

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ С ПРИЛЕЖАЮЩИМИ ТКАНЯМИ****С.И. Бархатова**

umanskaya.svetlana96@mail.ru

SPIN-код: 9739-5943

Н.В. Беликов

aneox@list.ru

SPIN-код: 6876-9521

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

При проведении лапароскопической простатэктомии существует риск повреждения сосудов и нервов, что может оказать негативное влияние на важнейшие функции мочеполовой системы, поэтому проектируемые системы для малоинвазивной хирургии должны быть апробированы на физических моделях. В данной работе рассмотрены материалы, которые могут быть использованы для физического моделирования предстательной железы и окружающих ее тканей. Для некоторых из них экспериментально определены модуль Юнга, максимальное относительное удлинение при растяжении и предел прочности на разрыв. Исследовано влияние амплитуды колебаний ультразвукового инструмента на скорость разрушения биологической ткани.

Ключевые слова

Физическая модель, жировая ткань, предстательная железа, одноосное растяжение, модуль Юнга, предел прочности, ультразвуковой инструмент, лапароскопическая простатэктомия

Поступила в редакцию 27.09.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Селективность ультразвукового воздействия позволяет проводить вычленение предстательной железы без травматизации жизненно важных органов и тканей. Поскольку волновод совершает продольные колебания, попеременно сжимая и растягивая ткань в области контакта, приоритетным параметром при выборе материала является модуль Юнга на растяжение.

К тканям, расположенным вокруг предстательной железы и контактирующим с ультразвуковым инструментом во время проведения оперативного вмешательства, относятся жировая, сосудистая, нервная и фасциальная.

Для обработки предстательной железы необходимо удалить жировую ткань, не затрагивая при этом остальные анатомические структуры. Повреждение сосудов приводит к сильным кровотечениям во время проведения оперативного вмешательства, что снижает обзор рабочей области хирурга, повреждение нервов — к нарушениям функций мочеполовой системы.

Рассмотренные в [1–23] механические характеристики тканей, окружающих предстательную железу, и самой простаты усреднены и представлены в табл. 1. Отсутствующие в литературе значения предела прочности при растяжении и максимального относительного удлинения предстательной железы заменены на соответствующие значения для почки ($\sigma = 4,43 \pm 0,29$ МПа, $\epsilon = 49,0 \pm 2,8$ %).

Механические свойства тканей предстательной железы

Биологическая ткань	Модуль Юнга, МПа	Предел прочности, МПа	Максимальное относительное удлинение, %
Жировая ткань	$(20,78 \pm 3,84) \cdot 10^{-3}$	$(11,34 \pm 4,60) \cdot 10^{-3}$	$123,67 \pm 42,77$
Стенка артерий	$1,50 \pm 0,77$	0,50	$78,00 \pm 25,45$
Стенка вен	0,86	7,85	89,00
Эндопельвикальная фасция	2,22	13,73	16,00
Нервная ткань	18,50	$12,90 \pm 0,01$	$18,80 \pm 0,50$
Предстательная железа в норме	$(62,50 \pm 7,50) \cdot 10^{-3}$	$4,43 \pm 0,29$	$49,00 \pm 2,80$
Предстательная железа при доброкачественной гиперплазии	$(93,30 \pm 1,10) \cdot 10^{-3}$		

В расчете модуля Юнга при заданном модуле сдвига, полученном методом эластографии, использовалось соотношение из [24]:

$$E = 3\mu,$$

где E — модуль Юнга на растяжение; μ — модуль сдвига.

Среди тканезамещающих материалов были рассмотрены: желатин, силикон, поливинилацетат, альгинатные смеси, когезивный гель, свиная жировая ткань.

Желатин. Согласно [25], для замещения жировой ткани концентрация желатиновых материалов выбрана равной 10 %, для предстательной железы — 25 %. Однако при создании фантома образцы из желатина разрушались при температуре 20...30 °С, еще до приложения ультразвукового воздействия. Следовательно, данный материал не подходит для создания физических моделей тканей и органов.

Когезивный гель. Когезивный гель в виде желеобразной массы обладает естественной упругостью и используется в грудных имплантатах. Однако продажа этого геля ограничена, а готовые грудные имплантаты имеют высокую цену, поэтому когезивный гель не будет использован при создании физической модели предстательной железы.

Клей. Механические свойства испытанных на растяжение образцов из поливинилацетата (ПВА), ПВА, сшитого тетраборатом натрия, а также резинового клея представлены в табл. 2.

Клеи не будут использованы в физической модели предстательной железы в связи с низким значением модуля Юнга, не соответствующим ни одной из рассматриваемых тканей.

Свиная жировая ткань. Исследованные на растяжение образцы свиной жировой ткани имеют модуль Юнга $243,5 \pm 83,44$ кПа, не соответствующий жировой ткани предстательной железы. Максимальная скорость разрушения биоткани, по предварительным исследованиям, достигается при максимальной амплитуде колебаний волновода. При амплитуде 48 мкм потеря массы образца при ультразвуковом воздействии длительностью 60 с составила 1,2 г.

**Экспериментальные значения для клеев, полученные в результате испытания
на растяжение**

Материал	Модуль Юнга, МПа		Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация, отн. ед.
	при малых деформациях	при больших деформациях		
Резиновый клей	$0,18 \pm 0,40$	$(1,80 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$0,34 \pm 0,02$	$6,75 \pm 0,12$
ПВА	$0,42 \pm 0,05$	$(59,80 \pm 2,15) \cdot 10^{-3}$	$0,40 \pm 0,07$	$4,04 \pm 0,05$
ПВА, сшитый тет-раборатом натрия	$0,64 \pm 0,03$		$0,51 \pm 0,30$	$0,81 \pm 0,34$

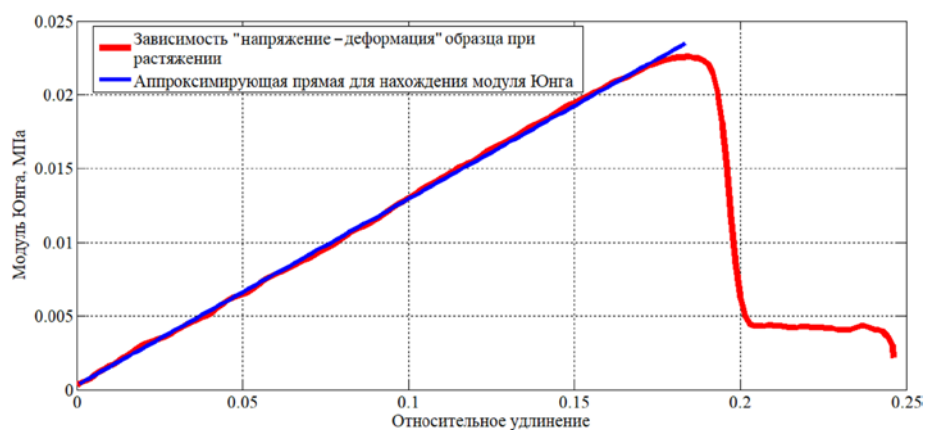
Силикон. Исследованы силиконы с твердостью 10 (ToolDecor T20), 15 (Alcorsil 315, ToolDecor 15), 20 (Силифлекс 20), 35...45 (Силагерм 7140), 55...65 (Силагерм 5065) и 70...75 (Силагерм 6070П) по шкале Шора А, а также силикон ToolDecor T20 с добавкой SiliconThinner, понижающей вязкость и твердость силиконового материала на оловянной и платиновой основе.

Для каждого материала испытано на одноосное растяжение [26] по 8 образцов в форме двусторонней лопатки рекомендуемой производителем концентрации, поскольку зависимость между концентрацией отвердителя и модулем Юнга для силиконов отсутствует [25].

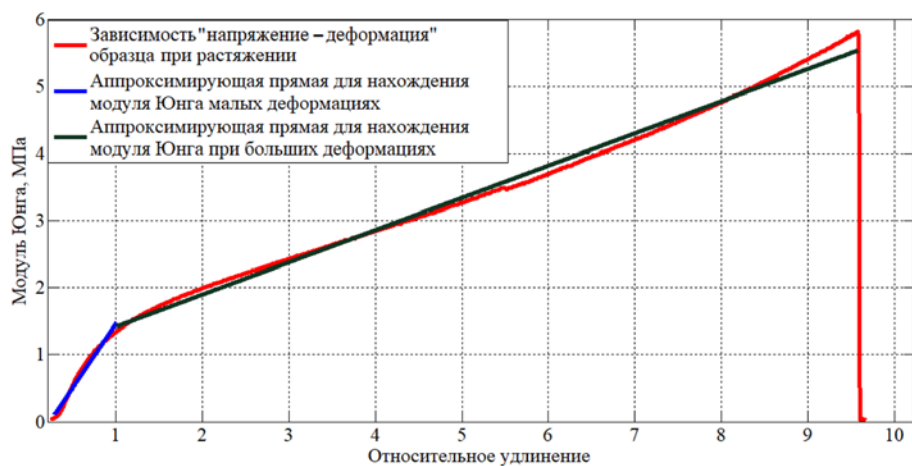
Готовая альгинатная смесь. Проведено исследование на одноосное растяжение образцов из готовой альгинатной смеси, модуль Юнга составил 217 ± 39 кПа, предел прочности $114,75 \pm 31,22$ МПа, максимальное удлинение при разрыве $0,640 \pm 0,096$ %.

Альгинатная масса. Альгинат натрия замешивали с водой в пропорции от 1 : 2 до 1 : 10. Получить смесь альгината натрия с водой, взятую в соотношении 1 : 1, невозможно из-за недостаточного количества воды, в соотношении более чем 1 : 10 — из-за избытка воды и невозможности придания требуемой формы полученной желеобразной массе. Альгинат натрия получают из водорослей, следовательно, он имеет ограниченный срок эксплуатации при сохранении указанных механических свойств. Наличие воды в альгинатной массе приводит к высыханию материала. Максимально допустимый срок хранения на воздухе составил около 4 ч.

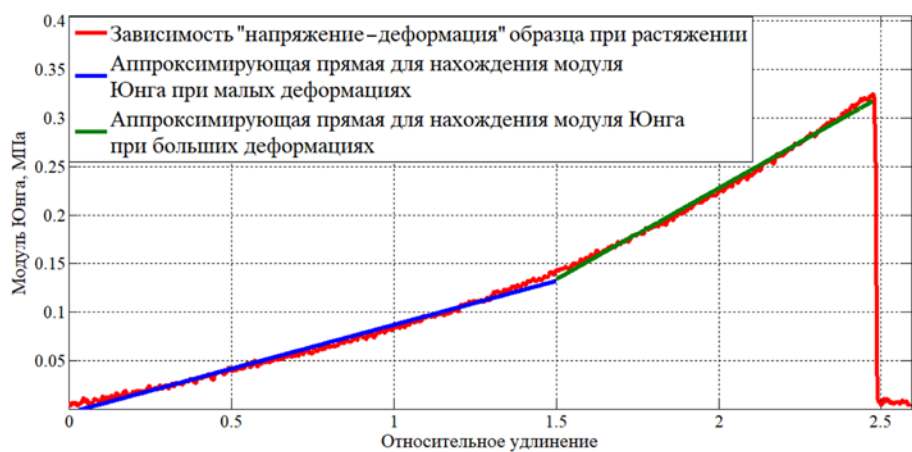
Результаты. При обработке экспериментальных данных определяли единственное значение модуля Юнга при наличии одного линейного участка на кривой «напряжение – деформация» (рис. 1, а), при наличии двух линейных участков — значения модуля Юнга при малых и при больших деформациях (рис. 1, б, в). У материалов Силагерм 7140, Силагерм 5065, Alcorsil 315, резиновый клей «Момент», ToolDecor T20 137, ToolDecor T20 137 + Silicon Thinner модуль Юнга при малых деформациях выше, чем при больших (см. рис. 1, в), у материалов Силагерм 6070П, ПВА, свиной жир — ниже (рис. 2), у материалов ПВА + тетраборат натрия, готовая альгинатная масса нет различий в модуле Юнга при малых и больших деформациях (см. рис. 2).



а



б



в

Рис. 1. Определение модуля Юнга по кривой «напряжение – деформация»:

а — при наличии одного линейного участка определяется единственное значение модуля Юнга;
 б, в — при наличии двух линейных участков определяется два значения модуля Юнга (при малых и больших деформациях)

На рис. 2–4 объединены результаты всех испытаний на одноосное растяжение.

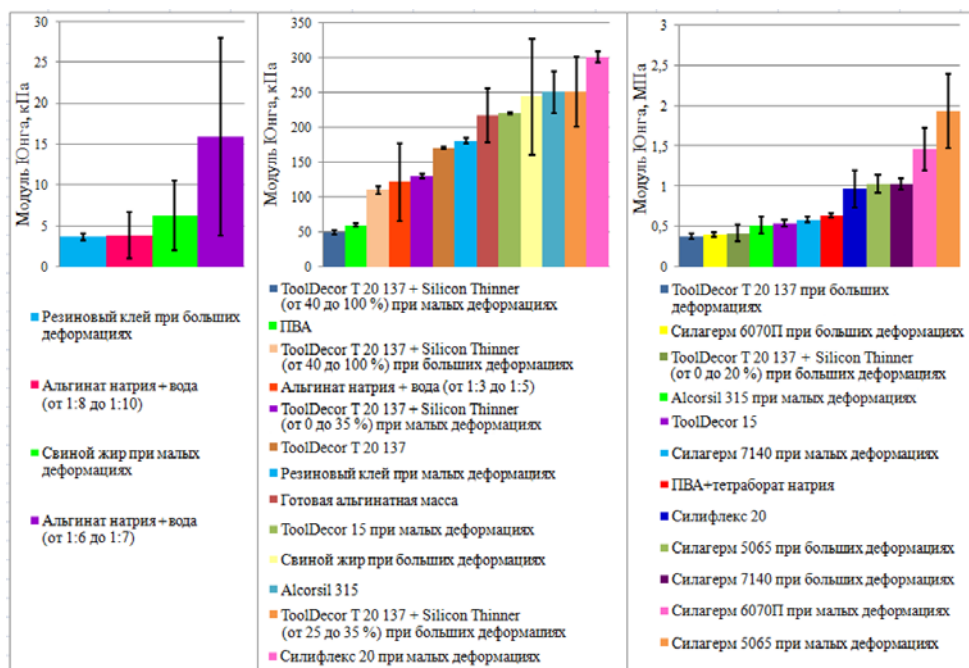


Рис. 2. Модуль Юнга исследуемых на одноосное растяжение материалов

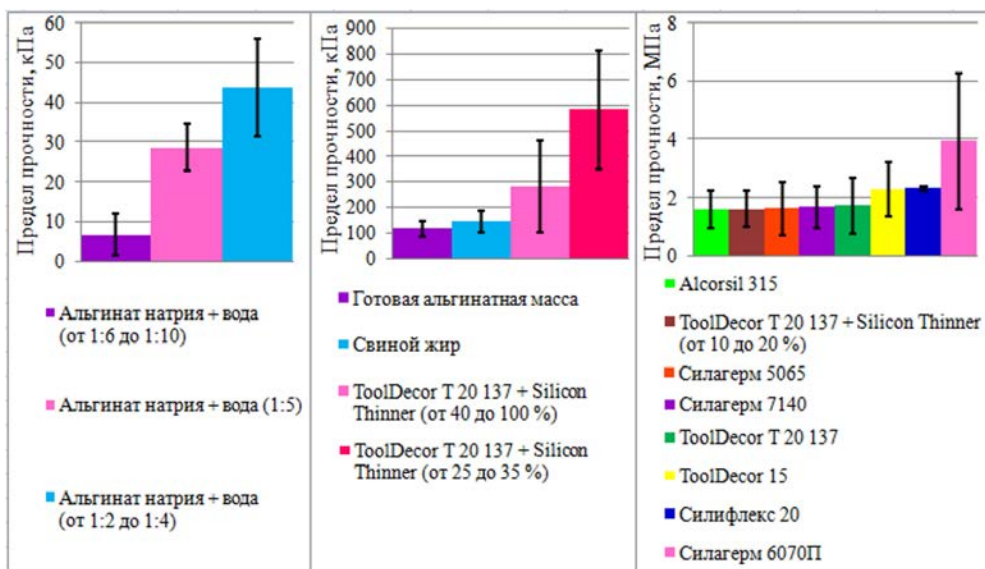


Рис. 3. Предел прочности исследуемых на одноосное растяжение материалов

На основе полученных данных подобраны материалы для физической модели предстательной железы (табл. 3). Основным критерием при выборе тканезаменяющего материала всех тканей, кроме жировой, является модуль Юнга, для жировой ткани — предел прочности.

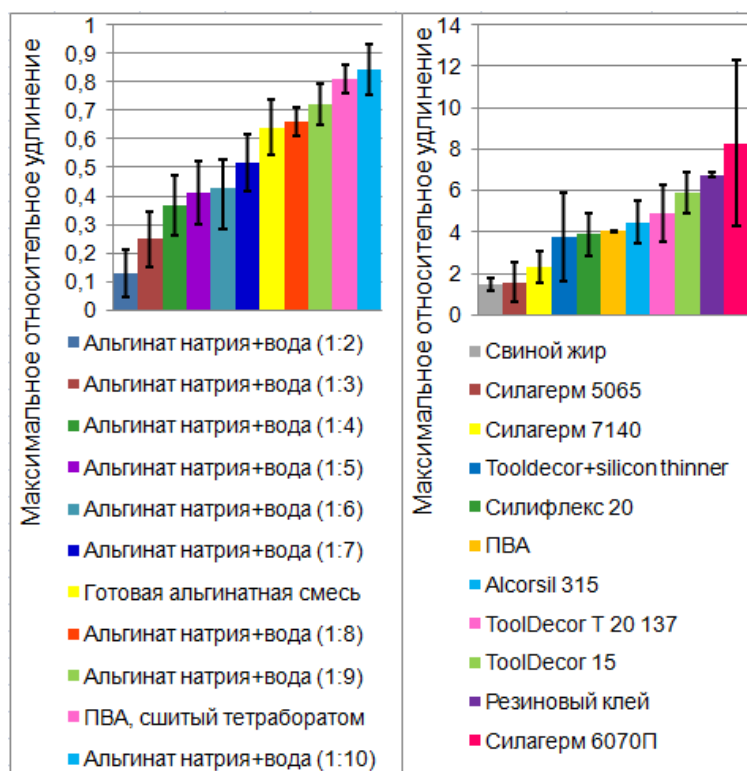


Рис. 4. Максимальное относительное удлинение исследуемых на одноосное растяжение материалов

Таблица 3

Механические свойства материалов физической модели предстательной железы

Биологическая ткань	Подобранный материал			
	Название	Модуль Юнга, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Максимальное относительное удлинение, отн.ед.
Жировая ткань	Альгинат натрия + вода (1 : 7)	$(20,72 \pm 7,31) \cdot 10^{-3}$	$(8,53 \pm 3,31) \cdot 10^{-3}$	$0,42 \pm 0,15$
Фасция	Силагерм 5065	$1,94 \pm 0,46$	$1,61 \pm 0,91$	$1,56 \pm 0,98$
ПЖ	ToolDecor T20 137 + Silicon Thinner (55 %)	$0,11 \pm 0,06$	$0,28 \pm 0,18$	$3,74 \pm 2,16$
Сосудистая ткань	Стенка вен	Силагерм 6070П	$1,46 \pm 0,27$	$3,94 \pm 2,35$
	Стенка артерий	Силагерм 5065	$1,03 \pm 0,11$	$1,61 \pm 0,91$
Нервная ткань	Силагерм 5065	$1,94 \pm 0,46$	$1,61 \pm 0,91$	$1,56 \pm 0,98$

Заключение. По результатам исследования перечисленных в работе материалов подобраны наиболее подходящие по механическим свойствам для создания физической модели предстательной железы с прилежащими тканями. Модель необходима при апробации инструментов и аппаратов, проектируемых для урологических операций на предстательной железе, в связи со сложностью проведения испытаний непосредственно на самом биообъекте.

Литература

- [1] Comley K., Fleck N.A. A micromechanical model for the Young's modulus of adipose tissue. *Int. J. Solids Struct.*, 2010, vol. 47, no. 21, pp. 2982–2990. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.07.001 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768310002465>
- [2] Phipps S., Yang T.H., Habib F.K., et al. Measurement of the mechanical characteristics of benign prostatic tissue: a novel method for assessing benign prostatic disease. *Urology*, 2005, vol. 65, no. 5, pp. 1024–1028. DOI: 10.1016/j.urology.2004.12.022 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090429504014827>
- [3] Krouskop T.A., Wheeler T.M., Kallel F., et al. Elastic moduli of breast and prostate tissues under compression. *Ultrasonic Imaging*, 1998, vol. 20, no. 4, pp. 260–274. DOI: 10.1177/016173469802000403 URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/016173469802000403>
- [4] Дубровский В.И., Федорова В.Н. Биомеханика. М., Владос-пресс, 2003.
- [5] Hoyt K., Castaneda B., Zhang M., et al. Tissue elasticity properties as biomarkers for prostate cancer. *Cancer Biomark.*, 2008, vol. 4, no. 4-5, pp. 213–225. DOI: 10.3233/CBM-2008-44-505 URL: <https://content.iospress.com/articles/cancer-biomarkers/dma-a538>
- [6] Samani A., Zubovits J., Plewes D. Elastic moduli of normal and pathological human breast tissues: an inversion-technique-based investigation of 169 samples. *Phys. Med. Biol.*, 2007, vol. 52, no. 6, pp. 1565–1576. DOI: 10.1088/0031-9155/52/6/002 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/52/6/002>
- [7] McAnearney S. The effects of Young's modulus on predicting prostate deformation for MRI-guided interventions. In: *Computational Biomechanics for Medicine*. Springer, 2011, pp. 39–49.
- [8] Zhang M., Nigwekar P., Castaneda B. Quantitative characterization of viscoelastic properties of human prostate correlated with histology. *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 34, no. 7, pp. 1033–1042. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2007.11.024 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301562907006229>
- [9] Negrini N.C., Bonnetier M., Giatsidis G., et al. Tissue-mimicking gelatin scaffolds by alginate sacrificial templates for adipose tissue engineering. *Acta Biomater.*, 2019, vol. 87, pp. 61–75. DOI: 10.1016/j.actbio.2019.01.018 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706119300388>
- [10] Tytgat L., Vagenende M., Declercq H., et al. Synergistic effect of κ -carrageenan and gelatin blends towards adipose tissue engineering. *Carbohydr. Polym.*, 2018, vol. 189, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.02.002 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861718301401>
- [11] Мухомор А.И. Соноэластография в комплексном трансректальном ультразвуковом исследовании предстательной железы при идентификации ранних стадий рака. *Україна. Здоров'я нації*, 2013, № 3, с. 75–80.

- [12] Lamblin G., Mayeur O., Giraudet G. Pathophysiological aspects of cystocele with a 3D finite elements model. *Arch. Gynecol. Obstet.*, 2016, vol. 294, no. 5, pp. 983–989. DOI: 10.1007/s00404-016-4150-6 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00404-016-4150-6>
- [13] Димитриади С.Н. Способ раннего восстановления континенции при радикальной простатэктомии. *Клиническая практика*, 2011, № 1, с. 35–40.
- [14] Bhattarai A., Staat M. Modelling of soft connective tissues to investigate female pelvic floor dysfunctions. *Comput. Math. Method. M.*, 2018, vol. 2018, art. 9518076. DOI: 10.1155/2018/9518076 URL: <https://www.hindawi.com/journals/cm/2018/9518076/>
- [15] Vonavkova T., Horny L., Kulvajtova M. Uniaxial tensile test of perivascular adipose tissue. *Bull. Appl. Mechan.*, 2014, vol. 10, no. 36, pp. 11–14.
- [16] Осипов Л.В. Технологии эластографии в ультразвуковой диагностике (обзор). *Медицинский алфавит*, 2013, т. 3-4, № 21, с. 5–21.
- [17] Lackey D.E., Burk D.H., Ali M.R., et al. Contributions of adipose tissue architectural and tensile properties toward defining healthy and unhealthy obesity. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 2014, vol. 306, no. 3, pp. 233–246. DOI: 10.1152/ajpendo.00476.2013 URL: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpendo.00476.2013>
- [18] Зыкин Б.И., Постнова Н.А., Медведев М.Е. Эластография: анатомия метода. *Променева диагностика, променева терапия*, 2012, № 2-3, с. 107–113.
- [19] Тухбатуллин М.Г., Галеева З.М., Бахракова А.Е. Ультразвуковая эластография. В: Эхография в диагностике заболеваний внутренних и поверхностно расположенных органов. Казань, Медицинская книга, 2016, с. 119–130.
- [20] Николенко В.Н., Коссович Л.Ю., Фомкина О.А. и др. Прочностные свойства артерий основания головного мозга взрослых людей 1-го периода зрелого возраста. *Ангиология и сосудистая хирургия*, 2008, т. 14, № 3, с. 123–124.
- [21] Митьков В.В., Васильева А.К., Митькова М.Д. Ультразвуковая эластография сдвиговой волны у больных с подозрением на рак предстательной железы. *Ультразвуковая и функциональная диагностика*, 2012, № 5, с. 18–29.
- [22] Alkhouli N., Mansfield H., Green J., et al. The mechanical properties of human adipose tissues and their relationships to the structure and composition of the extracellular matrix. *Am. J. Psychol.*, 2013, vol. 305, no. 12, pp. E1427–E1435. DOI: 10.1152/ajpendo.00111.2013 URL: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpendo.00111.2013>
- [23] Alkhouli N., Mansfield J., Green E., et al. The mechanical properties of human adipose tissues and their relationships to the structure and composition of the extracellular matrix. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 2013, vol. 305, no. 12, pp. E1427–E1435. DOI: 10.1152/ajpendo.00111.2013 URL: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpendo.00111.2013>
- [24] Руденко О.В., Сафонов Д.В., Рыхтик П.И. и др. Физические основы эластографии. Часть 2. Эластография на сдвиговой волне (лекция). *Радиология — практика*, 2014, № 4, с. 62–72.
- [25] Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Киев, Наукова думка, 1990.
- [26] Хайдукова И.В., Беликов Н.В., Резванова А.М. и др. Экспериментальное исследование механических свойств материалов для физического моделирования тканей. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2018, № 5, с. 22–25. DOI 10.18127/j15604136-201805-08 URL: <http://www.radiotec.ru/article/20671>
- [27] Покровский А.В., Саврасов Г.В., Новиков Ю.В. и др., ред. Ультразвуковая ангиохирургия. Кострома, ДиАр, 2004.

Бархатова Светлана Ивановна — студентка магистратуры кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им.Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Беликов Никита Владимирович — ассистент кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им.Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Саврасов Геннадий Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Биомедицинские технические системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бархатова С.И., Беликов Н.В. Исследование материалов для физической модели предстательной железы с прилежащими тканями. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 11(40). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-11-548>

**RESEARCH OF MATERIALS FOR THE PHYSICAL MODEL
OF THE PROSTATE GLAND WITH ADJACENT TISSUES**

S.I. Barkhatova

umanskaya.svetlana96@mail.ru

SPIN-code: 9739-5943

N.V. Belikov

aneox@list.ru

SPIN-code: 6876-9521

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

When conducting laparoscopic prostatectomy, there is a risk of damage to blood vessels and nerves, which can have a negative impact on the most important functions of the genitourinary system, therefore, the designed systems for minimally invasive surgery should be tested on physical models. This paper considers materials that can be used for physical modeling of the prostate gland and surrounding tissues. For some of them, Young's modulus, maximum elongation under tension, and tensile strength were experimentally determined. The influence of the amplitude of oscillations of an ultrasonic instrument on the rate of destruction of biological tissue is investigated.

Keywords

Physical model, adipose tissue, prostate gland, uniaxial stretching, Young's modulus, tensile strength, ultrasound instrument, laparoscopic prostatectomy

Received 27.09.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Comley K., Fleck N.A. A micromechanical model for the Young's modulus of adipose tissue. *Int. J. Solids Struct.*, 2010, vol. 47, no. 21, pp. 2982–2990. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.07.001 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768310002465>
- [2] Phipps S., Yang T.H., Habib F.K., et al. Measurement of the mechanical characteristics of benign prostatic tissue: a novel method for assessing benign prostatic disease. *Urology*, 2005, vol. 65, no. 5, pp. 1024–1028. DOI: 10.1016/j.urology.2004.12.022 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090429504014827>
- [3] Krouskop T.A., Wheeler T.M., Kallel F., al. Elastic moduli of breast and prostate tissues under compression. *Ultrasonic Imaging*, 1998, vol. 20, no. 4, pp. 260–274. DOI: 10.1177/016173469802000403 URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/016173469802000403>
- [4] Dubrovskiy V.I., Fedorova V.N. *Biomekhanika [Biomechanics]*. Moscow, Vldos-press Publ., 2003 (in Russ.).
- [5] Hoyt K., Castaneda B., Zhang M., et al. Tissue elasticity properties as biomarkers for prostate cancer. *Cancer Biomark.*, 2008, vol. 4, no. 4-5, pp. 213–225. DOI: 10.3233/CBM-2008-44-505 URL: <https://content.iospress.com/articles/cancer-biomarkers/dma-a538>
- [6] Samani A., Zubovits J., Plewes D. Elastic moduli of normal and pathological human breast tissues: an inversion-technique-based investigation of 169 samples. *Phys. Med. Biol.*, 2007, vol. 52, no. 6, pp. 1565–1576. DOI: 10.1088/0031-9155/52/6/002 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/52/6/002>
- [7] McAnearney S. The effects of Young's modulus on predicting prostate deformation for MRI-guided interventions. In: *Computational Biomechanics for Medicine*. Springer, 2011, pp. 39–49.

- [8] Zhang M., Nigwekar P., Castaneda B. Quantitative characterization of viscoelastic properties of human prostate correlated with histology. *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 34, no. 7, pp. 1033–1042. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2007.11.024 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301562907006229>
- [9] Negrini N.C., Bonnetier M., Giatsidis G., et al. Tissue-mimicking gelatin scaffolds by alginate sacrificial templates for adipose tissue engineering. *Acta Biomater.*, 2019, vol. 87, pp. 61–75. DOI: 10.1016/j.actbio.2019.01.018 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706119300388>
- [10] Tytgat L., Vagenende M., Declercq H., et al. Synergistic effect of κ -carrageenan and gelatin blends towards adipose tissue engineering. *Carbohydr. Polym.*, 2018, vol. 189, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.02.002 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861718301401>
- [11] Mukhomor A.I. Sonoelastography in complex transrectal ultrasound prostate examination at identification of cancer at early stages. *Ukraina. Zdorov'ya natsii*, 2013, no. 3, pp. 75–80. (in Russ.).
- [12] Lamblin G., Mayeur O., Giraudet G. Pathophysiological aspects of cystocele with a 3D finite elements model. *Arch. Gynecol. Obstet.*, 2016, vol. 294, no. 5, pp. 983–989. DOI: 10.1007/s00404-016-4150-6 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00404-016-4150-6>
- [13] Dimitriadi S.N. Early continence recovery in patients with radical prostatectomy. *Klinicheskaya praktika*, 2011, no. 1, pp. 35–40 (in Russ.).
- [14] Bhattarai A., Staat M. Modelling of soft connective tissues to investigate female pelvic floor dysfunctions. *Comput. Math. Method. M.*, 2018, vol. 2018, art. 9518076. DOI: 10.1155/2018/9518076 URL: <https://www.hindawi.com/journals/cm/2018/9518076/>
- [15] Vonavkova T., Horny L., Kulvajtova M. Uniaxial tensile test of perivascular adipose tissue. *Bull. Appl. Mechan.*, 2014, vol. 10, no. 36, pp. 11–14.
- [16] Osipov L.V. Technology of elastography in ultrasound diagnostics (review). *Meditinskiy alfavit*, 2013, vol. 3-4, no. 21, pp. 5–21 (in Russ.).
- [17] Lackey D.E., Burk D.H., Ali M.R., et al. Contributions of adipose tissue architectural and tensile properties toward defining healthy and unhealthy obesity. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 2014, vol. 306, no. 3, pp. 233–246. DOI: 10.1152/ajpendo.00476.2013 URL: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpendo.00476.2013>
- [18] Zykin B.I., Postnova N.A., Medvedev M.E. Elastography: anatomy of the method. *Promeneva diagnostika, promeneva terapiya*, 2012, no. 2-3, pp. 107–113 (in Russ.).
- [19] Tukhbatullin M.G., Galeeva Z.M., Bastrakova A.E. Ul'trazvukovaya elastografiya [Ultrasound elastography]. V: Ekhografiya v diagnostike zabolevaniy vnutrennikh i poverkhnostno raspolozhennykh organov [In: echography in diagnostics of internal and superficial organs diseases]. Kazan', Meditsinskaya kniga Publ., 2016, pp. 119–130 (in Russ.).
- [20] Nikolenko V.N., Kossovich L.Yu., Fomkina O.A., et al. Arteria strength properties of the adult brain base at the first adult stage. *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya* [Angiology and Vascular Surgery], 2008, vol. 14, no. 3, pp. 123–124 (in Russ.).
- [21] Mit'kov V.V., Vasil'yeva A.K., Mit'kova M.D. Shear wave ultrasound elastography in prostate cancer diagnosis. *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika* [Ultrasound and Functional Diagnostics], 2012, no. 5, pp. 18–29 (in Russ.).
- [22] Alkhouli N., Mansfield H., Green J., et al. The mechanical properties of human adipose tissues and their relationships to the structure and composition of the extracellular matrix. *Am. J. Psychol.*, 2013, vol. 305, no. 12, pp. E1427–E1435. DOI: 10.1152/ajpendo.00111.2013 URL: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpendo.00111.2013>

- [23] Alkhouli N., Mansfield J., Green E., et al. The mechanical properties of human adipose tissues and their relationships to the structure and composition of the extracellular matrix. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 2013, vol. 305, no. 12, pp. E1427–E1435. DOI: 10.1152/ajpendo.00111.2013 URL: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpendo.00111.2013>
- [24] Rudenko O.V., Safonov D.V., Rykhtik P.I., et al. Physical bases of elastography. Part 2. Shear wave elastography (lecture). *Radiologiya — praktika* [Radiology — Practice], 2014, no. 4, pp. 62–72 (in Russ.).
- [25] Berezovskiy V.A., Kolotilov N.N. Biofizicheskie kharakteristiki tkaney cheloveka [Biophysical characteristics of human tissue]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990 (in Russ.).
- [26] Khaydukova I.V., Belikov N.V., Rezvanova A.M., et al. Experimental study of the mechanical properties of materials for physical modelling of biological tissues. *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics], 2018, no. 5, pp. 22–25. DOI 10.18127/j15604136-201805-08 URL: <http://www.radiotec.ru/article/20671> (in Russ.).
- [27] Pokrovskiy A.V., Savrasov G.V., Novikov Yu.V., et al., eds. Ul'trazvukovaya angiokhirurgiya [Ultrasound angiography]. Kostroma, DiAr Publ., 2004 (in Russ.).

Barkhatova S.I. — Master's Degree Student, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Belikov N.V. — Assis. Professor, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Savrasov G.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Barkhatova S.I., Belikov N.V. Research of materials for the physical model of the prostate gland with adjacent tissues. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 11(40). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-11-548.html> (in Russ.).