

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

Кафедра математической теории
упругости и биомеханики

**Анализ конечно-элементного моделирования 3D модели
мочевыделительной системы**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 237 группы

направления 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

механико-математического факультета

Плеснева Ивана Сергеевича

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 (МС) – система человека, отвечающая за выработку, накопление и отвод урины из организма. Она чрезвычайно важна для организма. Её правильная работа позволяет поддерживать нормальную концентрацию мочи, а также ее кислотно-щелочной баланс, фильтрация крови, выводя при этом все конечные продукты тканевого метаболизма, которые не могут быть повторно использованы и чаще всего бывают токсичны. Травма, потеря или дегенерация гладких мышц мочевыводящих путей могут серьезно изменить характер мочеиспускания и, следовательно, качество жизни.

Большинство исследователей говорят о том, что мочевыделительная система человека, это сложная анатомическая структура, проводя при этом ряд исследований. Органы мочевыделительной системы наиболее уязвимы по отношению к эндогенным и экзогенным токсинам, так как большинство вредных веществ выводится через почки. Ведение различных исследований, внушают определенный оптимизм, но создание ткане-инженерного импланта для любого из органов мочевыводящей системы – сложная задача, требующая взвешенного подхода, большого числа исследований и продуманного дизайна.

Для диагностики и лечения различных заболеваний, в том числе заболеваний мочевыделительных систем, исследователи используют метод конечных элементов (МКЭ). Ученые затрагивают данный способ в изучении проблем заболеваний почек и мочевыводящих путей. Данные полученные в исследовании используются при планировании реконструктивной хирургической процедуре.

Цель:

Биомеханический анализ тканей мочевыделительной системы в норме и при патологии.

Задачи:

1. Изучить анатомо-физиологические характеристики мочеточников и мочевого пузыря человека.

2. Ознакомиться с проблемой полипоза.
3. Построить 3D модель в программе для проведения трехмерного проектирования под названием SolidWorks.
4. Выполнить численный эксперимент в универсальной программе конечно-элементного моделирования – ANSYS.
5. Провести анализ полученных данных.

Магистерская работа состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованных источников и содержит 47 страниц. Актуальность выбранной темы определяется, во-первых, частотой встречаемости заболеваний мочевыделительной системы, которая по данным медицинской статистики ВОЗ занимает третье место. В том числе заболевание полипоза встречается у 10% всех пациентов урологических определений. Во-вторых, анализ клиничко-анатомической литературы показал, что подобного подробного изучения механических характеристик мочевыделительной системы в литературе представлено не было.

Достоинством работы является то, что биомеханическое моделирование на этапе диагностики и планирования хирургического лечения может быть использовано как один из инструментов оценки тяжести патологии и варианта хирургического лечения. Это говорит о важности проведения данного исследования и его практической применимости в практическую урологию.

Первые четыре главы магистерской работы посвящены медицинской постановке задачи. В них описывается нормальная анатомия мочеточников и мочевого пузыря человека, а также рассмотрены виды патологий данных органов и методы их лечения, в частности полипоз. В главе пять описаны принципы построения моделей в графическом редакторе SolidWorks, а также показана модель геометрии мочевыделительной системы в норме и с заболеванием – полипоз. В главе шесть представлена математическая постановка задачи, в которой указаны основные уравнения, необходимые для исследования модели мочевыводящей системы человека. К ним относятся -

уравнения движения, граничные и начальные условия. В главе семь проведен численный анализ построенной модели в универсальной программной системе конечно-элементного анализа – ANSYS. В заключении обсуждаются полученные результаты и делаются некоторые выводы.

Мочевыделительная система человека – система органов, формирующих, накапливающих и выделяющих мочу у человека. Состоит из пары почек, двух мочеточников, мочевого пузыря и мочеиспускательного канала.

Мочеточник – полый парный орган длиной 20-35 см и диаметром 3-8 мм. Орган располагается забрюшинно, образуя легкую синусоидальную кривую от почечной лоханки до места впадения в мочевой пузырь.

Мочевой пузырь (МП) – непарный полый мышечный орган, служащий для накопления и выведения мочи, притекающей по мочеточникам и периодически выводимой по мочеиспускательному каналу. У взрослого человека он имеет форму четырехгранника, но после заполнения становится сферическим. Мочевой пузырь расположен в переднем отделе малого таза, непосредственно за симфизом.

Заболевания мочеточников у женщин и мужчин могут иметь врожденное и приобретенное происхождение. Любой патологический процесс в органах мочевыводящего тракта, в том числе и в мочеточниках, сопровождается нарушением акта мочеиспускания, болевым синдромом, а также дизурическими расстройствами. К проявлениям заболевания относятся:

1. Острый и внезапный приступ сильной боли при быстрой ходьбе или беге.
2. Неспособность удерживать мочу.
3. Частые и очень сильные позывы в туалет. В норме считается мочеиспускание от шести до восьми раз каждые 24 часа.
4. Закупорка одного из мочеточников (уролитиаз) [Сапин М.Р, 2012] ведет к появлению симптомов общей интоксикации организма, к числу

которых относят: бледность кожных покровов, вялость, слабость, повышение общей температуры тела, выраженная тошнота.

Наиболее частой причиной заболеваний МП считается попадание в его полость инфекционных возбудителей (кишечной палочки, хламидий, стафилококков, трихомонад). Заражение может последовать непосредственно через половые органы и от прочих инфицированных органов с током крови.

Одной из серьезных проблем заболевания мочевого пузыря является полип. Полипы – это аномальное разрастание тканей, выступающих над слизистой оболочкой. Эти доброкачественные образования могут развиваться на любых органах: в носу, придаточных пазухах, на кишечнике, желудке, мочевом пузыре, в матке и на толстой кишке. Зачастую данное заболевание, передается по наследству, иногда поражая всех членов семьи. В некоторых случаях образования могут перерождаться в злокачественную ткань (рак), предрасположенную к метастазированию и поражению соседних органов, которая при отсутствии лечения представляет опасность для здоровья и жизни человека. Наиболее эффективным методом терапии является их хирургическое удаление. Как правило, операция по иссечению единичного новообразования легко переносится пациентом и не требует большого реабилитационного периода. Процедура возможна к проведению эндоскопически и с использованием лазера. При лазерном воздействии близлежащие ткани не повреждаются, а раневая поверхность очень мала, что обеспечивает скорое заживление и восстановление тканей. Но операция рекомендована далеко не всем пациентам - при хорошей гистологии врачи в некоторых случаях применяют медикаментозное лечение.

Для построения 3D модели мочевыделительной системы обратились к программе для проведения трехмерного проектирования под названием SolidWorks. Используя экспериментальные параметры, задавали физические размеры модели: толщина стенки МП варьируется от 2.5 до 3.5 миллиметров

сверху до устья соответственно, полип строился произвольного размера, внешний радиус мочеточников – 2.3 мм - 4 мм, толщина стенки 0.2 мм.

Воспользовавшись функцией программы SolidWorks *инструменты – инструменты эскиза – картинка эскиза* и для удобства построения воспользовались картинкой строения мочевой системы [Синельников Р.Д, 2018]. Выбирали плоскость эскиза, пользуясь *двумерным эскизом*, рисовали строение мочевой системы, состоящей из мочеточника, мочевого пузыря и лоханки почки (рисунок 1).

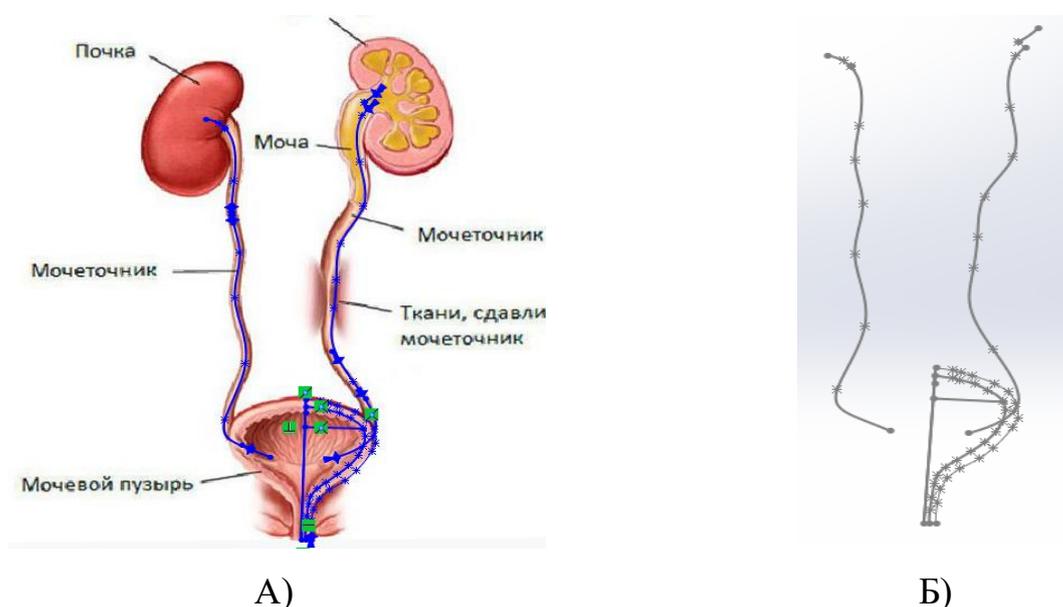
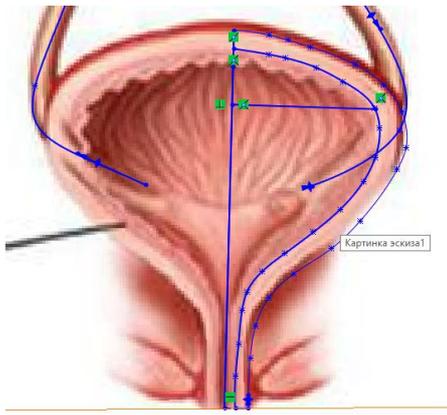
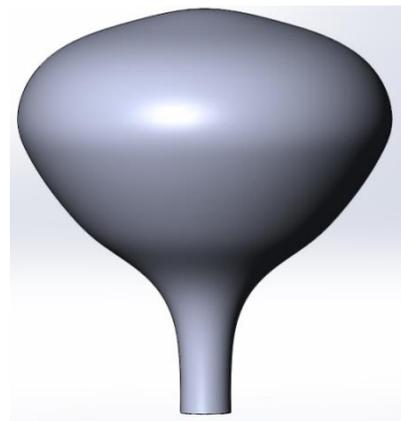


Рисунок 1 – Двумерный эскиз мочевой системы: а) используя рисунок, делаем наброски; б) полученный результат

Для построения модели мочевого пузыря необходимо выбрать плоскость эскиза, при помощи инструмента *сплайн*, в ходе которой построили контур интересующей модели. Далее рисовали прямую линию и обозначали ее осевой линией. При помощи функции *повернутая бобышка/основание* получили тонкостенную 3D модель (см. рисунок 2).



А)



Б)

Рисунок 2 – а) двумерный эскиз МП; б) полученная 3D модель

Воспользовавшись ранее построенным двумерным эскизом, строим мочеточники и лоханки. Используя *трехмерный эскиз*, строим окружности равные анатомическим свойствам. Применяя функцию *бобышка по сечению* получаем трехмерную модель мочеточников и лоханок почек. Тем самым получаем общую трехмерную геометрию мочевыделительной системы (см. рисунок 3).

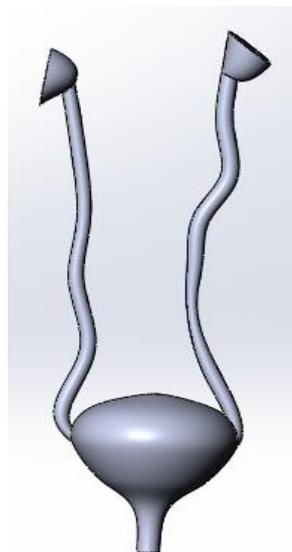


Рисунок 3 – Трехмерная модель мочевыделительной системы

Следующим шагом было построение второй 3D модели с полипозом. Для этого воспользовались уже построенной моделью мочевого пузыря, достроив в

ней полип. Создание модели новообразования пользовались функциями *двумерный эскиз* и *повернутая бобышка/основание* (см. рисунок 4). Перенеся его в мочевой пузырь получили результат, показанный на рисунке 5.

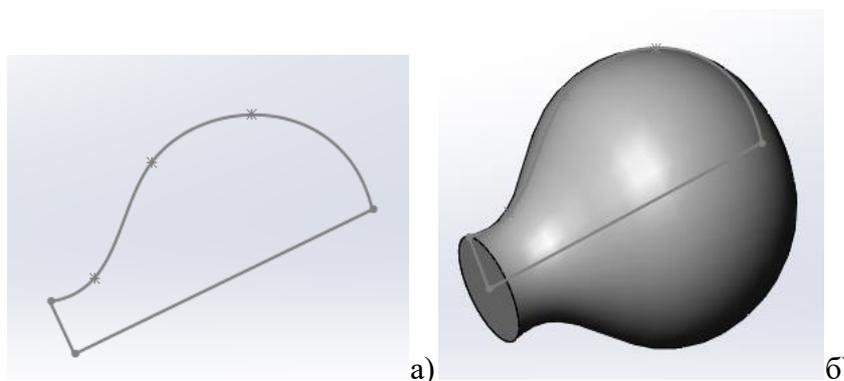


Рисунок 4 – Построение полипа: а) двумерный эскиз; б) полученный результат

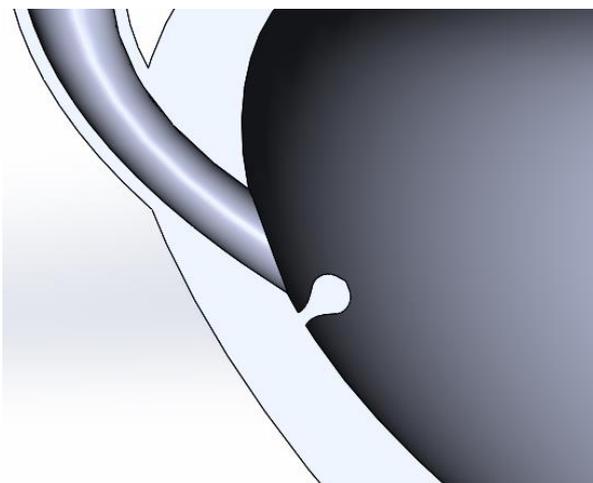


Рисунок 5 – Трехмерная геометрия мочевыделительной системы с новообразованием в МП

Для построения урины воспользуемся уже готовыми *трехмерными эскизами*, и уже известными функциями *повернутая бобышка/основание*, *бобышка по сечению*. После данных построений, на рисунке б, можно наблюдать готовые трехмерные модели (в разрезе).

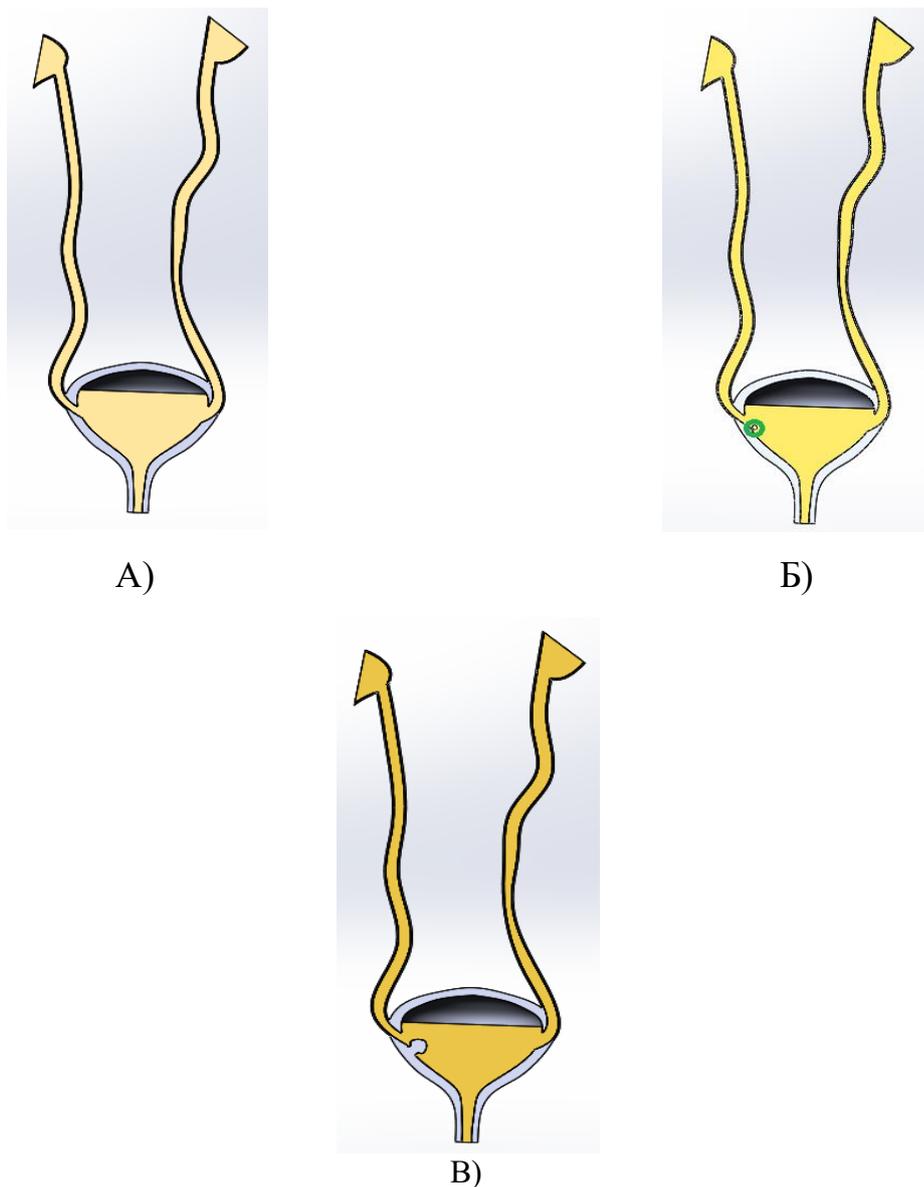


Рисунок 6 – Трехмерная геометрия мочевыделительной системы; а) здоровой системы; б) с новообразованием ранней стадии; в) с новообразованием на операционной стадии

Для дальнейших расчетов трехмерной геометрии импортировались в программную систему конечно-элементного анализа ANSYS. Для численного анализа была построена тетраэдрическая конечно элементная сетка, с количеством элементов 1672785 и количеством узлов 497565, с минимальный размером ребра в 0,002м, показанная на рисунке 7А. Для анализа гемодинамики мочевыделительной системы были проведены конечно-элементные расчеты с наложением анатомического давления. Урина переходит из лоханок почек в мочеточники под давлением величиной в 50 Па. Давление в МП задавалось с

величиной в 4000 Па (рисунок 7Б). А на выходе из шейки мочевого пузыря (уретры) отсутствует сопротивление, то есть давление равно нулю.

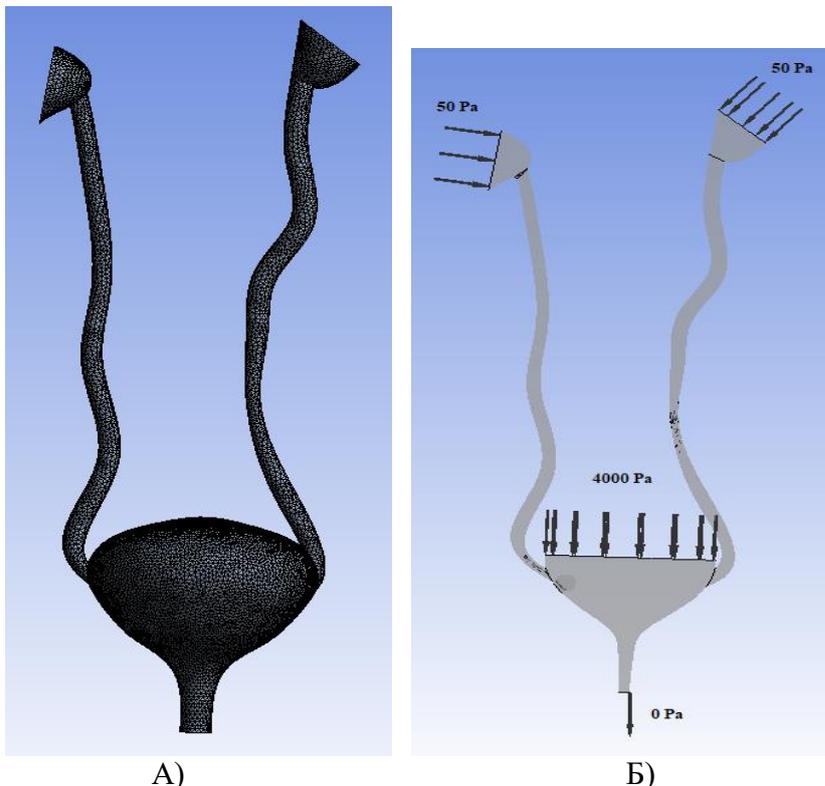
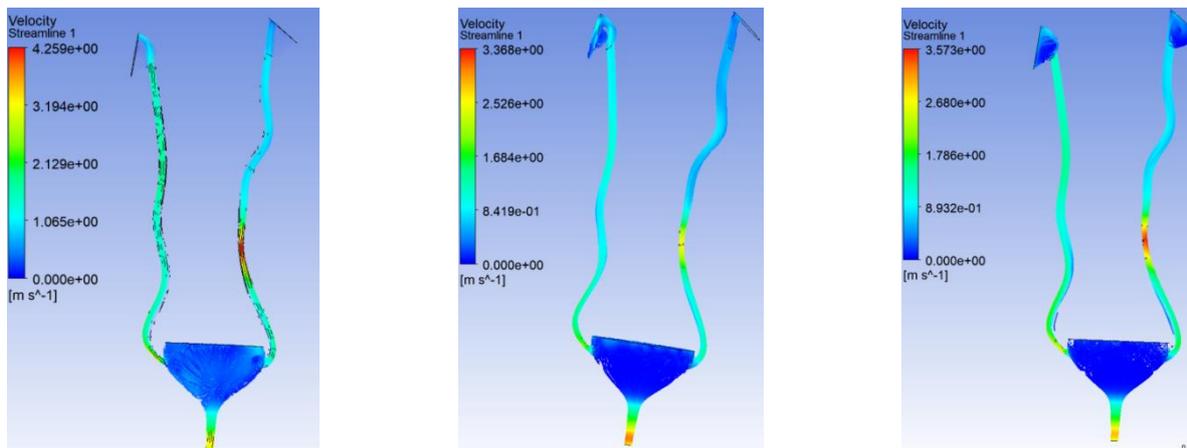


Рисунок 7 – Модель МС в ANSYS: а) конечно-элементная сетка на модели МС; б) распределение давления в исследуемой модели

При моделировании была проведена оценка гидродинамики мочевыделительной системы. В оценке результатов выявлено, что распределение скоростей в здоровом органе (рисунок 8) достигает максимальное значение в анатомическом сужении мочеточников до 4,2 м/с. Если говорить об оттоке мочи из МП, то скорость в шейке можно наблюдать в 2,6 м/с.

При проведении оценки гидродинамических характеристик МС с полипозом было выявлено: в модели с маленьким полипом, максимальная скорость достигала 2,9 м/с и находилась в шейке МП; в варианте, с полипом превосходящих размеров, можно наблюдать максимальное значение векторов скорости в мочеточнике с анатомическим сужением и шейке МП, достигала значения в 3,5 м/с.



A)

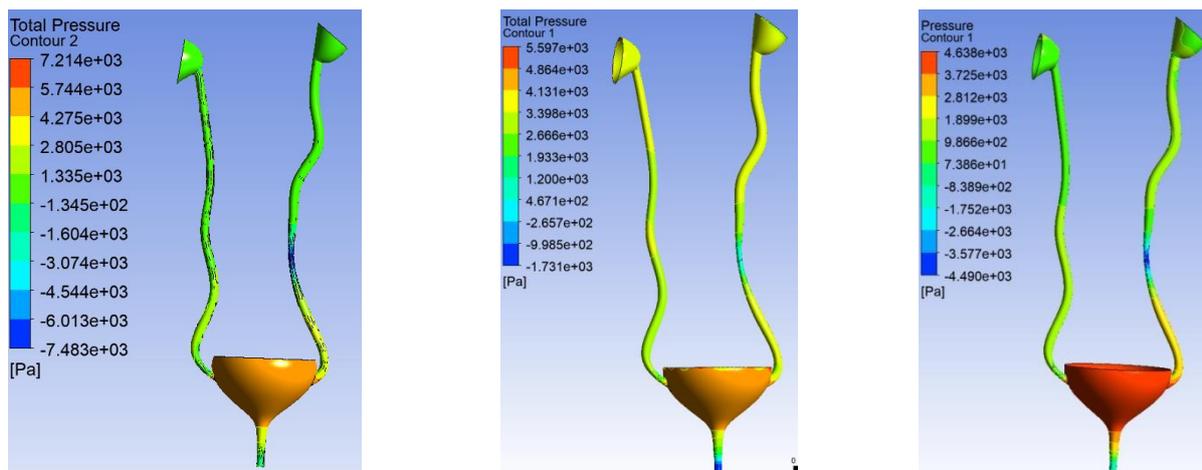
Б)

В)

Рисунок 8 – Распределение векторов скорости: а) в модели здоровой мочевыделительной системы, б) в модели мочевыделительной системы с полипозом на ранней стадии б) стадия предоперационного вмешательства

Распределение давления изображено на рисунке 21. Максимальное значение данного показателя (до $4,2 \cdot 10^3$ Па) достигается в «теле» МП. Далее наблюдается в шейке МП равномерное уменьшение давления.

Сравнивая две картины распределения давления, можно увидеть увеличение численного показателя этого параметра, они равны $4,2 \cdot 10^7$ Па и $4,6 \cdot 10^7$, соответственно, оба максимального значения находятся в МП (рисунок 9).



A)

Б)

В)

Рисунок 9 – Распределение давления: а) в модели здоровой мочевыделительной системы, б) в модели мочевыделительной системы с полипозом на ранней стадии б) стадия предоперационного вмешательства

Проведенное конечно-элементное моделирование показало, что заболевание полипоз серьезным образом влияет на биомеханические параметры мочевого пузыря. Если не наблюдать дальнейшее развитие данной патологии, это может привести к критическим последствиям.

Заключение. На сегодняшний день нет однозначного диагностического метода, позволяющего в большинстве случаев избежать проблемы открытого хирургического вмешательства для лечения органов мочевыводящей системы, поэтому поиски продолжаются.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Все поставленные задачи выполнены в полном объеме.
2. Изучили физиологические и анатомические свойства мочевыделительной системы.
3. Созданы 3D виртуальные модели мочевыделительных систем.
4. С использованием 3D виртуальных моделей мочевыделительных систем проведено конечно-элементное моделирование и анализ полученных результатов.
5. Внедрение сделанных виртуальных моделей мочевыделительных систем в урологии, на стадии предоперационного планирования, позволит оценить воздействия данной патологии на изменение основных биомеханических параметров.
6. Применяя созданные модели в диагностике и лечении мочевыделительных систем, можно в полной мере оценивать вмешательства реконструктивного хирургического лечения для конкретного пациента.