

КОРРЕЛЯТЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖНОГО ПОКРОВА И ИХ ЗНАЧЕНИЕ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Гребенюк Л.А.¹, Грязных А.В.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, Курган, e-mail: lyudamusa@yahoo.com;

² ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск

Цель работы состояла в анализе особенностей пространственного распределения натяжений кожи конечностей как коррелятов перехода в деформированное состояние ткани в условиях воздействия дозированного растяжения с целью моделирования формы и размеров сегментов по методу Илизарова. Обследованы пациенты (n=19) с врожденным укорочением бедра, врожденной синдактилией пальцев кисти (n=10) и экспериментальные животные (n=6). Натяжение кожи оценивали косвенно посредством измерения скорости распространения акустических сдвиговых волн (СПАВ) в различных направлениях с использованием акустического анализатора кожи. В условиях пролонгированной продольной тракции (бедро, голень) происходило возрастание СПАВ в продольном и диагональном направлениях. Дистракция в поперечном направлении с целью запаса мягких тканей на кисти сопровождалась наибольшим приростом СПАВ в поперечной ориентации, т.е. параллельно тракционным воздействиям. В работе разработаны критерии, косвенно отражающие формирование напряженно-деформированного состояния кожи. Такими критериями являются: а) выраженный статистически значимый прирост СПАВ в растягиваемой коже; б) трансформация формы акустических полей в зависимости от направления вектора растяжения в условиях пролонгированной тракции. Выявлены различия конфигурации огибающих кривых в зависимости от направления вектора растяжения. Критериями ориентированного напряженно-деформированного состояния кожи являются изменение формы акустических полей, а также достоверное возрастание СПАВ относительно исходных значений. Установлено, что прирост СПАВ в коже межпальцевых промежутков кисти в 2,8–3 раза отражает натяжение кожного покрова, близкое к предельному. Это указывает на риск развития перерастяжения и нарушения микроциркуляции. В таких случаях во избежание необратимых осложнений необходимо вносить коррективы в тактику лечения.

Ключевые слова: кожа, пролонгированная тракция, удлинение конечности, метод Илизарова, анизотропия, деформация кожи, пределы растяжения.

CORRELATES OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE SKIN AND THEIR SIGNIFICANCE IN CLINICAL PRACTICE

Grebenyuk L.A.¹, Gryaznykh A.V.²

¹ FSB «National Ilizarov Medical Research Center for Traumatology & Orthopedics», MH of Russia, Kurgan, e-mail: lyudamusa@yahoo.com;

² FSBEI of HPE «Yugra State University», Khanty-Mansiysk

The aim of the work was to identify the features of the spatial distribution of tensions of the skin of the extremities as correlates of the stretching vector in order to simulate the shape and size of segments by the Ilizarov method. Patients with congenital shortening of the hip, congenital syndactyly of the fingers and experimental animals were examined. Skin tension was estimated indirectly by measuring the propagation velocity of acoustic shear waves (VASW) in different directions using an acoustic skin analyzer (developed in Moscow-Belgrade). With prolonged longitudinal traction (thigh, lower leg), a predominant increase in VASW occurred in the longitudinal and diagonal directions. Transverse traction for soft tissue storage was accompanied by the greatest gain in transverse orientation, i.e. parallel to traction influences. According to the results of three series of studies, such criteria are: a) a pronounced statistically significant increase in synthetic surfactants in the stretched skin; b) transformation of the shape of acoustic fields depending on the direction of the extension vector under conditions of prolonged traction. Differences in the configuration of the VASW envelope curves depending on the direction of the vector of extension were revealed. The criterion for the oriented stress-strain state of the skin was the shape of the acoustic fields, as well as a statistically significant increase in VASW relative to the initial values. It was found that the increase in VASW by 2.8 -3 times reflects the tension of the skin, close to the limit. This indicates the risk of overstretching and microcirculation disorders. In such cases, in order to avoid irreversible complications, it is necessary to correct the treatment tactics.

Keywords: skin, prolonged traction, limb lengthening, Ilizarov method, anisotropy, skin deformation, stretching limits.

В клинической практике состояние кожного покрова, как правило, оценивается визуально и пальпаторно. Обращается внимание на цвет, эластичность, наличие отека и трофических расстройств, подвижность и наличие спаянности с нижележащими тканями. Важнейшими свойствами кожного покрова являются биомеханические характеристики, отражающие ее упруго-эластические свойства и обеспечивающие надежную механическую защиту при воздействии различных факторов. Как *in vivo*, так и *in vitro* доказано, что указанные свойства определяются различными структурными элементами кожи [1]. Такими элементами являются эластиновые сети, сети коллагена и компоненты основного вещества покровной ткани.

Известно, что сдвиговые волны весьма чувствительны к структурной организации той среды, в которой они распространяются. Кожному покрову, как и многим биологическим тканям, свойственна анизотропия. Ортопедическая патология, травмы конечностей, старение приводят к определенным изменениям микроархитектуры и физических и биохимических параметров кожи [2, 3, 4]. По мнению Laiasona D. et al. (2019), в настоящее время существуют лишь приблизительные оценки направления натяжения кожи, поскольку, как отмечают авторы, отсутствует общепризнанная система быстрого и неинвазивного определения пространственного характера натяжений кожи [5].

Цель работы состояла в изучении механо-акустических свойств кожи и выявлении особенностей пространственного распределения натяжений в кожном покрове конечностей как коррелятов вектора растяжения в условиях моделирования формы и размеров сегментов по методу Илизарова.

Материалы и методы исследования

Методика исследования акустическосоимметрии кожи основана на определении скорости распространения поверхностной сдвиговой волны (СПАВ) с помощью анализатора кожи (acoustical skin analyzer – ASA-4, разработки Москва, Белград) [3]. Диапазон измеряемых параметров – 15–300 м/с, относительная погрешность – 10%, площадь рабочей зоны при проведении замеров – 8 мм². В процессе исследования датчик устройства прижимается к коже усилием 1,5–2,5 Н. Значения скоростей СПАВ являются векторными, это позволяет графически изображать поле анизотропии исследуемого участка в виде некоторой замкнутой линии – огибающей кривой («акустических полей») в соответствии с декартовой системой координат. Тестирование проводили продольно, поперечно (90°) и диагонально относительно продольной анатомической оси конечности.

В настоящем исследовании тестирование кожи проводилось в двух группах

пациентов с ортопедической патологией и в группе экспериментальных животных (взрослые беспородные собаки). Обследованы 19 пациентов 17–23 лет с врожденным укорочением бедра (группа 1), которым с целью уравнивания анатомических размеров конечности бедро удлиняли по методу Илизарова на 4–7 см. Тестирование проводили в положении лежа. Во вторую группу вошли пациенты (n=10) с врожденной синдактилией пальцев кисти (группа 2), им осуществлялась дистракция с целью создания запаса мягких тканей на кисти. При завершении фиксации в мини-аппарате Илизарова выполнялась пластика. В третьей группе (группа 3) тестировали кожу голени экспериментальных животных (взрослые беспородные собаки, n=6), которым после закрытой флексионной остеоклазии большеберцовой кости в средней трети диафиза осуществляли удлинение голени в течение 28–35 дней. Темп дистракции составлял 1 мм в сутки. Абсолютная величина удлинения составила 27–35 мм, относительная – от 12,7% до 20,2%.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Анализ динамики параметров СПАВ кожи удлиняемого бедра в группе I обследованных выявил их максимальный прирост на втором месяце дистракции: в продольном направлении C(z) – на 53,1% (P<0,001), в диагональных ориентациях C(45) и C(135) – на 45,4% (P<0,01) и 46,8 % (P<0,01) соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Динамика показателя СПАВ в коже удлиняемого бедра в различные периоды лечения пациентов I группы, M±m (м/с)

Период лечения	Ангулярное направление относительно продольной оси конечности			
	C(X) (поперечное)	C(Z) (продольное)	C(45) (диагональное 45 град.)	C(135) (диагональное 135 град.)
До опер. (n=19)	54,9±3,3	63,1±3,8	62,5 ±3,7	58,6±2,9
Дистр. (30 дн.)	65,7±3,5*	82,0±2,2**	81,9±2,8**	73,5±3,8**
Дистр. (60 дн.)	67,8 ±4,9**	96,6±5,4***	90,9±5,4**	86,0±5,7**
Фиксация	69,9 ±3,2**	87,6±4,7**	76,7±4,2*	77,9±3,9**
После лечения (1 год)	56,4±3,4	60,5±2,9	62,3±2,5	60,1±2,9
После лечения (>1 года)	58,5±3,3	64,6±3,4	62,5±3,2	64,7±3,6

Примечание: достоверность различий (t-критерий Стьюдента): ***– P<0,001; **– достоверность различий P<0,01; * – достоверность различий P<0,05. M ± m – среднее значение ± стандартная ошибка.

Как вытекает из таблицы 1, показатель СПАВ возрастал преимущественно в продольном и диагональном направлениях, но в наибольшей степени – в продольной

ориентации, т.е. параллельно вектору растягивающих усилий. В последующем, в ближайшие сроки после снятия аппарата Илизарова прослеживалось восстановление механо-акустического состояния кожного покрова удлиненного бедра. Уже к 1 году после завершения лечения характеристики СПАВ статистически не отличались от исходных значений. В продольном направлении параметр СПАВ составлял $60,5 \pm 2,9$ м/с. Конфигурация акустического поля была округлой, т.е. степень неоднородности исследуемых свойств кожи была низкой.

2. Механо-акустическое состояние кожи кисти во II группе пациентов с синдактилией с пролонгированной поперечной тракцией.

При анализе полученных результатов акустического тестирования было обнаружено, что параметр СПАВ в коже по мере растяжения мягких тканей возрастал во всех направлениях (рис. 1А, Б). Однако в большей степени СПАВ увеличивалась параллельно направлению тракционных усилий, т.е. поперечно, и достигала максимума к концу distraction – $218,4 \pm 10,3$ м/с, возростала на 178,3% ($P < 0,001$) (рис. 1Б). Это значение превысило исходные величины в 2,78 раза, а показатель СПАВ в продольном направлении возрастал лишь в 1,32 раза. Кожный покров ладонной поверхности кисти по сравнению с другими сегментами обладает более низкой эластичностью [6, 7]. Важным в лечении мягкотканых синдактилией является равномерное приложение distractionных усилий на всем протяжении синдактилированного участка кисти [8, 9].

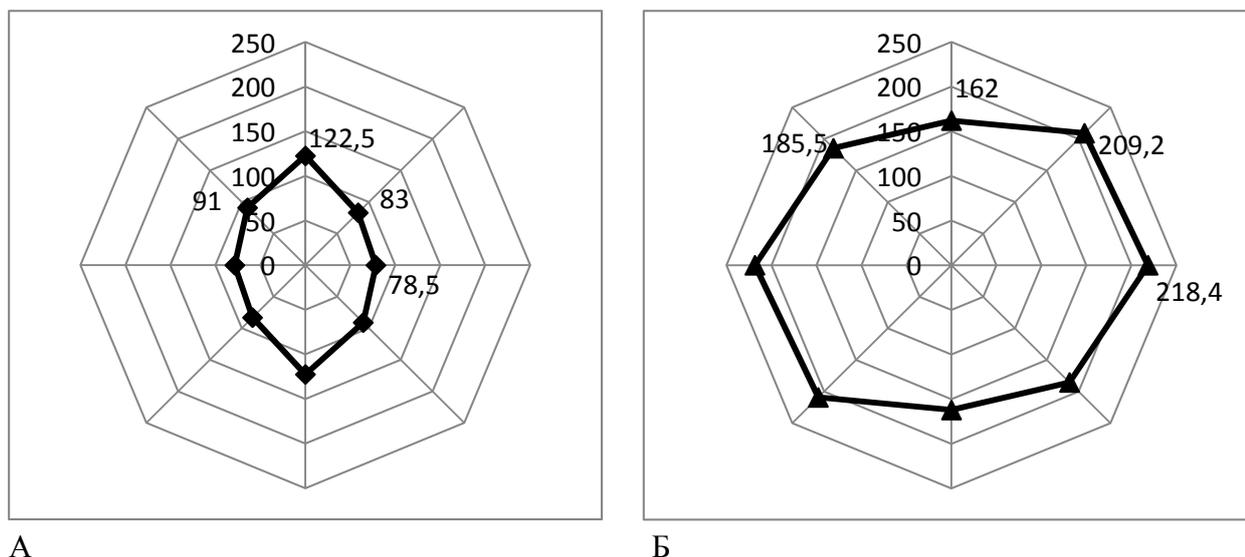


Рис. 1. Форма огибающих кривых СПАВ в коже межпальцевых промежутков кисти у больных ($n=10$) с врожденной синдактилией: 1А – до начала distraction; 1Б – при завершении distraction, осуществляемой в поперечном направлении

Выраженный прирост СПАВ в указанной группе четко отражает переход кожи в ориентированное напряженно-деформированное состояние при создании запаса мягких тканей межпальцевых промежутков кисти и указывает на необходимость его объективного контроля и своевременного выявления чрезмерного растяжения тканей для предупреждения перерастяжения и нарушения микроциркуляции. Растяжение кожи успешно используется для восстановления дефектов кожи в пластической хирургии, онкологии, при открытых травмах и лежит в основе одного из принципов оптимизации оперативного лечения в клинике и у экспериментальных животных [10-12].

На основе замеров показателей СПАВ, клинических наблюдений за состоянием растягиваемых тканей (отсутствие трофических нарушений) и субъективных болевых ощущений пациента установлено, что при возрастании значений СПАВ в 2,8–3 раза в любом из указанных направлений соответствующего межпальцевого промежутка целесообразно прекратить distraction во избежание необратимых осложнений.

3. Реакция кожи удлиняемой голени на distraction у экспериментальных животных.

Анализ результатов тестирования кожи удлиняемой голени в эксперименте показал, что параметр СПАВ неуклонно возрастал во всех тестированных направлениях (рис. 2–4).

Наименьшие значения СПАВ в коже удлиняемой голени у животных до наложения аппарата Илизарова с целью оперативного удлинения наблюдали при поперечной ориентации датчика акустического анализатора – $53,3 \pm 3,9$ м/с (рис. 2). Величина этого показателя в продольном и диагональном (45°) направлении была выше – $63,5 \pm 4,0$ и $68,8 \pm 2,9$ м/с. Поэтому построенная огибающая кривая векторов скоростей в декартовой системе координат имела форму вытянутого вдоль диагональной оси эллипса. В результате проводимой distraction кожа удлиняемой голени растягивалась и акустическое поле приобретало форму вытянутого продольно эллипса, происходил переход ткани в напряженно-деформированное состояние (рис. 3). Одним из возможных механизмов наблюдаемых изменений в характере механо-биологических свойств кожи являются пространственная перестройка коллагеновой сети и переориентация в направлении, совпадающем с вектором растяжения. Ряд авторов отмечают, что при растяжении кожи активизируются процессы пролиферации в кровеносных сосудах в ткани [13] и митотической активности клеток базального слоя эпидермиса [14].

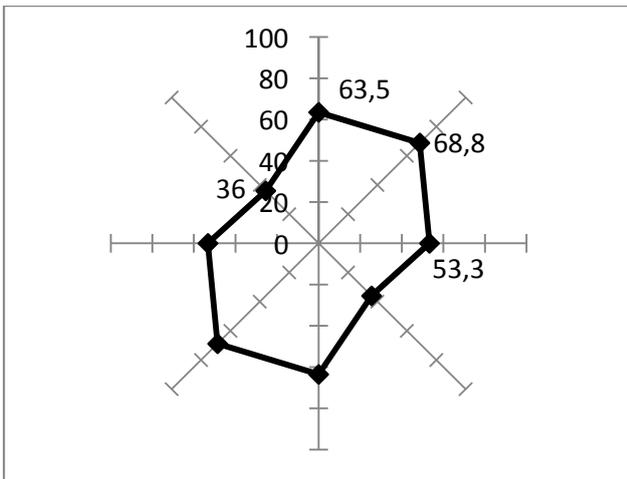


Рис. 2. Диагонально вытянутая форма огибающих кривых векторов СПАВ в коже правой голени до наложения аппарата

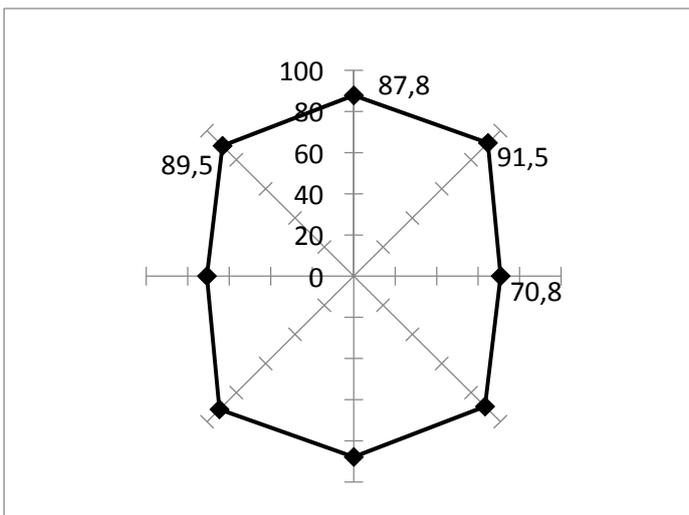


Рис. 3. Трансформация конфигурации акустического поля в продольно вытянутый эллипс в коже удлиняемой голени в эксперименте. Период distraction 8 дней

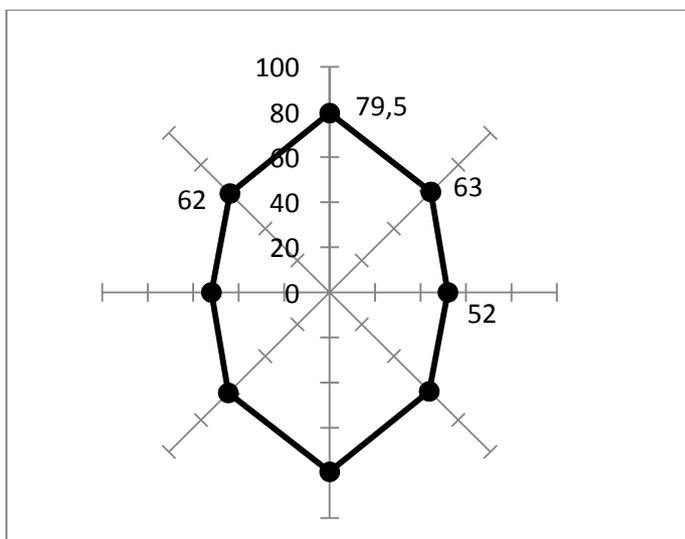


Рис. 4. Сохранение эллипсовидной формы акустического поля в коже удлинненной голени в эксперименте через 30 дней после снятия аппарата Илизарова. Эллиптическая фигура вытянута параллельно дистракционным усилиям

В клинической практике в целях уравнивания длины конечностей по мере естественного роста пациентов в большинстве случаев прирост удлинения превышает указанные значения, достигнутые в описанной серии у экспериментальных животных.

После удлинения сегментов по методу Илизарова происходит переориентация коллагеновой сети дермы, о чем свидетельствует изменение формы акустических полей (рис. 3, 4).

Заключение

В настоящем исследовании прослежена реакция кожного покрова в ответ на прилагаемые строго дозированно дистракционные усилия. Кожа растягивается в соответствии с вектором растяжения. Поскольку дистракция осуществляется пролонгированно (от 20 дней до 45–60 дней), в ткани активизируются также процессы регенерации ее различных структурных элементов.

Если в начальный период дистракции преобладают процессы щадящего постепенного растяжения ткани, то к 10-му дню и в последующем в результате индукции процессов регенерации реактивные изменения включают и растяжение кожи, и активизацию митотических процессов, и формирование новых микрососудов (эффект Илизарова).

Анализ полученных результатов показал, что при завершении дистракции СПАВ в коже удлиняемых сегментов (бедря или голени) или оперированной кисти при синдактилии достигает максимальных значений. Причем в наибольшей степени прирост параметра

происходит параллельно растягивающим усилиям. Однако имеются различия в направлении ориентации напряженно-деформированного состояния растянутого кожного покрова. Как было отмечено выше, для бедра максимальный прирост СПАВ выявляется при тестировании в продольной ориентации, в то время как при создании запаса мягких тканей межпальцевых промежутков на кисти – в поперечном.

В клинической практике при проведении пластических операций с целью замещения обширных дефектов мягких тканей в травматологии и онкологии важно получать объективную информацию о направлении линий натяжения в коже. От этого зависит оптимальное планирование хода операции, а в дальнейшем – исход лечения, так как в противном случае остается высоким риск развития обезображивающих рубцовых перерождений в ткани с нарушением функции сегмента. Особенно это актуально для кисти и стопы, что связано с необходимостью сохранения функции опороспособности стопы или восстановлением функциональных возможностей кисти при выполнении моторики пальцев.

Решение этой проблемы состоит в разработке новых современных диагностических методов. Так, ряд авторов предложили определять линии натяжения кожи методом смещения точечных маркеров [15]. Находит свое применение также другой методический подход – исследование в режиме online характера натяжений в коже [9].

В целом разработанные в настоящей работе критерии, основанные на результатах трех серий исследований и состоящие в: а) выраженном статистически значимом приросте СПАВ относительно исходных параметров, а также б) трансформации формы акустических полей в зависимости от направления вектора растяжения в условиях пролонгированной тракции, свидетельствуют о переходе кожи в ориентированное напряженно-деформированное состояние. Установлены различия в характере ориентации напряженно-деформированного состояния кожи: продольно ориентированное состояние кожи при удлинении бедра у пациентов и голени в эксперименте и поперечно вытянутая форма акустических полей при поперечной тракции с целью создания запаса мягких тканей при синдактилии. Особенностью distraction кожи на кисти является тот факт, что с учетом анатомии сегмента при возрастании значений СПАВ в 2,8–3 раза в любом из указанных направлений в коже межпальцевых промежутков целесообразно приостановить distraction во избежание развития необратимых осложнений.

Указанные критерии являются объективными и в клинической практике целесообразно их использование, поскольку существуют пределы растяжения покровной ткани, превышение которых влечет за собой развитие микротравматизации (*striae*) ткани, признаков ишемии и необратимого снижения ее упруго-эластических свойств, что важно при повторных этапах оперативного моделирования размеров конечностей в процессе

Список литературы

1. Шевцов В.И., Гребенюк Л.А., Щуров В.А. Структурные основы биомеханических свойств кожи при растяжении // Успехи физиологических наук. 2003. Т. 34. № 3. С. 78-88.
2. Wong R., Geyer S., Weninger W., Guimberteau J.C., Wong JK. The dynamic anatomy and patterning of skin. *Exp Dermatol*. 2016. V. 25(2). P. 92-98. DOI: 10.1111/exd.12832.
3. Багрянцев М.В., Павленко И.В., Щелчкова Н.А., Миронов А.А., Рябков М.Г., Бесчастнов В.В. К вопросу о влиянии дозированного тканевого растяжения на концентрацию гипоксией-индуцибельного фактора (HIF-1 α) в дистрагируемом лоскуте // Вестник экспериментальной и клинической хирургии. 2017. Т. 10. №4. С. 283-287. DOI: 10.18499/2070-478X-2017-10-4-283-287.
4. Maiti R., Mech J. In vivo measurement of skin surface strain and sub-surface layer deformation induced by natural tissue stretching. *Behav Biomed Mater*. 2016. V. 62. P. 556-569.
5. Laiacona D., Cohen J.M., Coulon K., Lipsky Z.W., Maiorana C., Boltyanskiy R., Dufresne E.R., German G.K. Non-invasive in vivo quantification of human skin tension lines. *Acta Biomater*. 2019. V. 88. P. 141-148. DOI: 10.1016/j.actbio.2019.02.003.
6. Гребенюк Л.А. Информативность акустических методов исследования покровных тканей и акустическая анизотропия кожи конечностей здорового человека // Гений ортопедии. 2000. № 1. С. 31-35.
7. Cluett J. Five Risks of Dupuytren's Contracture Treatment <https://www.verywellhealth.com/risks-of-dupuytren-s-contracture-treatment-4125888>.
8. Знаменская М.Г., Чикорина Н.К., Гребенюк Л.А., Исмаилов Г.Р. Лечение синдактилии кисти у детей по Илизарову (клиника, биомеханика, морфология) // Гений ортопедии. 1999. № 4. С. 448.
9. Grebenyuk L.A., Grebenyuk E.B. Express diagnosis of mechano-biological limb skin condition during prolonged dosed stretching in orthopedics *Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics*. London, 2016. С. 241-251.
10. Tsioli V, Papazoglou LG, Papaioannou N, Psalla D, Savvas I, Pavlidis L, Karayannopoulou M. Comparison of three skin-stretching devices for closing skin defects on the limbs of dogs. *J. Vet. Sci*. 2015. V.16(1). P. 99-106. DOI:10.4142/jvs.2015.16.1.99.
11. Miyazaki Y., Aikawa T., Shimatsu T., Nishimura M., Sadahiro S. Use of skin stretchers for single-stage bilateral mastectomies in a dog and a cat. *Vet Surg*. 2018. V. 47(3). P. 454-458. DOI: 10.1111/vsu.12748.

12. Razzak M.A., Hossain M.S., Radzi Z.B., Yahya N.A., Czernuszka J., Rahman M.T. Cellular and Molecular Responses to Mechanical Expansion of Tissue. *Front Physiol.* 2016. V. 7. P. 540. DOI: 10.3389/fphys.2016.00540.
13. Xiao Liang, Xiaolu Huang, Yiwen Zhou, Rui Jin, Qingfeng Li. Mechanical stretching promotes skin tissue regeneration via enhancing mesenchymal stem cell homing and transdifferentiation. *Stem Cells Transl. Med.* 2016. V. 5(7). P. 960-969. DOI: 10.5966/sctm.2015-0274.
14. Pamplona D.C., Velloso R.Q., Radwanski H.N. On skin expansion. *J. Mech. Behav. Biomed Mater.* 2014. V. 29. P. 655-662. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.03.023.
15. Seo H., Kim S-J., Cordier F., Choi J., Hong K. Estimating dynamic skin tension lines in vivo using 3D scans. *Computer-Aided Design.* 2013. V. 45, Is. 2. P. 551-555. DOI: 10.1016/j.cad.2012.10.044Corpus ID: 17447742.