



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.14

УДК 620.17

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНДОПРОТЕЗОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПЛАСТИКЕ ГРЫЖЕВЫХ ДЕФЕКТОВ

С.В. Словиков, А.В. Ильиных

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 29 октября 2018 г.

Принята: 29 апреля 2019 г.

Опубликована: 28 июня 2019 г.

Ключевые слова:

сетчатый имплантат, экспериментальная механика, хирургические материалы, механические свойства, методы механических испытаний, эндопротез, герниопластика.

АННОТАЦИЯ

Успехи современной пластики грыжевых дефектов (герниопластики) связаны с расширением использования синтетических эндопротезов в виде сетчатых имплантатов, выполненных из различных полимеров. Однако существенное число возникающих осложнений, связанных в том числе и с ошибочным применением того или иного имплантата, обуславливает необходимость более глубокого понимания механизмов не только биологического, но и механического поведения конструкций такого типа.

В ходе выполнения работы предложена методика оценки деформационных свойств сетчатых имплантатов, выполненных на основе пенопропилена и полиэстера. Данные имплантаты применяются в хирургических операциях при ненапряжной герниопластике и являются на данный момент одними из самых распространенных. В результате были проведены испытания по изучению деформирования сетчатых имплантатов таких марок, как SPMM, TCM, «Реперен», ТЕС, под воздействием брюшного давления в квазистатических условиях. Отработана предложенная методика проведения исследований. Получены данные зависимости деформации от внутрибрюшного давления.

Разработаны методика исследований и математическая модель, описывающая механическое поведение сетчатого имплантата, установленного в брюшную полость. Проведен анализ механического поведения для различных размеров рабочих областей сетчатого имплантата в условиях различных значений внутрибрюшных давлений в диапазоне от низких (2 кПа) до высоких (20 кПа) давлений.

Полученные результаты позволяют провести оценку механического поведения конкретного типа имплантатов и их применимость для клинического случая в зависимости от размеров дефекта живых тканей и ожидаемых внутрибрюшных давлений.

© ПНИПУ

© Словиков Станислав Васильевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: sslovikov@ya.ru, ID: [0000-0003-3884-3882](https://orcid.org/0000-0003-3884-3882)

Ильиных Артем Валерьевич – к.т.н., доц., e-mail: ilinih@yandex.ru, ID: [0000-0001-9162-1053](https://orcid.org/0000-0001-9162-1053)

Stanislav V. Slovikov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: sslovikov@ya.ru, ID: [0000-0003-3884-3882](https://orcid.org/0000-0003-3884-3882)

Artem V. Ilinykh – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ilinih@yandex.com, ID: [0000-0001-9162-1053](https://orcid.org/0000-0001-9162-1053)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EXPERIMENTAL STUDIES OF MECHANICAL PROPERTIES OF IMPLANTS FOR PLASTY OF HERNIAL DEFECTS

S.V. Slovikov, A.V. Ilinykh

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 29 October 2018
Accepted: 29 April 2019
Published: 28 June 2019

Keywords:

mesh implant, experimental mechanics, surgical materials, mechanical properties, mechanical testing methods, endoprosthesis, hernioplasty.

ABSTRACT

The success of modern hernioplasty is associated with the introduction of synthetic endoprostheses (mesh implants) from various polymers. However, a significant number of complications arising, including those involving the erroneous application of an implant, make it necessary to get a deeper understanding of mechanisms of not only biological but also mechanical behaviors of structures of this type

During the work, a technique is proposed to assess deformation properties of mesh implants made based on foam and polyester. These implants are used in surgical operations with non-stretching hernioplasty, which are now most common. As a result, tests were conducted to study the deformation of the mesh implant type SPMM, TCM, Reperen, TEC under the influence of abdominal pressure under quasi-static conditions. In order to conduct the study we completed the development of the proposed methodology. The data of the deformation dependence on intra-abdominal pressure were obtained.

As a result, a research methodology and a mathematical model have been developed that describe the mechanical behavior of the mesh implant installed in the abdominal cavity under conditions of non-stretching hernioplasty, which is under the influence of intra-abdominal pressure. The analysis of mechanical behavior for various sizes of working areas of a reticular implant under the conditions of various values of intraperitoneal pressures in a range from low (2 kPa) to high (20 kPa) pressures is carried out.

The obtained results allow an assessment of the mechanical behavior of implants and their applicability for a clinical case depending on defect sizes in living tissues and expected intra-abdominal pressures.

© PNRPU

Введение

Применение при хирургических операциях на грыжах методов ненатяжной герниопластики (пластика грыжевых дефектов) [1,2] и факт того, что результаты подобных вмешательств напрямую зависят от правильного подбора вида, размера и формы новейших сетчатых имплантатов, обуславливают необходимость совершенствования методов анализа механического поведения медицинских материалов данного типа.

В хирургической практике широко используются сетчатые эндопротезы (имплантаты), выполненные на основе как мононитей, так и полинитей из полипропилена, полиэстера, политетрафторэтилена [3, 4, 5].

Использование при пластике грыжевых дефектов передней брюшной стенки сетчатых имплантатов требует от хирурга знания не только их биологических свойств, но и механических характеристик.

Существует множество вариантов классификаций сетчатых эндопротезов [6,7,8,9]. Самая упрощенная классификация условно подразделяет их на «легкие» (вес до 70 г/м²) и «тяжелые» (вес более 70 г/м²).

Использование «тяжелых» имплантатов с большим запасом прочности приводит к инкапсулированию, тогда как «легкие» с большой пористостью прорастают тканями, что, в свою очередь, приводит к уменьшению вероятности развития различных неблагоприятных процессов [10, 11, 12]. Однако повышенные деформации

«легких» эндопротезов под нагрузкой и их меньшие по сравнению с «тяжелыми» имплантатами жесткость и прочность могут приводить к разрушению хирургического шва на апоневрозе [13, 14, 15].

Сложная геометрия сетчатого имплантата обуславливает и сложное поведение всей конструкции. Детальное моделирование с точным повторением всей геометрической формы требуется только на этапе проектирования эндопротеза. В последнее время предлагаются все новые методы испытаний для исследований механического поведения [16, 17, 18]. В то же время для оценки качества получаемой продукции и определения условий ее применения необходимо использовать иные, упрощенные, подходы, при этом создавать такие условия в испытаниях, которые максимально близко будут соответствовать эксплуатационным.

В целом данная работа направлена на разработку методики упрощенной оценки механических свойств сетчатых эндопротезов для последующего применения в клинике.

1. Методика исследования

Для разработки методики исследования были приняты некоторые упрощающие допущения. Предположим, что закрепленный по круглому контуру имплантат радиусом R изгибается, образуя шаровую поверхность, а внутрибрюшное давление (ВБД) распределено равно-

мерно по всей изогнутой поверхности. Таким образом, механика процессов наиболее близка к поведению конструкции мембранного типа. Имплантат закрепленный *invitro* будем считать объектом механики сплошного твердого тела. Причем основные механические свойства присущи только имплантату, остальные элементы системы не несут механических параметров. Так как в эксперименте представляется наиболее простым определять относительное усилие, возникающее в сетчатом эндопротезе без учета его толщины, и учитывать только ширину, то единица измерения относительного (погонного) усилия – Н/м или Н/см.

Сетчатый эндопротез из-за своей конструкции имеет анизотропию свойств, причем ее можно упростить до ортогональной, так как решающую роль играют перпендикулярные направления: вдоль узловых рядов и поперек узловых рядов.

При моделировании предполагается, что имплантированные в брюшную полость на апоневроз сетчатые эндопротезы находятся под равномерно распределенным давлением, и несущую роль на себя берут нити вдоль узловых рядов и поперек узловых рядов. Поэтому ячейки сетчатых имплантов (ячейки периодичности) не меняют свою форму.

В этом случае схема нагружения сетчатого имплантата аналогична условиям нагружения тонкостенной мембраны. Исследуемая конструкция работает в условиях гидростатического нагружения (давления). Это наиболее близко к испытаниям по нагружению полоски ткани при одноосном растяжении с условием, когда ширина образца больше длины. Чем меньше отношение базы деформирования к ширине образца, тем ближе к условиям гидростатического нагружения.

В свою очередь, малая база измерения деформации ведет к увеличению погрешности измерений и ограничена размерами испытываемого образца и характеристиками системы измерения перемещений. Чтобы выполнить вышеперечисленные условия, соотношение базы деформирования и ширины образца, видимо, должно находиться в диапазоне от 0,1 до 0,5. В случае большего значения данного соотношения при растяже-

нии происходит значимое сужение сетчатого имплантата (изменение формы ячеек) и искажение получаемых результатов (занижение жесткостных свойств конструкции), что зачастую встречается при проведении подобных механических испытаний сетчатых имплантатов [19, 20].

Таким образом, деформируемость сетчатого имплантата вдоль оси одноосного нагружения будет близка к деформируемости вдоль той же оси при нагружении внутрибрюшным давлением.

Для случая применения сетчатого имплантата и его ортотропности представляется возможным использовать математические выкладки, выполненные по аналогии с методикой приближенного расчета прогиба для тонкостенных оболочек, представленной в работе [21].

Для единичного элемента размером l – в направлении действия давления сумма проекций относительных нагрузок N_1, N_2 и давления p (рис. 1) рассчитывается как

$$(-2N_1 - 2N_2) \sin \frac{\varphi}{2} + p \cdot l \cdot l = 0,$$

где φ – центральный угол дуги кромки единичного элемента поверхности модели сетчатого имплантата.

Ввиду малости угла φ имеем

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\varphi}{2}.$$

Если за r принять радиус кривизны поверхности сетчатого имплантата, то

$$\varphi = \frac{1}{r}.$$

Тогда при $l = 1$

$$N_1 + N_2 = p \cdot r.$$

Из геометрических построений, представленных на рис. 1, видно, что

$$R^2 + (r-b)^2 = r^2, \\ R^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot b + b^2 - r^2 = 0.$$

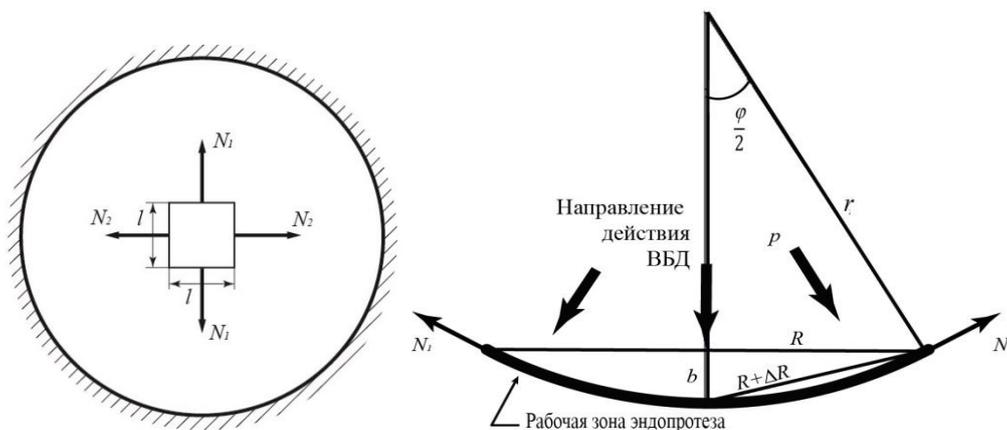


Рис. 1. Геометрическая схема эндопротеза под воздействием ВБД

Fig. 1. Geometrical scheme of the endoprosthesis under the influence of abdominal pressure

Сокращаем b^2 , так как это величина 2-го порядка малости:

$$r = \frac{R^2}{2 \cdot b}. \quad (1)$$

В то же время

$$b^2 = (R + \Delta R)^2 - R^2 = R^2 + 2 \cdot R \cdot \Delta R + \Delta R^2 - R^2.$$

Сокращаем ΔR^2 ввиду второго порядка малости:

$$b = \sqrt{2R \cdot \Delta R}. \quad (2)$$

Будем считать, что под деформацией сетчатого имплантата подразумеваем соотношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R},$$

тогда из (1) и (2) следует

$$r = \frac{R}{2\sqrt{2\varepsilon}}. \quad (3)$$

Отсюда

$$N_1 + N_2 = \frac{pR}{2\sqrt{2\varepsilon}}. \quad (4)$$

Обычно внутрибрюшное давление находится в диапазонах от 2 кПа – низкое давление, до 20 кПа – высокое [22, 23, 24].

Для наиболее часто встречающихся случаев дефектов тканей диаметр рабочей зоны сетчатого имплантата может находиться в диапазоне от 6 до 12 см [25, 26, 27].

Зависимости значений предельных деформаций от величины внутрибрюшного давления описываются системой уравнений

$$\begin{cases} N_1 + N_2 = \frac{pR}{2\sqrt{2\varepsilon}}, \\ N_1 = f_1(\varepsilon), \\ N_2 = f_2(\varepsilon), \end{cases} \quad (5)$$

где функция $N_1 = f_1(\varepsilon)$ определяется из испытания по деформированию имплантата в направлении вдоль узловых рядов, а $N_2 = f_2(\varepsilon)$ – поперек узловых рядов.

Решением системы (5) является значение деформации ε_m при фиксированном внутрибрюшном давлении без учета сопротивления восстанавливаемых *in vivo* тканей, что представляется обоснованным, так как применяется методика ненатяжной герниопластики.

Для нашей системы уравнений граничными условиями будут значения R – от 3 см до 6 см и давления p – от 2 до 20 кПа.

В представленной модели не учитываются вязкоупругое поведение сетчатых эндопротезов и влияние циклического нагружения, которые, возможно, будут играть значимую роль в эксплуатации. На практике, в процессе эксплуатации, на реологическое поведение будет оказывать влияние процесс наращивания тканей, который увеличивает жесткость всей конструкции.

Приближенность приведенной выше оценки также оправдана из-за большого разброса диаграмм нагружения, восстанавливаемых с помощью сетки живых тканей [28], и незнания диаграмм хирургом в конкретной клинической ситуации.

Необходимо отметить, что представленная расчетная модель является упрощенной и в ней не учитываются многие факторы. Напряженно-деформированное состояние сетчатого имплантата при испытаниях отличается от условий работы, но в то же время реальные условия работы известны весьма приблизительно. Учитывая это, можно считать использованную методику пригодной для сравнительных испытаний материалов имплантатов с разным строением или из разных материалов.

2. Объект исследования

Объектом настоящего исследования явились сетчатые имплантаты четырех типов: ТСМ, «Реперен», ТЕС, SPMM.

Внешний вид исследуемых имплантатов представлен на рис. 2.

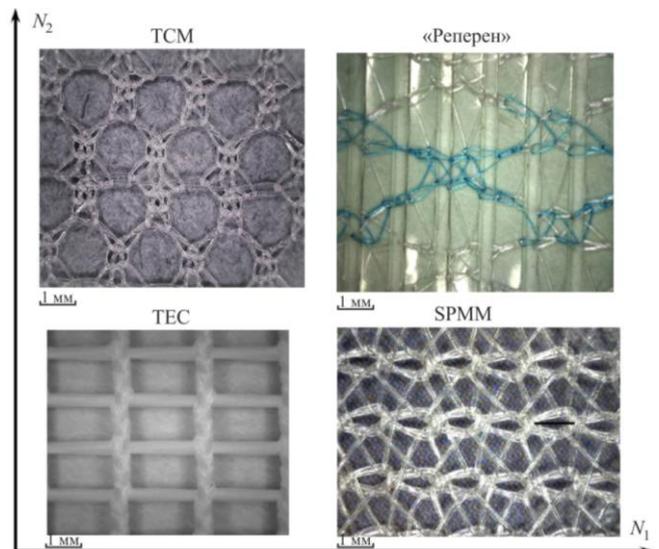


Рис. 2. Эндопротезы. $N_1(N_2)$ – направление действия нагрузки относительно структуры

Fig. 2. Endoprosthesis. $N_1(N_2)$ is the direction of $N_1(N_2)$ load relative to the structure

К сетчатым имплантатам «легкого» типа относятся:
– ТСМ – выполнен из монофиламентного полиэстера;
– «Реперен» – пластина толщиной 300 мкм, выполненная из полимера на основе производных метакриловой кислоты, армированная плетеной сеткой из полипропилена.

К сетчатым имплантатам «тяжелого» типа относятся:
 – SPMM – выполнен из монофиламентной полипропиленовой нити;
 – ТЕС – выполнен из гидрофильного полифиламентного полиэстера.

Для сетчатых имплантов ТСМ и «Реперен» диаметр нитей составляет 0,075 мм, для SPMM – 0,15 мм и для ТЕС 0,3 мм. Периодичность структуры эндопротезов близка друг к другу и колеблется в диапазоне от 1,5 до 2 мм.

3. Результаты исследования

Механические испытания сетчатых имплантов проведены в ЦКП «Центр экспериментальной механики» (ЦЭМ) Пермского национального исследовательского политехнического университета с использованием видеостендозометра AVE Instron и испытательной машины Instron 5965 с датчиком нагрузки до 500 Н (рис. 3). На оборудовании ЦЭМ уже в течение длительного времени проводятся комплексные исследования материалов ме-

дицинского назначения, таких как хирургический шовный материал [29, 30, 31, 32] и атравматические иглы [33]. Испытания проведены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России.



Рис. 3. Проведение испытания по деформированию сетчатого имплантата

Fig. 3. Conducting the mesh implant deformation test

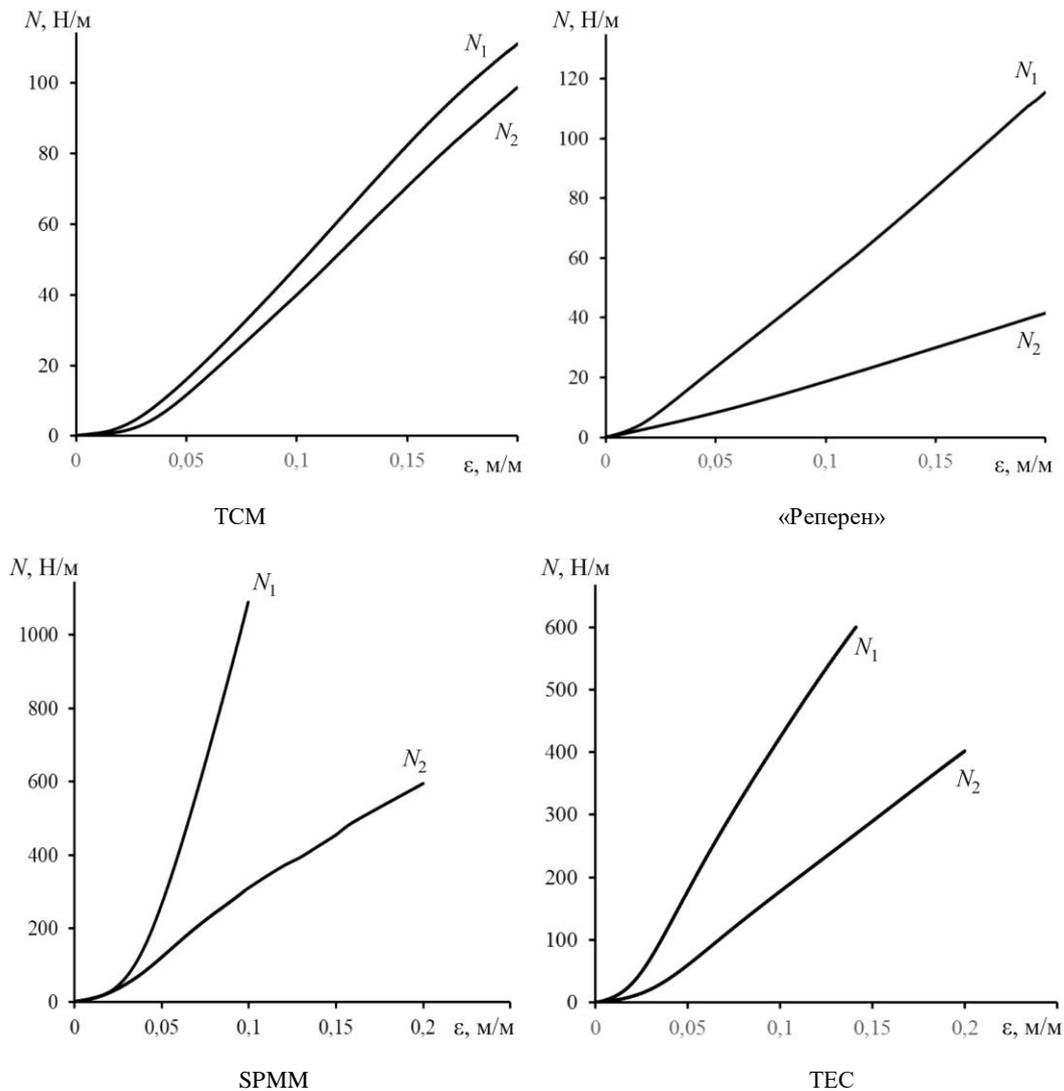


Рис. 4. Диаграммы деформирования. N_1, N_2 – направление деформирования относительно структуры

Fig. 4. Deformation diagrams. N_1, N_2 is the direction of deformation relative to the structure

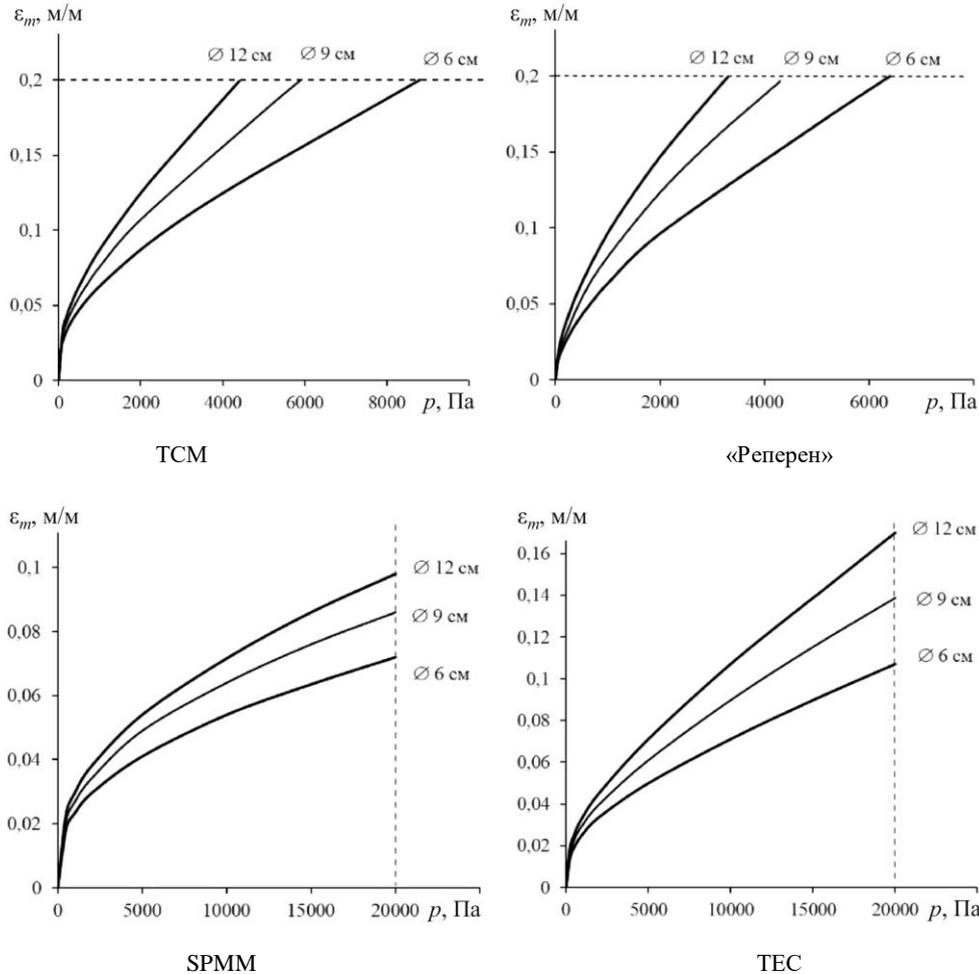


Рис. 5. Деформации сетчатых имплантов с диаметрами 12, 9 и 6 см в зависимости от внутрибрюшного давления (штриховая линия показывает предельные значения деформации и внутрибрюшного давления)

Fig. 5. Deformations of mesh implants with diameters of 12, 9 and 6 cm depending on the abdominal pressure (the dashed line shows the limiting values of the deformation and abdominal pressure)

Диаграммы деформирования эндопротезов представлены на рис. 4, где N – усилие, отнесенное к ширине образца.

При проведении испытаний скорость деформирования образцов имплантов составила 0,0067 1/с. Ширина образцов 75 мм. Отношение базы деформирования к ширине образца 0,35.

Предполагается, что превышение деформирования отдельных живых тканей более 20 % может привести к их частичному разрушению и необратимым дефектам [34, 35].

Таким образом, граничными условиями модели, представленной в п. 2, явились значения предельно допустимых деформаций в 20 % и значения внутрибрюшного давления от 2 до 20 кПа.

В результате расчетов по предложенной модели для эндопротезов, зафиксированных по окружности диаметрами 6,9 и 12 см, получены зависимости деформаций эндопротеза (ϵ_m) от внутрибрюшного давления (рис. 5)

Анализируя полученные зависимости можно отметить, что исследованные «тяжелые» сетчатые имплантаты обладают чрезмерной жесткостью для большинства клинических ситуаций. В свою очередь, сетчатые

имплантаты, относящиеся к категории «легкие» типа ТСМ и «Реперен», необходимо применять там, где нет опасности возникновения высоких внутрибрюшных давлений.

Заключение

В ходе выполнения научно-исследовательской работы разработана методика оценки механического поведения сетчатого имплантата, установленного в брюшную полость в условиях ненатяжной герниопластики и находящегося под воздействием внутрибрюшного давления. Выполнена оценка механического поведения четырех типов сетчатых имплантатов. Проведен анализ значений предельных деформации для различных размеров рабочих областей сетчатого имплантата в области возможных внутрибрюшных давлений от 2 до 20 кПа.

Полученные результаты позволяют провести оценку механического поведения конкретного типа имплантатов и их применимость для клинического случая в зависимости от размеров дефекта живых тканей и ожидаемых внутрибрюшных давлений.

Библиографический список

1. Егиев В.Н. Ненатяжная герниопластика. – М.: Мед-практика, 2002. – 148 с.
2. Рагимов В.А. Сравнительный анализ результатов аллопластических методов в хирургическом лечении вентральных грыж // Вестник экспериментальной и клинической хирургии. – 2012. – Т. V, № 3. – С. 574–577.
3. Грубник В.В., Лосев А.А., Баязитов И.Р. Современные методы лечения брюшных грыж. – Киев: Здоровье, 2001. – 280 с.
4. Биомеханика для хирургического лечения послеоперационных грыж / Ф. Шумпелик, У. Клише, С. Титкова [и др.] // Современные подходы к разработке и применению эффективных перевязочных средств, шовных материалов и полимерных имплантатов: материалы 7 IV Междунар. конф. (27–28 ноября 2001 г., г. Москва). – М., 2001. – С. 158–160.
5. Биомеханическая концепция патогенеза послеоперационных вентральных грыж / В.И. Белоконев, С.Ю. Пушкин, Т.А. Федорина, С.В. Нагапетян // Вестник хирургии. – 2004. – № 5. – С. 23–27.
6. Coda A., Lamberti R., Martorana S. Classification of prosthetics used in hernia repair based on weight and biomaterial // *Hernia*. – 2012. – No. 16 (1). – P. 9–20. DOI: 10.1007/s10029-011-0868-z
7. Earle D.B., Mark L.A. Prosthetic material in inguinal hernia repair: how do I choose? // *Surgery Clin. North. Am.* – 2008. – No. 88 (1). – P. 179–201. DOI: 10.1016/j.suc.2007.11.002
8. Amid P.K. Classification of biomaterials and their related complications in abdominal wall hernia surgery // *Hernia*. – 1997. – No. 1. – P. 15–21. DOI: 10.1007/BF02426382
9. Жуковский В.А. Полимерные эндопротезы для герниопластики. – СПб.: Эскулап, 2011. – 104 с.
10. Experimental comparison of monofilament light and heavy polypropylene meshes: less weight does not mean less biological response / D. Weyhe, I. Schmitz, O. Belyaev [et al.] // *World Journal Surgery*. – 2006. – No. 30 (8). – P. 1586–1591. DOI: 10.1007/s00268-005-0601-0
11. Tissue integration and tolerance to meshes used in gynecologic surgery: an experimental study / L. Boulanger, M. Boukerrou, E. Lambaudie [et al.] // *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*. – 2006. – No. 125 (1). – P. 103–108. DOI: 10.1016/j.ejogrb.2005.07.029
12. Ануров В.Н. Влияние структурных и механических свойств сетчатых протезов на эффективность пластики грыжевых дефектов передней брюшной стенки: дис. ... д-ра мед. наук. – М., 2014. – 298 с.
13. Lintin L.A., Kingsnorth A.N. Mechanical failure of a lightweight polypropylene mesh // *Hernia*. – 2014. – No. 18 (1). – P. 131–133. DOI: 10.1007/s10029-012-0959-5
14. Central failures of lightweight monofilament polyester mesh causing hernia recurrence: a cautionary note / C.C. Petro, E.H. Nahabet, C.N. Criss [et al.] // *Hernia*. – 2015. – No. 19. – P. 155–159. DOI: 10.1007/s10029-014-1237-5
15. Central rupture and bulging of low-weight polypropylene mesh following recurrent incisional sublay hernioplasty / M. Zuvella, D. Galun, A. Djuric-Stefanovic [et al.] // *Hernia*. – 2014. – No. 18 (1). – P. 135–140. DOI: 10.1007/s10029-013-1197-1
16. Mechanical response of animal abdominal walls in vitro: evaluation of the influence of a hernia defect and a repair with a mesh implanted intraperitoneally / F. Podwojewski, M. Ottenio, P. Beillas [et al.] // *Journal of Biomechanics*. – 2013. – No. 46 (3). – P. 561–566. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.09.014
17. Röhrnbauer B., Mazza E. A non-biological model system to simulate the in vivo mechanical behavior of prosthetic meshes // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2013. – No. 20 (0). – P. 305–315. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.01.029
18. Physical and mathematical modelling of implant–fascia system in order to improve laparoscopic repair of ventral hernia / A. Tomaszewska, I. Lubowiecka, C. Szymczak, K. Bury // *Clinical Biomechanics*. – 2013. – Vol. 28. – No. 7. – P. 743–751. DOI: /10.1016/j.clinbiomech.2013.06.009
19. Characterizing the ex vivo mechanical properties of synthetic polypropylene / X. Li, J. Kruger, J. Jor, P. Nielsen, M. Nash, V. Wong, H.P. Diet // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2014. – Vol. 37. – P. 48–55. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2014.05.005
20. The effect of fabric structure on the mechanical properties of warp knitted surgical mesh for hernia repair / M. Mirjavan, A. Asayesh, A. Asghar, A. Jeddi // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2017. – Vol. 66. – P. 77–86. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.10.016
21. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
22. Normal intraabdominal pressure in healthy adults / W.S. Cobb, J.M. Burns, K.W. Kercher [et al.] // *Journal of Surgical Research*. – 2005. – No. 129 (2). – P. 231–235. DOI: 10.1016/j.jss.2005.06.015
23. Внутривнутрибрюшное давление человека / В.С. Туктамышев, А.Г. Кучумов, Ю.И. Няшин, В.А. Самарцев, Е.Ю. Касатова // *Российский журнал биомеханики*. – 2013. – Т. 17, № 1(59) – С. 22–31.
24. Modified mesh for hernia repair that is adapted to the physiology of the abdominal wall / U. Klinge, B. Klosterhalfen, J. Conze [et al.] // *Eur. J. Surg.* – 1998. – Vol. 164 (12). – P. 951–960. DOI: 10.1080/110241598750005138
25. Technical consideration for subxiphoidal incisional hernia repair / J. Conze, A. Prescher, K. Kisielinski [et al.] // *Hernia*. – 2005. – Vol. 9 (1). – P. 84–87. DOI: 10.1007/s10029-004-0239-0
26. Polypropylene in the intra-abdominal position: Influence of pore size and surface area / J. Conze, R. Rosch, U. Klinge [et al.] // *Hernia*. – 2004. – No. 8 (4). – P. 365–372. DOI: 10.1007/s10029-004-0268-8
27. Incisional hernia: Open techniques / U. Klinge, J. Conze, C.J. Krones, V. Schumpelick // *World Journal Surgical*. – 2005. – No. 29(8). – P. 1066–1072. DOI: 10.1007/s00268-005-7970-2
28. Anisotropy of Human Linea Alba: A Biomechanical Study / D. Gräfel, A. Prescher, S. Fitzek, D. Keyserlingk, H. Axer // *Journal of Surgical Research*. – 2005. – Vol. 124. – No. 1. – P. 118–125. DOI: 10.1016/j.jss.2004.10.010
29. Стратегия применения современных шовных материалов с антимикробными свойствами в абдоминальной хирургии / В.А. Самарцев, В.Э. Вильдеман, С.В. Словиков, В.А. Гаврилов, А.Е. Федоров // *Пермский медицинский журнал*. – 2010. – Т. 27, № 5. – С. 104–108.
30. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов / А.Е. Федоров, В.А. Самарцев, В.А. Гаврилов, В.Э. Вильдеман, С.В. Словиков // *Российский журнал биомеханики*. – 2009. – Т. 13, № 4 (46). – С. 78–84.
31. Словиков С.В., Янкин А.С. Исследование механических свойств хирургических синтетических шовных материалов в условиях биодеградации // *Математическое моделирование в естественных науках*. – 2015. – Т. 1. – С. 416–418.

32. Словиков С.В., Янкин А.С. Экспериментальные исследования биодеградации прочностных свойств хирургического шовного материала // Математическое моделирование в естественных науках. – 2016. – Т. 1. – С. 341–345.

33. Словиков С.В., Самарцев В.А., Гаврилов В.А. Методология определения механических характеристик атравматических дугообразных медицинских игл // Российский журнал биомеханики. – 2016. – Т. 20, № 3 (46). – С. 249–256. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.3.05

References

1. Egiev V.N. Nenatiazhaia gernioplastika [Tension-free hernioplasty]. *Moscow, Medpraktika*, 2002, 148 p.

2. Ragimov V.A. Sravnitelnyi analiz rezultatov alloplasticheskikh metodov v khirurgicheskom lechenii ventralnykh gryzh [Comparative analysis of the results of alloplastic methods in the surgical treatment of ventral hernias]. *Vestnik eksperimentalnoi i klinicheskoi khirurgii*, 2012, vol.V, no.3, pp. 574-577.

3. Grubnik V.V., Losev A.A., Bbaiazitov I.R. Sovremennye metody lecheniia briushnykh gryzh [Modern methods of treating abdominal hernias]. *Kiev, Zdorove*. 2001. 280 p.

4. Shumpelik F., Klishe U., Titkova S. Biomekhanika dlia khirurgicheskogo lecheniia posleoperatsionnykh gryzh [Biomechanics for surgical treatment of postoperative hernias]. *Moscow, 7 IV Mezhdunar. konf. «Sovremennye podkhody k razrabotke i primeneniuiu effektivnykh pereviazochnykh sredstv, shovnykh materialov i polimernykh implantatov»*, 2001, pp.158-160.

5. Belokonev V.I., Pushkin S.I.U., Fedorina T.A., Nagapetian S.V. Biomekhanicheskaiia kontseptsiiia patogeneza posleoperatsionnykh ventralnykh gryzh [Biomechanical concept of the pathogenesis of postoperative ventral hernias]. *Vestnik Khirurgii*, 2004, no. 5, pp. 23-27.

6. Coda A, Lamberti R, Martorana S. Classification of prosthetics used in hernia repair based on weight and biomaterial. *Hernia*, 2012; vol.16, no. 1, pp. 9-20. DOI: 10.1007/s10029-011-0868-z

7. Earle D.B., Mark L.A. Prosthetic material in inguinal hernia repair: how do I choose. *Surgery Clin North Am*, 2008; vol.88, no.1, pp. 179-201. DOI: 10.1016/j.suc.2007.11.002

8. Amid P.K. Classification of biomaterials and their related complications in abdominal wall hernia surgery. *Hernia*, 1997; no.1, pp. 15-21. DOI: 10.1007/BF02426382

9. Zhukovskii V.A. Polimernye endoprotezy dlia gernioplastiki [Polymeric endoprostheses for hernioplasty]. *Saint Petersburg, Eskulap*, 2011, 104 p.

10. Weyhe D., Schmitz I., Belyaev O. et al. Experimental comparison of monofilament light and heavy polypropylene meshes: less weight does not mean less biological response. *World Journal Surgery*, 2006, no. 30 (8), pp. 1586-1591. DOI: 10.1007/s00268-005-0601-0

11. Boulanger L., Boukerrou M., Lambaudie E. et al. Tissue integration and tolerance to meshes used in gynecologic surgery: an experimental study. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 2006, no. 125 (1), pp.103-108. DOI: 10.1016/j.ejogrb.2005.07.029

12. Anurov V.N. Vliianie strukturnykh i mekhanicheskikh svoistv setchatykh protezov na effektivnost' plastiki gryzhevnykh defektov perednei briushnoi stenki [Influence of structural and mechanical properties of mesh prostheses on the efficiency of plastic repair of hernial defects of the anterior abdominal wall]: dis. ... d-ra med. nauk. – Moscow, 2014, 298 c.

13. Lintin L.A., Kingsnorth A.N. Mechanical failure of a lightweight polypropylene mesh. *Hernia*, 2014, no. 18 (1). pp. 131-133. DOI: 10.1007/s10029-012-0959-5

34. Elasticity of the anterior abdominal wall and impact for reparation of incisional hernias using mesh implants / K. Junge, U. Klinge, A. Prescher [et al.] // *Hernia*. – 2001. – No. 5 (3). – P. 113–118. DOI: 10.1007/s100290100019

35. Physicomechanical evaluation of absorbable and nonabsorbable barrier composite meshes for laparoscopic ventral hernia repair / C.R. Deeken, M.S. Abdo, M.M. Frisella, B.D. Matthews // *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*. – 2011. – No. 25 (5). – P. 1541–1552. DOI: 10.1007/s00464-010-1432-0

14. Petro C.C., Nahabet E.H., Criss C.N. et al. Central failures of lightweight monofilament polyester mesh causing hernia recurrence: a cautionary note. *Hernia*, 2015, no.19, pp. 155-159. DOI: 10.1007/s10029-014-1237-5

15. Zuvella M., Galun D., Djuric-Stefanovic A et al. Central rupture and bulging of low-weight polypropylene mesh following recurrent incisional sublay hernioplasty. *Hernia*, 2014, no.18 (1), pp. 135-140. DOI: 10.1007/s10029-013-1197-1

16. Podwojewski F., Ottenio M., Beillas P. et al. Mechanical response of animal abdominal walls in vitro: evaluation of the influence of a hernia defect and a repair with a mesh implanted intraperitoneally. *Journal of Biomechanics*, 2013, no.46 (3), pp. 561-566. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.09.014

17. Röhrnbauer B., Mazza E. A non-biological model system to simulate the in vivo mechanical behavior of prosthetic meshes. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2013, no.20 (0), pp. 305-315. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.01.029

18. Tomaszewska A., Lubowiecka I., Szymczak C., Bury K. Physical and mathematical modelling of implant–fascia system in order to improve laparoscopic repair of ventral hernia. *Clinical Biomechanics*, 2013, vol.28, iss 7, August 2013, pp 743-751 DOI: /10.1016/j.clinbiomech.2013.06.009

19. Li X, Kruger J., Jor J., Nielsen P., Nash M., Wong V., Diet H.P. Characterizing the ex vivo mechanical properties of synthetic polypropylene. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, vol.37, pp. 48-55. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2014.05.005

20. Mirjavan M., Asayesh A., Asghar A., Jeddi A. The effect of fabric structure on the mechanical properties of warp knitted surgical mesh for hernia repair. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, vol. 66, pp. 77-86. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.10.016

21. Rabotnov Y.N. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. *Moscow: Fizmatgiz*, 1962, 456 p.

22. Cobb W.S., Burns J.M., Kercher K.W. et al. Normal intraabdominal pressure in healthy adults. *Journal of Surgical Research*, 2005, No.129 (2), pp.231-235. DOI: 10.1016/j.jss.2005.06.015

23. Tuktamyshev V.S., Kuchumov A.G., Niashin I.U.I., Samartsev V.A., Kasatova E.I.U. Vnutribriushnoe davlenie cheloveka [Intra-abdominal pressure of a person]. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki*, 2013, vol.17, no.1(59), pp. 22–31

24. Klinge U., Klosterhalfen B., Conze J. et al. Modified mesh for hernia repair that is adapted to the physiology of the abdominal wall. *Eur J Surg* 1998; 164 (12), pp.951-960 doi: 10.1080/110241598750005138

25. Conze J., Prescher A., Kisielinski K. et al. Technical consideration for subxiphoidal incisional hernia repair. *Hernia* 2005; 9 (1): pp.84-87. DOI: 10.1007/s10029-004-0239-0

26. Conze J., Rosch R., Klinge U. et al. Polypropylene in the intra-abdominal position: influence of pore size and surface area. *Hernia*, 2004, no.8 (4), pp. 365-372. DOI: 10.1007/s10029-004-0268-8

27. Klinge U., Conze J., Krones CJ, Schumpelick V. Incisional hernia: open techniques. *World Journal Surgical*, 2005, no.29(8), pp. 1066-1072. Doi: 10.1007/s00268-005-7970-2
28. Gräßel D., Prescher A., Fitzek S., Keyserlingk D., Axer H. Anisotropy of Human Linea Alba: A Biomechanical Study. *Journal of surgical research*, 2005, vol.124, no.1, pp. 118–125. doi: 10.1016/j.jss.2004.10.010
29. Samartsev V.A., Vildemann V.E., Slovikov S.V., Gavrilo V.A., Fedorov A.E. Strategiiia primeneniia sovremennykh shovnykh materialov s antimikrobnymi svoistvami v abdominalnoi khirurgii [Strategy of using modern suture materials with antimicrobial properties in abdominal surgery]. *Permskii meditsinski zhurnal*, 2010, vol.27, no.5, pp. 104-108.
30. Fedorov A.E., Samartsev V.A., Gavrilo V.A., Wilde- mann V.E., Slovikov S.V. Experimental investigation of the mechanical properties of the contemporary surgical resorbable suture materials. *Russian Journal of Biomechanics*, 2009, vol. 13, no. 4 (46), pp.74-79.
31. Slovikov S.V., Iankin A.S. Issledovanie mehanicheskikh svoystv hirurgicheskikh sinteticheskikh shovnykh materialov v uslovi- jah biodegradacii [Investigation of mechanical properties of surgi- cal synthetic suture materials under biodegradation conditions]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2015, vol.1, pp. 416-418.
32. Slovikov S.V., Jeksperimental'nye issledovaniya biode- gradacii prochnostnykh svoystv hirurgicheskogo shovnogo materiala [Experimental studies of biodegradation of strength properties of surgical suture material]. *Matematicheskoe modelirovanie v estest- vennykh naukakh*, 2016, vol.1, pp. 341-345.
33. Slovikov S.V., Samartsev V.A., Gavrilo V.A. Method- ology for determining mechanical properties of atraumatic arcuate medical needles. *Russian Journal of Biomechanics*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 213-219. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.3.05
34. Junge K., Klinge U., Prescher A. et al. Elasticity of the anterior abdominal wall and impact for reparation of incisional hernias using mesh implants. *Hernia*, 2001, no. 5 (3), pp. 113-118. DOI: 10.1007/s100290100019
35. Deeken C.R., Abdo M.S., Frisella M.M., Matthews B.D. Physicomechanical evaluation of absorbable and nonabsorbable barrier composite meshes for laparoscopic ventral hernia repair. *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 2011, no. 25 (5), pp. 1541-1552. DOI: 10.1007/s00464-010-1432-0