

<sup>2,3</sup>Полиданов М.А., <sup>1</sup>Волков К.А., <sup>1,4</sup>Масляков В.В. <sup>5</sup>Барулина М.А.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАПОЛНЕННОГО МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ ЧЕЛОВЕКА

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского Минздрава России, г. Саратов, Российская Федерация

<sup>2</sup>ЧУОО ВО «Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>ЧУОО ВО «Медицинский университет «Реавиз», г. Самара, Российская Федерация

<sup>4</sup>ЧУОО ВО «Саратовский медицинский университет «Реавиз», г. Саратов, Российская Федерация

<sup>5</sup>ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; г. Пермь, Российская Федерация

**Аннотация.** В настоящее время недостаточно работ, посвященных изучению деформации мочевого пузыря при воздействии внешней статической силы (например, падение на твердый предмет). В то же время создание новых операционных методик невозможно без использования методов предоперационного прогнозирования результатов операций. В связи с этим, в ходе исследования рассматривались проблемы моделирования мочевого пузыря человека и его напряженно-деформированного состояния при внешнем статическом воздействии. Предложен метод идентификации анизотропных биомеханических характеристик ткани мочевого пузыря. Создана модель МКЭ (метод конечных элементов) учитывает наличие постоянного гидростатического давления на стенки мочевого пузыря, когда он полон.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, конечно-элементное моделирование, мочевой пузырь, биомеханика, напряженно-деформированное состояние.

Polidanov M.A., Volkov K.A., Maslyakov V.V. Barulina M.A.  
**NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE  
OF A FILLED HUMAN BLADDER**

**Abstract.** There are currently limited studies focused on the deformation of the bladder under external static forces (e.g., falling onto a hard object). At the same time, developing new surgical techniques is impossible without preoperative methods to predict surgical outcomes. Therefore, this research specifically addressed the challenges of modeling the human bladder and its stress-strain behavior under external static loading. A method for identifying the anisotropic biomechanical properties of bladder tissue was proposed. A finite element method (FEM) model was developed, incorporating the presence of constant hydrostatic pressure on the bladder walls in the filled state.

**Keywords:** mathematical modeling, finite element modeling, bladder, biomechanics, stress-strain state

**Актуальность.** Воздействия на мочевой пузырь, например падение на твердый предмет, в некоторых случаях могут привести к тупой травме мочевого пузыря, что связано с риском развития тяжелых осложнений. В некоторых ситуациях такое воздействие приводит к повреждению или разрыву задней стенки мочевого пузыря, что крайне сложно вовремя диагностировать [1,2].

Следовательно, для правильного планирования операции на этапе поступления пациента было бы важно знать, как и насколько мочевой пузырь

мог быть поврежден в результате падения или удара. Однако, в настоящее время недостаточно работ, посвященных изучению деформации мочевого пузыря при воздействии статической силы.

**Цель.** Численное моделирование деформации наполненного мочевого пузыря человека под статической нагрузкой.

**Материалы и методы исследования.** В литературе недостаточно данных о механических характеристиках мочевого пузыря человека. Поэтому эксперименты по одноосному растяжению проводились на испытательной машине. Для проведения этого стандартизированного теста из материала вырезались образцы. Образцы были взяты из 5 человеческих мочевых пузырей. Затем образцы помещались между захватами разрывной машины и растягивались до разрыва. Разрешение на проведение исследования отражено локальным Этическим комитетом (ЛЭК) Саратовского медицинского университета «Реавиз» (протокол ЛЭК №3 от 11.02.2024). Исследование выполнено в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (в ред. 2013 г.). В каждом испытании получали данные о напряжении ( $\sigma$ ) и деформации ( $\epsilon$ ), используя площадь поперечного сечения. В дальнейшем была создана модель МКЭ (метод конечных элементов), которая учитывает наличие постоянного гидростатического давления на стенки мочевого пузыря, когда он полон.

**Результаты исследования.** Было показано, что изотропные механические характеристики биологической ткани могут быть использованы для изучения деформированного состояния наполненного мочевого пузыря, если наполненный мочевой пузырь объемом 300 мл рассматривать как начальную недеформированную стадию, что было показано при моделировании и проверке воздействия внешней статической силы на мочевой пузырь. Для подтверждения полученных результатов была проведена серия натурных экспериментов по воздействию внешнего давления на мочевой пузырь под контролем ультразвука. Ограничением построенной модели является то, что она применима только к пациентам, находящимся в вертикальном положении во время удара или упавшим на твердое тело из вертикального положения, что связано с тем, что при длительном нахождении в горизонтальном положении внутренние органы дополнительно деформируются под действием силы тяжести. Форму мочевого пузыря после такой деформации предсказать сложно, так как, скорее всего, она будет обусловлена неоднородностью окружающей клетчатки, наличием и объемом жировых отложений, а также расположением и взаимодействием внутренних органов. Другими словами, деформация внутренних органов пациента, который долгое время находился в горизонтальном положении, будет индивидуальной для каждого пациента. В дальнейших исследованиях планируется использовать этот подход для оценки силы удара, при которой происходит разрыв мочевого пузыря человека.

**Заключение.** На основе построенной модели были проведены численные эксперименты. Для подтверждения полученных результатов была проведена серия натуральных экспериментов по воздействию внешнего давления на мочевой пузырь под контролем ультразвука.

Для дальнейших исследований необходимо рассмотреть влияние эллиптической формы на деформацию мочевого пузыря. Также планируется изучить динамическое напряженно-деформированное состояние мочевого пузыря с учетом его наполненности жидкостью. Поскольку в некоторых случаях падение или удар твердого тела о мочевой пузырь приводит к разрыву задней стенки мочевого пузыря, на следующих этапах исследования необходимо изучить механизм передачи удара от передней стенки к задней и выявить условия, приводящие к повреждению тканей мочевого пузыря.

### Литература

1. Масляков, В. В. Оптимизация хирургического лечения огнестрельных ранений малого таза с повреждением внутренних половых органов у женщин / В. В. Масляков, И. А. Салов, С. А. Сидельников, С. Е. Урядов, А. В. Паршин, В. Г. Барсуков, М.А. Полиданов, Х. Д. Пападопулос, А. В. Петрич // Политравма. – 2023. – 4. – С. 13-19.
2. Масляков, В. В. Характеристика видов первой помощи при ранениях малого таза у женщин, полученных в условиях локального военного конфликта / В. В. Масляков, И. А. Салов, С. А. Сидельников, Ю. Е. Барачевский, А. В. Паршин, М. А. Полиданов // Неотложная медицинская помощь. Журнал им. Н.В. Склифосовского. – 2023. – Т. 12, №4. – С. 601-606.
4. Barulina, M. Modeling the Stress-Strain State of a Filled Human Bladder. / M. Barulina, T. Timkina, Y. Ivanov, V. Masliakov, M. Polidanov, K. Volkov // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, №17. – P. 7562. – <https://doi.org/10.3390/app14177562>