,019	0,150	0,032	0,089	0,057
Модуль Юнга в конце фазы II в гипогастральной области, МПа	0,059	0,050	0,015	0,138	0,040	0,073	0,033
Модуль Юнга в момент максимального напряжения лоскутов кожи из эпигастральной области, МПа	0,182	0,151	0,091	0,446	0,111	0,242	0,131
Модуль Юнга в момент максимального напряжения лоскутов кожи из гипогастральной области, МПа	0,143	0,127	0,059	0,512	0,098	0,153	0,055

Таблица 6

**Результаты испытания на растяжение кожи эпи- и гипогастральной областей**

Параметры деформирования	Эпигастральная область, медиана	Гипогастральная область, медиана	Разность медиан	Статистическая значимость
Деформация в конце фазы I, %	12,6	9,8	22%	0,42
Напряжение в конце фазы I, МПа	0,225	0,199	12%	0,91
Модуль Юнга в конце фазы I, МПа	0,0188	0,0149	21%	0,67
Деформация в конце фазы II, %	28,2	22,0	22%	0,041
Напряжение в конце фазы II, МПа	1,54	1,28	17%	0,0017
Модуль Юнга в конце фазы II, МПа	0,0579	0,0498	14%	0,23
Предельная деформация, %	111	98	12%	0,02
Предельное напряжение, МПа	18,9	12,5	34%	0,00001
Модуль Юнга в момент максимального напряжения, МПа	0,151	0,127	16%	0,002

Таблица 7

**Распределение по полу и возрасту в группах с противоположными показателями степени эластичности кожи эпи- и гипогастральной областей**

Показатели		Деформация кожи эпигастральной области больше, чем кожи гипогастральной области	Деформация кожи гипогастральной области больше, чем кожи эпигастральной области
Пол	М	10	10
	Ж	5	5
Возраст, лет	Средний	58,1	53,2
	Медиана	58	52

Средняя деформация в конце участка I кривой «напряжение-натяжение» составила 12,6% в эпигастральной и 9,8% в гипогастральной области. Среднее напряжение кожи эпигастральной области в конце фазы I составило 0,225 МПа, гипогастральной области – 0,199 МПа, модуль Юнга – 0,0188 и 0,0149 МПа, соответственно. Статистически значимой разности изучаемых параметров не выявлено.

В 15 случаях в конце участка I деформация кожи эпигастральной области оказалась больше, чем кожи гипогастральной области, в 15 случаях – наоборот.

Распределение деформаций в конце участка I по полу и возрасту оказалось одинаковым в обеих группах (табл. 7). Разность в возрасте статистически не значима,  $p = 0,41$  (критерий Манна–Уитни).

Таким образом, не выявлено статистически значимых отличий упругости кожи эпи- и гипогастральной областей, обусловленной распрямлением только эластиновых волокон.



Таблица 8

## Сравнение результатов испытания на растяжение кожи по полу (критерий Манна–Уитни)

Параметры деформирования	Критерий Манна–Уитни	Z-значение	Статистическая значимость	Точная вероятность
Напряжение кожи эпигастральной области в конце фазы I, МПа	92	-0,35	0,72	0,75
Деформация кожи эпигастральной области в конце фазы I, %	94	0,26	0,79	0,81
Напряжение кожи эпигастральной области в конце фазы II, МПа	93	-0,31	0,76	0,78
Деформация кожи эпигастральной области в конце фазы II, %	94	0,26	0,79	0,81
Предел прочности кожи эпигастральной области, МПа	91	0,40	0,69	0,71
Предельная деформация кожи эпигастральной области, %	98	0,09	0,93	0,95
Напряжение кожи гипогастральной области в конце фазы I, МПа	95	-0,22	0,83	0,85
Деформация кожи гипогастральной области в конце I фазы, %	88	-0,53	0,60	0,62
Напряжение кожи гипогастральной области в конце фазы II, МПа	78	-0,97	0,33	0,35
Деформация кожи гипогастральной области в конце фазы II, %	96,5	-0,15	0,88	0,88
Предел прочности кожи гипогастральной области, МПа	77	1,01	0,31	0,33
Предельная деформация кожи гипогастральной области, %	93	0,31	0,76	0,78
Модуль Юнга в конце фазы I в эпигастральной области, МПа	93	-0,31	0,76	0,78
Модуль Юнга в конце фазы I в гипогастральной области, МПа	94	-0,26	0,79	0,81
Модуль Юнга в конце фазы II в эпигастральной области, МПа	100	0,00	1,00	1,02
Модуль Юнга в конце фазы II в гипогастральной области, МПа	94	-0,26	0,79	0,81
Модуль Юнга в момент максимального напряжения лоскутов кожи из эпигастральной области, МПа	89	0,48	0,63	0,65
Модуль Юнга в момент максимального напряжения лоскутов кожи из гипогастральной области, МПа	69	1,36	0,17	0,18

Таблица 9

**Корреляционный анализ результатов теста на растяжение кожи по возрасту**

Параметры деформирования	Ранговый коэффициент корреляции Спирмена	Распределение с числом степеней свободы ( $N-2$ )	Статистическая значимость
Корреляция возраста и деформации кожи эпигастральной области в конце фазы I, %	0,09	0,48	0,634
Корреляция возраста и напряжения кожи эпигастральной области в конце фазы II, МПа	0,22	1,19	0,245
Корреляция возраста и деформации кожи эпигастральной области в конце фазы II, %	0,05	0,29	0,773
Корреляция возраста и предела прочности кожи эпигастральной области, МПа	-0,01	-0,06	0,956
Корреляция возраста и предельной деформации кожи эпигастральной области, %	-0,46	-2,71	0,011
Корреляция возраста и напряжение кожи гипогастральной области в конце фазы I, МПа	-0,23	-1,28	0,211
Корреляция возраста и деформации кожи гипогастральной области в конце фазы I, %	0,13	0,72	0,479
Корреляция возраста и напряжения кожи гипогастральной области в конце фазы II, МПа	0,26	1,40	0,171
Корреляция возраста и деформации кожи гипогастральной области в конце фазы II, %	0,09	0,48	0,636
Корреляция возраста и предела прочности кожи гипогастральной области, МПа	-0,07	-0,39	0,701
Корреляция возраста и предельной деформации кожи гипогастральной области, %	-0,48	-2,87	0,008
Корреляция возраста и модуля Юнга в конце фазы I в эпигастральной области, МПа	-0,03	-0,17	0,866
Корреляция возраста и модуля Юнга в конце фазы I в гипогастральной области, МПа	-0,25	-1,34	0,190
Корреляция возраста и модуля Юнга в конце фазы II в эпигастральной области, МПа	0,12	0,63	0,536
Корреляция возраста и модуля Юнга в конце фазы II в гипогастральной области, МПа	0,05	0,25	0,802
Корреляция возраста и модуля Юнга в момент максимального напряжения лоскутов кожи из эпигастральной области, МПа	0,31	1,70	0,100
Корреляция возраста и модуля Юнга в момент максимального напряжения лоскутов кожи из гипогастральной области, МПа	0,16	0,87	0,390

Участок II кривой «напряжение–деформация» отражает процесс распрямления случайно расположенных коллагеновых волокон, которые начинают упорядочиваться в направлении действия силы. Средняя деформация в конце участка II образцов кожи из эпигастральной области оказалась больше, чем кожи из гипогастральной области на 22%,  $p = 0,041$ . В конце участка II среднее напряжение кожи эпигастральной области также выше, напряжения кожи гипогастральной области более чем на 17%,  $p = 0,0017$ . Средняя предельная деформация кожи в эпигастральной области выше деформации кожи гипогастральной области на 12%,  $p = 0,02$ .

Анализ предела упругости исследуемых образцов показал, что кожа эпигастральной области в среднем выдерживает более высокое напряжение, чем кожа гипогастральной области, на 34%,  $p = 0,00001$ . Модуль Юнга в момент максимального напряжения кожи в области эпигастрия оказался больше, чем в гипогастральном участке на 16%,  $p = 0,002$ .

Данные по результатам корреляционного анализа с полом и возрастом представлены в табл. 8, 9.

Имеет место отрицательная корреляция возраста и показателей предельной деформации кожи эпигастральной ( $p = 0,01$ ) и гипогастральной ( $p = 0,008$ ) области. Необходимо отметить, что в физиологических условиях кожа живота не испытывает подобных нагрузок.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты выполненного исследования показывают, что кожа характеризуется упругим сокращением преимущественно в направлении, параллельном ориентации коллагеновых волокон. Так, сокращение кожных образцов после нанесения разрезов и отделения от подкожного жира в среднем составило 5–6% по длине и 25% по ширине или 29–30% по площади. Эти данные не вполне соответствуют данным Лимберга о том, что свободно иссеченный лоскут кожи всей толщиной (в отличие от свободно иссеченного тонкого лоскута), а также лоскуты кожи с подкожной клетчаткой на одной или двух питающих ножках сокращаются не менее, чем на одну треть своих линейных размеров по ширине и длине [3]. Полученные результаты также отличаются от данных [16], согласно которым кожные образцы размером 1 дюйм<sup>2</sup> сокращались в среднем на 9% в направлении линий Лангера и на 5% перпендикулярно лангеровским линиям. По-видимому, это связано с формой лоскутов и требует дальнейшего изучения.

Установлена значительная вариация упругих свойств кожи в пределах зон анатомических областей при наличии анизотропии и выраженных вязкоупругих свойств, отмеченных, в частности, в [6], с чем связана сложность моделирования [13] и необходимость проведения дальнейших исследований в этом направлении. Для сканирования протяженных анатомических областей *in vivo* представляется эффективным метод динамической контактной диагностики вязкоупругих свойств материалов, ранее использованный авторами для биомеханического исследования мышц [1].

Удлинение образца кожи в конце фазы I кривой «растяжение–деформация» составило в эксперименте в среднем 13–14%, т.е. около 106% от длины разметки. Однако по мере растяжения образца по длине вследствие уменьшения его ширины в конце опыта на растяжение площадь образца была практически равна исходной. По данным [10], кожа физиологически испытывает малые нагрузки и основным нагружаемым компонентом является эластин кожи; при этом релаксации напряжения не происходит. Для уточнения вопроса о том, обеспечивается ли естественное натяжение кожи только эластиновыми волокнами либо эластиновыми и коллагеновыми в комплексе, необходимо проведение опытов по двухосному растяжению кожных образцов.

Выявлена отрицательная корреляция между площадью образцов в гипогастрии после нанесения разрезов и предельной деформацией кожи гипогастральной области (коэффициент  $R$  Спирмена – 0,38,  $p = 0,04$ ), т.е. чем лучше сокращалась кожа, тем меньше она растягивалась.

### Выводы

1. Биомеханические свойства кожи отличаются не только в пределах тела, но и внутри границ одной анатомической области, в настоящем исследовании – в эпи- и гипогастральной зонах области живота.
2. С возрастом снижается способность кожи к сокращению по площади и по длине, а также снижается предельная деформация.
3. Сокращение кожи оказалась больше в направлении линий Лангера, чем перпендикулярно им. Степень сокращения зависит, по-видимому, от формы и размера кожного лоскута, что требует дополнительного исследования.
4. Корреляции между показателями тестов на сократимость и растяжимость в области эластичной деформации не выявлено, что делает актуальным проведение эксперимента по биаксиальному нагружению кожных образцов.
5. Полученные результаты подтверждают, что человеческая кожа представляет собой неоднородный материал с выраженными анизотропными вязкоупругими свойствами. Для получения распределения вязкоупругих характеристик в пределах изучаемой анатомической области авторами планируется динамическая контактная диагностика кожного покрова.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфиногенов, С.Б. Механические и фрикционные свойства биоэластомеров. Часть 1: Описание релаксационных зависимостей кожи человека при растяжении / С.Б. Анфиногенов, М.Ф. Курек, С.В. Шилько, Д.А. Черноус // Российский журнал биомеханики. – 2008. – Т. 12, № 3. – С. 44–51.
2. Бегун, П.И. Моделирование в биомеханике / П.И. Бегун, П.Н. Афонин. – М.: Высшая школа, 2004. – 390 с.
3. Лимберг, А.А. Планирование местнопластических операций / А.А. Лимберг. – Л.: Медгиз, 1963. – 590 с.
4. Пейпл, А.Д. Пластическая и реконструктивная хирургия лица / А.Д. Пейпл. – М.: Бином, 2007. – 951 с.
5. Сомкин, П.Б. Обзор аппаратных методов исследования кожного покрова тела человека и его механических свойств / П.Б. Сомкин // Вестник СевКавГТУ, серия «Естественно-научная». – 2003. – Вып. 6. – С. 214–225.
6. Федоров, А.Е. О механических свойствах кожи человека / А.Е. Федоров, В.А. Самарцев, Т.А. Кириллова // Российский журнал биомеханики. – 2006. – Т. 10, № 2. – С. 29–42.
7. Шилько, С.В. Механика адаптивных композитов и биоматериалов / С.В. Шилько, Ю.М. Плещачевский // Материалы, технологии, инструмент. – 2003. – № 4. – С. 5–16.
8. Belkoff, S.M. Effects of subcutaneous expansion on the mechanical properties of porcine skin / S.M. Belkoff // J. of Surgical Research. – 1995. – Vol. 58, No. 2. – P. 117–123.
9. Hendriks, F.M. Mechanical behaviour of human skin in vivo: a literature review / F.M. Hendriks // [www.extra.research.philips.com/publ/rep/nl-ur/NL-UR2001-820.pdf](http://www.extra.research.philips.com/publ/rep/nl-ur/NL-UR2001-820.pdf), 2001.
10. Lim, K.H. Non-invasive prediction of skin flap shrinkage: a new concept based on animal experimental evidence / K.H. Lim // Journal of Biomechanics. – 2008. – Vol. 41, No. 8. – P. 1668–1674.
11. Lokshin, O. Viscoelasticity and preconditioning of the skin under uni-axial stretch: morphologically-based analysis / O. Lokshin, N. Liron, L. Lanir // Journal of Biomechanics. – 2006. – Vol. 39 (S1). – S. 394.
12. Malm, M. In vivo skin elasticity of 22 anatomical sites. The vertical gradient of skin extensibility and implications in gravitational aging / M. Malm, M. Samman, J. Serup // Skin Research and Technology. – 1995. – Vol. 1, No. 2. – P. 61–67.
13. Mukherjee, S. Finite element crash simulations of the human body: passive and active muscle modelling / S. Mukherjee // Sadhana. – 2007. – Vol. 32, No. 4. – P. 409–426.
14. Munoz, M.J. An experimental study of the mouse skin behaviour: damage and inelastic aspects / M.J. Munoz // Journal of Biomechanics. – 2008. – Vol. 41, No. 1. – P. 93–99.

15. *Pamplona, D.C.* Numerical and experimental analysis of the human scalp under expansion / D.C. Pamplona, C.R. Carvalho, H. Radwansk // Proceedings of the 5th World Congress of Biomechanics, Munich, July 29th–August 4th, 2006. – S. 393.
16. *Ridge, M.D.* The directional effects of skin / M.D. Ridge, V. Wright // Journal of Investigative Dermatology. – 1966. – Vol. 46, No. 4. – P. 341–346.
17. *Sasik, C.* Characterization of skin morphology and mechanical properties: variations across anatomical sites / C. Sasik // J. of the American Academy of Dermatology. – 2008. – Vol. 58, No. 2. – P. 28.

## **MECHANICAL AND FRICTIONAL PROPERTIES OF BIOELASTOMERS. PART 2: DIFFERENCES OF STRAIN CHARACTERISTICS OF THE SKIN IN EPI- AND HYPOGASTRIC ANATOMIC REGIONS**

**M.F. Kurek, S.V. Shilko, S.B. Anichkin, S.V. Afinogenov (Gomel, Belarus)**

A problem of a quantitative estimation of strain and strength characteristics of biological elastomers on an example of human skin has been considered. In particular, elastic characteristics of the skin taken from epi- and hypogastric regions of a stomach region for persons of a various sex and age have been determined. It has been established that elastic characteristics of the skin essentially change within the above regions that complicates their biomechanical study by carrying out of standard tests for a static tension. Possibility of correlation of an extensibility and contractility of the skin has been analyzed.

**Key words:** bioelastomers, skin, static tension, elasticity, heterogeneity, anisotropy.

*Получено 20 октября 2009*