

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра математической теории
упругости и биомеханики

Биомеханический анализ тканей мочевыделительной системы

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 237 группы

направления 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

механико-математического факультета

Бызовой Милены Андреевны

Научный руководитель
д.ф.–м.н., доцент

Д.В. Иванов

подпись, дата

Зав. кафедрой
д.ф.-м.н., профессор

Л.Ю. Коссович

подпись, дата

Саратов 2023

Введение. Мочевыделительная система человека – система органов, формирующих, накапливающих и выделяющих мочу у человека [Сапина М.Р, 1997]. Ключевыми органами данной системы являются мочеточники и мочевого пузырь. Органы мочевыводящей системы находятся в очень тесной взаимосвязи друг с другом, поэтому инфекционный процесс из одной анатомической области довольно легко распространяется на другую. Различные патологические состояния органов, требующие реконструктивно-пластических операций, представляют собой сложную урологическую проблему. Наличие массы подходов к решению этой проблемы говорят о необходимости продолжения поиска новых возможностей.

Проблемы контроля мочевыводящей системы затрагивают как мужскую, так и женскую популяцию, и их диапазон весьма широк – от гиперактивного мочевого пузыря и недержания мочи до непроходимости мочевыводящих путей и рака. Анализ клинико-анатомической литературы показал, что имеется малое количество работ, посвященных прочностным характеристикам стенки мочеточников и мочевого пузыря человека. В основном исследовательские работы касаются вариантов развития и кровоснабжения органов, описывают гистотопографию и уродинамику. При этом вовлечение в патологический процесс мочеточников отмечается в 30% всех случаев и около 70% из них связано с различными морфофункциональными расстройствами его мышечной оболочки. В то же время заболеваемость раком мочевого пузыря у мужчин в мире занимает 7 место, а у женщин 17-е. Разработка более совершенных и биосовместимых конструкций имплантатов, применяемых в системах контроля для лечения пациентов с недержанием мочи, а также иные урологические проблемы представляют собой непростую задачу. В решении данной задачи большое значение имеют сведения о свойствах тканей мочеточников и мочевого пузыря, в особенности их прочностные характеристики у людей различного возраста и пола. Однако подробного изучения билатеральных и

половых различий в литературе найдено не было. Это и определяет актуальность темы данной работы.

Цель: Исследовать изменчивость прочностных свойств тканей мочеточников и мочевого пузыря человека.

Задачи:

1. Изучить морфологические параметры мочеточников и мочевого пузыря.
2. Провести натуральный эксперимент методом одноосного растяжения образцов тканей мочеточников и мочевого пузыря.
3. Рассчитать модуль Юнга для данных тканей органов.
4. Провести анализ полученных результатов.
5. Выявить статистически значимые различия прочностных характеристик тканей мочеточников и мочевого пузыря на основе полового и билатерального различия.

Магистерская работа состоит из введения, трех разделов, заключения и содержит 85 страниц.

В работе впервые, с помощью натурного эксперимента на одноосное растяжение, исследуются значения прочностных характеристик стенок мочеточников и мочевого пузыря в соответствии с их анатомическими сегментами, которые позволяют выявить статистически значимые различия этих значений в соответствии с половыми и билатеральными различиями.

Достоинством работы является предложенный комплекс мер по внедрению экспериментальных результатов в практическую урологию, количественные данные о прочностных свойствах мочеточников могут служить морфобиомеханическим обоснованием для выбора оптимального режима контактной литотрипсии, а также для расчета предельно допустимой тракции при реконструктивно-пластических операциях на этом органе у людей различного возраста и пола. Полученные константы Муни-Ривлина полезны при проведении математического моделирования искусственных сфинктеров,

имплантов и других биопротезов отделов мочевого пузыря при реконструктивных операциях.

Первые две главы магистерской работы посвящены медицинской постановке задачи. Рассмотрена нормальная анатомия мочеточников и мочевого пузыря человека.

Мочеточники – это парные полые органы, являющиеся частью мочевой системы человека. Диаметр может варьировать от 0,3 см до 0,6 см. В норме длина органа у взрослого человека составляет примерно 20-35 см, это означает, что анатомия мочеточника находится в зависимости от роста, телосложения человека, генетических индивидуальностей организма. Длина мочеточников у женщин и мужчин различна. У женщин она на 2-4 см меньше из-за анатомических особенностей. В силу того, что в организме человека почки находятся на разном уровне и развитость левой почки всегда выше, длина правого канала мочеточника меньше левого на 1-1,5 сантиметров [Васильев В.Н, 1999].

Основная роль мочеточника заключается в проталкивании жидкости от лоханок почек до полости мочевого пузыря. Продвижение жидкости внутри протоков обеспечивается перистальтикой.

Нормой является перекачивание мочи в объеме 10-14 мл в минуту. Если говорить о внутреннем давлении, то оно может "пристраиваться" к почкам, а в полости мочевого пузыря – к мочеточникам [Быков В.Л, 2015] .

Мочевой пузырь (МП) – полый мышечный орган, который предназначен для накопления урины из почек и удержания ее, перед удалением при мочеиспускании. Форма МП у сильной половины имеет более округлую форму, у представительниц прекрасного пола – овальную форму. Такое различие связано с тем, что у женской половины матка проявляет дополнительный натиск на боковую и верхнюю стороны, тем самым формируя вмятину, похожую на седло. Мочевой пузырь, состоящий из упругих тканей, может вытягиваться до определенных размеров, которые зависят от возраста, пола,

телосложения и других индивидуальностей человека. Среднестатистическая вместимость в норме у человека репродуктивного возраста составляет около 500-700 мл урины [Краев А. В, 1978].

Человек ощущает позывы к мочеиспусканию при количестве урины достигшей 140-150 мл в мочевом пузыре. Чем больше МП выделяет жидкости, тем сильнее проявляется его рефлекс. Мочеиспускание является неврологически обусловленным произвольным актом с координированным взаимодействием между спинным и головным мозгом с чередованием фаз накопления и опорожнения урины [Григорьев Р.О, 2020].

В третьей главе проведено изучение механических свойств мочеточников и мочевого пузыря. Испытания проводились на машине Instron 5944 с помощью программы Bluehill 3 для образцов мочеточников и мочевых пузырей со скоростью 10 мм/мин. Материалами исследования послужили мочеточники и мочевые пузыри, взятые при аутопсии взрослых людей (мужчины 56 лет и женщины 32 лет), причина смерти которых не связана с заболеваниями органов мочевыделительной системы. Каждый мочеточник был разделен на три сегмента для наилучшего исследования механических свойств, а мочевой пузырь – на две части. Ведь как мы ранее разобрались в их анатомо-физиологических характеристиках они различны, и наша задача как раз в этом разобраться.

В результате проведенного исследования были определены значения модуля Юнга в «рабочем» диапазоне (таблица 1,2), а также проведен сравнительный анализ полученных значений со значениями, вычисленными машиной. Кроме того, по данным натурного эксперимента построены графики зависимости напряжение-деформация (рисунок 1,2).

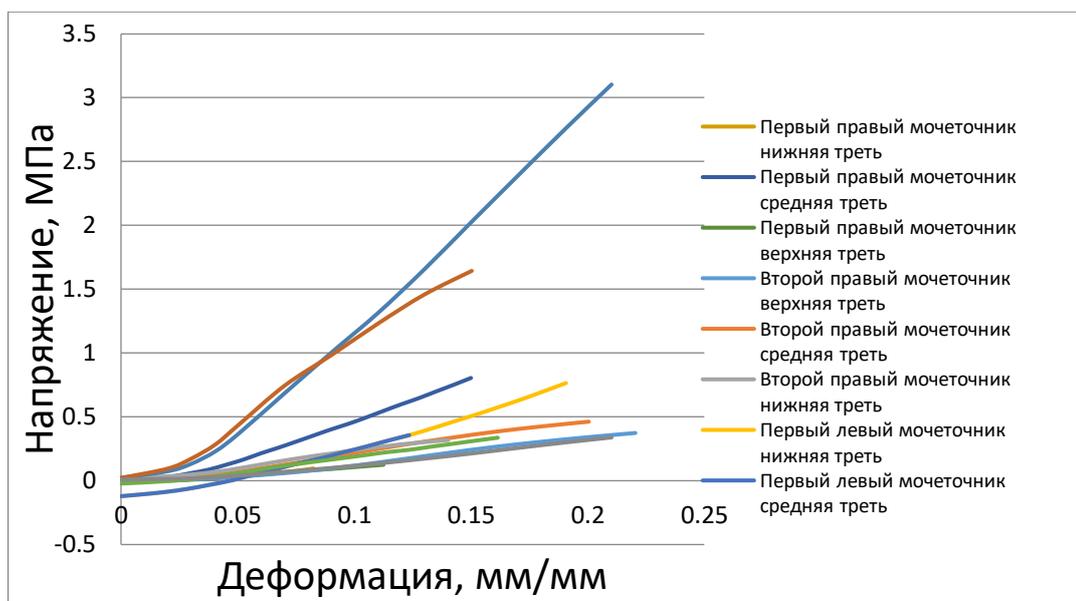


Рисунок 1 – Сводный график зависимости напряжения от деформации участков правых и левых мочеточников

Таблица 1 – Сравнение полученных значений модуля Юнга для образцов мочеточника

Наименование образца	Модуль Автоматический, МПа	Собственное значение по формуле $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, МПа	Погрешность $\delta = \left \frac{E - E_3}{E_3} \right \cdot 100\%$
Первый правый мочеточник нижняя треть	8,90	4,05	54
Второй правый мочеточник нижняя треть	1,62	3,30	103
Первый правый мочеточник средняя треть	6,21	3,90	37
Второй правый мочеточник средняя треть	3,06	3,17	3
Первый правый мочеточник верхняя треть	1,73	0,94	45,6
Второй правый мочеточник верхняя треть	3,17	3,25	2
Первый левый мочеточник нижняя треть	4,77	1,60	66,4
Второй левый мочеточник нижняя треть	16,51	16,14	2
Первый левый мочеточник средняя треть	3,24	1,80	44
Второй левый мочеточник средняя треть	16,12	17	5
Первый левый мочеточник верхняя треть	3,07	1,65	46
Второй левый мочеточник верхняя треть	1,53	1,40	8

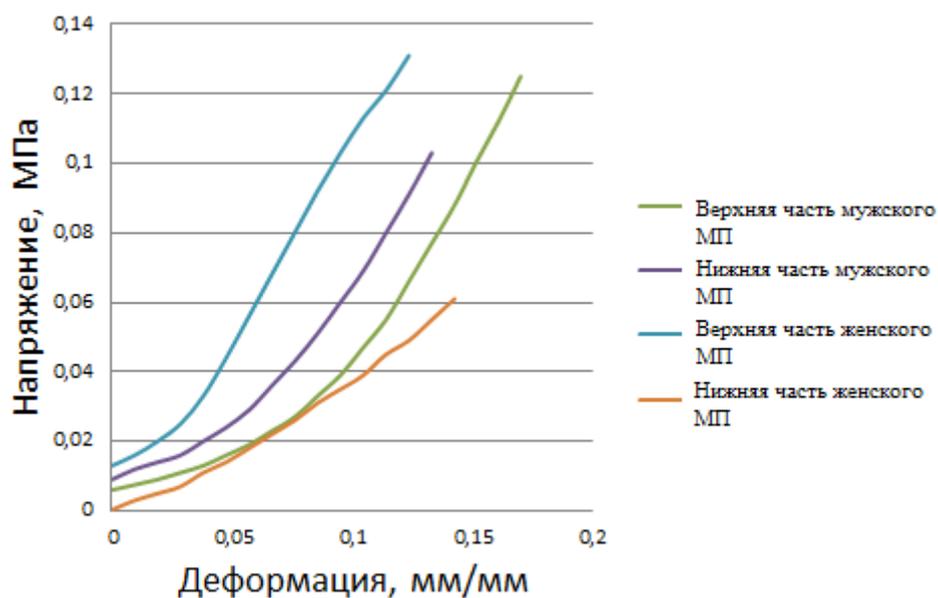


Рисунок 2 – Сводный график зависимости напряжения от деформации участков мужского и женского мочевого пузыря

Таблица 2 – Сравнение полученных значений модуля Юнга для образцов мочевого пузыря

Наименование образца	Модуль Автоматический, МПа	Модуль Юнга, рассчитанный по формуле: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, МПа	Погрешность, $\delta = \left \frac{E - E_3}{E_3} \right \cdot 100\%$
Верхняя часть мужского мочевого пузыря	0,78	0,44	43,5
Верхняя часть женского мочевого пузыря	1,31	1,08	17,5
Нижняя часть мужского мочевого пузыря,	1,03	0,65	37
Нижняя часть женского мочевого пузыря	0,50	0,37	26

В ходе проведения исследования было проведено испытание на растяжение с циклической подготовкой для образцов мочеточников и мочевого пузыря. Различия между последней и предпоследней петлями гистерезиса в каждом эксперименте были минимальны, что означает, что биологический материал был «разработан». Были построены диаграммы зависимости нагрузки от перемещения и напряжения от деформации. Было вычислено значение модуля Юнга, а также рассчитаны погрешности этого значения относительно значений, полученных с помощью программы Bluehill 3.

В результате проведенного анализа полученных данных, можно сделать несколько выводов, касающихся биомеханических параметров стенки мочеточника: так прочностные характеристики увеличиваются от верхней трети к нижней; максимальный модуль упругости, в среднем, наблюдается на стенке правого мужского и левого женского мочеточника в его нижней и средней трети, минимальный – на стенке левого женского и правого мужского мочеточника в верхней трети органа. Чем больше модуль Юнга, тем меньше деформируется стенка органа при прочих равных условиях. То есть нижнюю и среднюю треть мочеточника сложнее всего деформировать, так как к ней необходимо приложить большее усилие. В свою очередь верхняя треть образцов мочеточников (левый женский и правый мужской) обладает большей эластичностью по сравнению с остальными отделами мочеточника. Мужские мочеточники (левый и правый) показывают стабильные результаты, что говорит о достаточной податливости органа.

Верхняя часть мочевого пузыря является достаточно прочной (в особенности верхняя часть мужского мочевого пузыря), нежели нижняя часть органа. Женский мочевой пузырь обладает большей эластичностью, что довольно объяснимо физиологическими особенностями.

Для оценки механического поведения мягких тканей используются разнообразные гиперупругие модели, но самой распространенной является двухпараметрическая модель Муни-Ривлина [Иванов Д.В, 2008]. Константы двухпараметрической модели Муни-Ривлина биологических тканей рассчитывались на основании опытных кривых по результатам механических испытаний на одноосное растяжение. Расчет коэффициентов Муни-Ривлина осуществляется путем аппроксимации экспериментальных данных посредством ANSYS Workbench. По известной экспериментальной кривой нагружения были определены константы в потенциалах энергии деформации в программе ANSYS с помощью процедуры CurveFitting. Усредненные значения коэффициентов для каждого образца мочеточника и мочевого пузыря были занесены в таблицу 3 и 4 соответственно.

Таблица 3 – Коэффициенты Муни-Ривлина для мочеточников, соотнесенные по половому и билатеральному различию

Наименование образца	C_{01}	C_{10}
Правый мужской мочеточник	-11,45	10,64
Правый женский мочеточник	-2,28	2,42
Правый мочеточник	-7,36	6,53
Левый мужской мочеточник	-8,10	7,96
Левый женский мочеточник	-8,95	9,38
Левый мочеточник	-8,52	8,68

Обобщенные коэффициенты Муни-Ривлина мочеточника по полученным данным составили -8.15 и 7.60 МПа в продольном направлении.

Коэффициенты гиперупругих моделей Муни-Ривлина C_{10} и C_{01} могут быть полезны при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния биологических тканей мочеточников, а

характеристики деформационных свойств тканей – при реконструктивных вмешательствах и разработке эндопротезов.

Таблица 4 – Коэффициенты Муни-Ривлина для мочевых пузырей, соотнесенные по половому и билатеральному различию

Наименование образца	C_{01}	C_{10}
Мужской МП (верх и низ)	-0,27	0,39
Женский МП (верх и низ)	-0,15	0,25
Верхняя часть МП	-0,04	0,22
Нижняя часть МП	-0,38	0,43

Полученные константы Муни-Ривлина могут быть полезны при проведении математического моделирования искусственных сфинктеров, имплантов и других биопротезов отделов мочевого пузыря при реконструктивных операциях (например, при разработке применяемых в практике урологов сфинктерных протезов из сверхэластичного никелида титана для укрепления сфинктера мочевого пузыря).

Проведя обзор научной литературы, нашлась единственная статья, в которой исследовались упругие константы Муни-Ривлина для урогенитальных тканей человека [Муслов С.А, 2021]. В своей работе С.А. Муслов на основании опытных данных других ученых урологов в системе компьютерной алгебры Mathcad определил упругие коэффициенты Муни-Ривлина для образцов мочеточников и мочевого пузыря. Его работа посвящалась изучению механических свойств урогенитальных тканей на основании возрастной изменчивости в продольном и поперечном направлении, однако изучения по билатеральному и половому различию им не проводилось. Полученные им коэффициенты Муни-Ривлина мочеточника составили -8,93 и 7,58 МПа в продольном направлении, что достаточно хорошо совпадают с нашими данными: -8.15 и 7.60 МПа. Разница в полученных значениях составила не больше 8%. Следовательно, можем говорить об адекватности полученных

результатов в ходе исследования, численные данные которого можно широко внедрять в практическую работу урологических отделений.

Автор изучил основные механические характеристики тела и треугольника Лъето МП. На основании опытных данных других ученых урологов ему удалось в системе компьютерной алгебры Mathcad определить упругие коэффициенты Муни-Ривлина для образцов мочевого пузыря у людей различного возраста. Коэффициенты модели Муни-Ривлина, рассчитанные с помощью анализа кривых составили $-0,329$ и $0,214$ МПа у треугольника Лъето и $-0,139$ и $0,076$ МПа у тела мочевого пузыря. Так как в нижней части мочевого пузыря расположен треугольник Лъето, мы все-таки можем сравнить для наглядности обобщенные коэффициенты Муни-Ривлина полученные для нижней части МП $-0,38$ и $0,42$ МПа с данными С.А. Муслова. Разница в полученных значениях составила 13 и 48 % соответственно. Разброс значений параметров обуславливается различным выбором локального забора образцов тканей МП, а также разброс механических свойств тканей вызван их нелинейностью, неоднородностью и анизотропией, а вариабельность, по данным различных авторов, может быть обусловлена неодинаковыми экспериментальными условиями.

В изученной литературе мы не обнаружили сведений о билатеральных и половых различиях морфометрических характеристик верхней и нижней части мочевого пузыря. Поэтому полученные в настоящем исследовании данные не представляется возможным сравнить с литературными.

Заключение. Ключевыми органами мочевыделительной системы являются мочевой пузырь и мочеточники. Лечение и профилактика болезней данных органов является важной медицинской проблемой. Проводится огромное количество экспериментов для возвращения к нормальному функционированию мочевыделительной системы и качеству жизни. Несмотря на достигнутые в последние годы успехи в диагностике и лечении инфекций и

аномалий мочевыводящих путей, они продолжают оставаться одной из наиболее важных областей современной медицины.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Все поставленные задачи выполнены в полном объеме.
2. Изучены физиологические и анатомические свойства мочевого пузыря и мочеточников.

3. Проведено исследование механических свойств тканей органов. Были рассчитаны значения модуля Юнга в заданном рабочем диапазоне и найдены погрешности между полученными значениями, которые позволили сделать сравнение механических характеристик стенок органов по половому и билатеральному признакам.

4. Найдены упругие константы Муни-Ривлина для тканей мочеточников и мочевого пузыря, результаты которых были сопоставлены с результатами ученых урологов. Многочисленные совпадения с клинико-анатомической литературой позволяют рекомендовать полученные в ходе исследования результаты для биомеханического моделирования данных органов.