

Трехмерные модели для характеристики изменений матки и шейки матки во время беременности

Е. Н. Шалобыта

*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

enshalobyta@stud.etu.ru

И. П. Корнеева

*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

korneeva.inkorn@gmail.com

Аннотация. Основная цель исследования заключалась в оценке возможности использования изменений антропометрических параметров матки и шейки матки для контроля нормального протекания беременности и ранней диагностики её патологий. В качестве инструмента исследования использовалось компьютерное моделирование. В статье описан метод построения параметрических 3D-моделей матки и шейки матки на основе данных ультразвуковой диагностики. Полученные модели позволяют визуализировать морфологические изменения матки и шейки матки на разных сроках гестации и являются основой для выполнения биомеханического моделирования беременности.

Ключевые слова: *матка, беременность, УЗИ, параметрическое моделирование, трехмерные модели*

I. ВВЕДЕНИЕ

Тема изучения биомеханики тканей и органов человека привлекает к себе внимание всё большего количества исследователей по всему миру, на протяжении последнего десятилетия прочно удерживая за собой статус передового, многообещающего направления научной деятельности в смежных медико-технических сферах [1]. Стремительное развитие компьютерных технологий, непрерывное наращивание возможностей вычислительной техники, в совокупности с разработкой и появлением на рынке усовершенствованных, более оснащенных и точных приборов для анатомической и функциональной диагностики живого организма открывает новые перспективы в данной области. Благодаря этому становится возможным не только сократить время, затрачиваемое на решение сложных задач математического моделирования, но и увеличить глубину самого анализа [2].

Среди различных методов проведения исследований следует выделить базирующиеся на создании трехмерных моделей органов. Они могут быть как нацелены на наиболее детализированное отражение структуры органов (в основном, с применением высокоточных методов медицинской визуализации, например, компьютерной или магнитно-резонансной томографии [3–5]), так и давать более упрощенное представление об их форме и строении, фокусируясь на рассмотрении их физиологии и общей механике протекающих в них процессов [6–7]. И то, и другое возможно благодаря использованию систем автоматизированного проектирования (САПР),

существенно облегчающих моделирование биомеханических систем. Второе, как правило, сопряжено с выполнением симуляций их работы, в частности, с применением метода конечно-элементного анализа (МКЭ), который является мощным инструментом для изучения воздействия различных факторов на биологические структуры. Значительный рост интереса к МКЭ связан с его высокой информативностью и простотой использования для проведения биомеханических исследований, оценки распределения напряжений в органах и тканях, их деформаций и свойств. Что, в свою очередь, содействует разработке новых медицинских технологий и методов лечения, в том числе, адаптированных под индивидуальные параметры пациента. Помимо этого, использование МКЭ улучшает понимание этиологии патологических процессов и повышает точность предсказания их развития.

Компьютерное моделирование становится особенно актуальным при исследовании сложных биологических процессов, включающих в себя множественные взаимодействия между тканями, органами и системами организма, а также при практических или этических затруднениях с получением прямых экспериментальных данных. Беременность и роды являются одним из таких процессов.

Во время беременности многие системы в организме женщины претерпевают структурные и морфологические изменения. Меняется расположение внутренних органов, увеличивается объем циркулирующей крови, смещение центра тяжести и увеличение массы тела могут приводить к деформациям в опорно-двигательном аппарате. Однако наибольшую заинтересованность, с точки зрения компьютерного моделирования, вызывают механические изменения матки и шейки матки в процессе роста и развития плода [8]. Помимо непрерывного, на протяжении всего срока гестации, морфологического ремоделирования органов, происходит также адаптация их свойств для выполнения двойной функции. Функции «барьера» на первоначальном этапе развития плода для обеспечения его защиты, а затем хорошей сократительной функции для облегчения его выхода [9]. В связи с чем понятие о биомеханике происходящих изменений могло бы дополнить картину текущего состояния беременной на каждом из них и в различные периоды протекания беременности.

Широкие перспективы в данном случае может обеспечить разработка параметрических, то есть, легко адаптируемых под изменяющиеся значения измерений, моделей матки и шейки матки, отражающих их структуру и форму на разных сроках гестации и подходящих для дальнейшего расчета биомеханических свойств. В связи с чем, данное исследование нацелено на проектирование данных моделей с использованием инструментов САПР и оценки их применения для анализа текущего состояния беременной, раннего выявления наличия патологий. В ходе достижения цели исследования требуется выполнить следующий ряд задач:

- Подготовить математическую базу для описания формы и структуры матки;
- Построить трехмерные модели матки и шейки матки на разных сроках гестации;
- Проанализировать полученные модели для определения потенциальных маркеров в оценке протекания беременности и развития плода.

II. СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАТКИ

Физиологически матка вне наступления беременности представляет собой полый орган, массой около 50 г и объемом до 7–8 см³. 2/3 длины матки приходится на тело, 1/3 – на перешеек и шейку.

В процессе развития беременности происходит увеличение массы и объема матки. Матка «деформируется» и приобретает свойства, характерные для «физического тела», в исследовании биомеханики которого можно исходить из принципов действия основных законов физических явлений, таких как: закон сохранения энергии, работы, основные уравнения движения, определение физических величин и сил взаимодействия.

Основные виды деформации, которые претерпевает матка включают в себя растяжение (при увеличении линейных параметров постепенно в течении всего срока гестации), сжатие (после начала родов), изгиб и кручение (при изменении формы матки), и обусловлены ростом и развитием фето-плацентарного комплекса. В связи с чем предел деформации напрямую зависит от генетически определенной величины зрелого доношенного плода.

Характер возникающих в самой матке и шейке матки деформаций отличается, поэтому для выполнения биомеханического анализа следует условно выделить дно и тело матки в одну составляющую, шейку определить как некоторый отдельный нижний сегмент, а перешеек принять за границу между ними, и проводить расчеты последовательно.

Матка относительно вертикальной оси состоит из двух симметричных половин. Ось симметрии проходит вертикально по средней линии, разделяя матку на две равнозначные части. Каждая из частей матки является структурно-морфологическим независимым сегментом целого, а их взаимодействие определяется как единая целостная функциональная система.

На поздних сроках гестации объем и форму матки, заполненной околоплодной жидкостью, можно представить в виде сложной геометрической фигуры

овоида: верхняя часть – полусфера, нижняя – эллиптический параболоид – рис. 1.

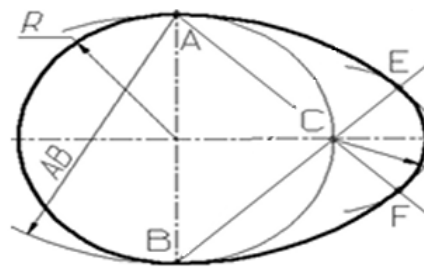


Рис. 1. Геометрическое определение формы матки на поздних сроках беременности

Такая конфигурация удобна для выполнения аналитических вычислений и математического моделирования, однако с точки зрения проектирования параметрических моделей данное приближение будет слишком грубым. При выполнении компьютерного моделирования, рекомендуется описывать форму матки через контур из четырех соединенных сегментов эллипса (более простой вариант), либо представить верхнюю часть во фронтальной плоскости матки в виде полуэллипса, т. к. деформации в ней на протяжении беременности менее значительны, а нижнюю описать при помощи базисного сплайна, что позволит точнее передать и учесть естественные изгибы маточного дна. При таком описании также возможно учесть существующую асимметричность матки относительно горизонтальной и вертикальной осей, за счет чего описание её формы получится более приближенным к естественному.

Кривые, характеризующие форму матки в аксиальной и сагиттальной плоскостях, рекомендуется определить в виде полуэллипса или как параболы.

Для задач диагностики протекания беременности наибольший интерес представляет вычисление внутреннего объема полости матки, так как он напрямую связан с размерами развивающегося плода и объемами амниотической жидкости. Во внутренний объем маточной полости также включается объем плаценты, однако он не составляет большую часть объема матки, относительно двух указанных выше параметров, поэтому может не учитываться отдельно. При внутриутробной задержке роста плода или некоторых других патологиях, объем околоплодных вод и размеры плода могут уменьшаться, следовательно, будет уменьшаться и объем внутриматочной полости [10]. А значит, концептуально он может выступать информативным индикатором нарушений течения беременности, позволяя фиксировать едва заметные уменьшения показателей.

Нижний сегмент – шейку матки – удобнее всего представить в виде цилиндра с диаметром, соответствующим внешнему диаметру цервикального канала (определяется при проведении УЗИ), и внутренней цилиндрической полостью диаметром, соответствующим внутреннему диаметру цервикального канала. Оба этих параметра являются важными диагностическими показателями при определении возможных патологий беременности [11–13], и актуальны для вычисления объемных показателей шейки матки.

Таким образом, при проектировании трехмерных моделей матки и шейки матки необходимо ориентироваться на её физические свойства и базовую геометрическую конфигурацию, чтобы верно учесть все параметры моделирования и разработать корректный алгоритм построения.

III. ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МАТКИ НА РАЗНЫХ СРОКАХ ГЕСТАЦИИ

Для разработки моделей использовалась база данных измерений УЗИ [14] беременных женщин на разных гестационных сроках. Тридцать пациенток с нормальным течением беременности проходили скрининг в двух положениях – стоя и лежа на спине для дальнейшей оценки влияния позы на изменения значений линейных параметров матки и шейки матки. В базе данных представлены данные, измеренные тремя независимыми УЗИ-специалистами для оценки корреляции значения, однако в данной работе рассматриваются модели, полученные по данным только одного специалиста.

При выполнении построения моделей учитывались значения 15 параметров, в последствии обозначенные как глобальные переменные в файле базовой трехмерной модели. Из них 10 описывают форму и структуру тела матки, а 5 характеризуют перешеек и шейку матки. Как и было описано выше, основные построения выполнялись во фронтальной плоскости. Верхняя часть матки имеет форму половинки эллипса, малый радиус которого соответствует высоте передней стенки матки, большой – половине протяженности или длины матки (вертикаль от реберных дуг до области малого таза) – рис. 2а.

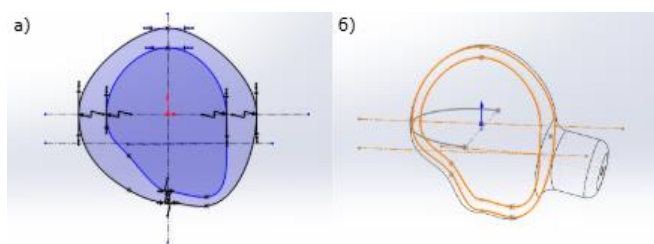


Рис. 2. Эскизы для построения моделей: а) фронтальная плоскость, б) изометрический вид

Нижняя часть отражает кривую дна матки и имеет три параметрических измерения: расстояние, измеренное вдоль вертикальной оси и два расстояния, измеренных в симметричных точках половины большего радиуса эллипса. От кривых внутреннего контура отложен внешний по измеренным параметрам толщин стенок матки – две по горизонтальной оси и одна по вертикальной.

В сагитальной плоскости отложены точки, расстояние между которыми соответствует горизонтальной протяженности или ширине матки. В аксиальной плоскости через эти точки проведена кривая-полуэллипс, отражающая форму матки в виде вытянутого эллипсоида.

Для построения сегмента цервикального канала во фронтальной плоскости дополнительно была отложена ось вертикального смещения шейки матки относительно горизонтальной оси матки, а также перпендикуляр к стенке дна матки. Через эти осевые была проведена справочная плоскость, отклонение которой от нормали

соответствует отклонению цервикального канала относительно вертикальной оси матки, измеряемому также по данным УЗИ. В этой плоскости была отложена окружность, диаметром, равным внешнему диаметру цервикального канала. После чего полученная область была вытянута на расстояние, определяющее удлинение цервикального канала. При нормальном протекании беременности оно должно постепенно уменьшаться с увеличением срока гестации. Дополнительно на то же расстояние был вытянут внутренний полый цилиндр, отражающий внутренний диаметр цервикального канала.

Полученная в итоге модель является базовой. Её параметры могут быть изменены и изменяются в зависимости от полученных измерений УЗИ, после чего модель автоматически перестраивается. Таким образом один раз выполнив построение базовой модели, можно получить множество её модификаций, отражающих динамику изменений формы матки на протяжении беременности.

Ввиду особенностей выбранной САПР и геометрической конфигурации базовой модели, некоторые из автоматически спроектированных моделей могут требовать дополнительной ручной подстройки, во избежание возникновения сообщений об ошибках построения. В основном это связано с недостаточной определенностью эскиза сплайна, фиксирующего изгибы формы дна матки. Для улучшения качества построения моделей может потребоваться разработка более точных уравнений для описания сплайна или большее количество измеряемых во время УЗИ параметров.

На рис. 3 проиллюстрированы автоматически полученные модели матки на разных сроках гестации для одной из пациенток.

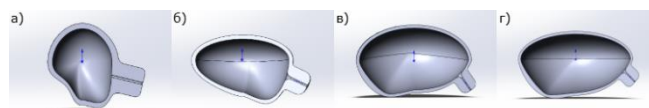


Рис. 3. Динамика изменения формы матки по срокам: а) 12-13 недель; б) 16-17 недель; в) 22-23 недели; г) 32-34 недели.

Разработанные модели наглядно и информативно отражают изменения формы матки во время беременности и могут быть использованы для дальнейшего выполнения биомеханического анализа.

IV. АНАЛИЗ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ

Система САПР SolidWorks-2021 (Dassault Systèmes, Ve'lizy Villacoublay, France), выбранная для проектирования моделей, предоставляет множество возможностей для выполнения механического анализа.

Разработанные адаптивные модели матки и шейки матки дают представление о базовой геометрии органов, их расположении и размерах. Однако они служат лишь наглядным представлением формы натурального объекта. Добавление к ним механических и электромагнитных свойств тканей, составляющих органы, позволит применить для их анализа биомеханическое моделирование, то есть, изучить их с точки зрения действия физических законов на материальное тело. В частности, при определении необходимых граничных условий к моделям может быть применен МКЭ-анализ для получения картины распределения механических нагрузок в матке на разных

сроках беременности, определения степени деформации тканей, получения векторной картины действия механических сил. Кроме того, в данном случае модели можно будет рассматривать как динамические и исследовать в системах имитационного моделирования.

Однако для корректной реализации подобного вида анализа требуется провести дополнительные исследования механических свойств тканей. Причем, данные должны быть специализированы для каждого конкретного срока гестации, так как, как уже было замечено ранее, их характеристики и выполняемые функции также подвергаются изменению в течение беременности.

Получение данной информации существенно осложнено. В связи с этим, для анализа в данной работе были выбраны более доступные расчетные параметры моделей: их массовые и объемные характеристики. Так, модели позволяют легко проследить динамику изменений общего объема матки и, отдельно, её внутренней полости, заполненной амниотической жидкостью, окружающей плод.

Для получения интересующих объемов необходимо выделить внутреннюю полость моделей и внешнюю оболочку, предполагаемые стенки матки, как отдельные тела и применить операцию расчета массовых характеристик. На рис. 4 представлен результат расчета общего объема матки (стенки и внутренняя полость) для модели матки на сроке 12–13 недель.

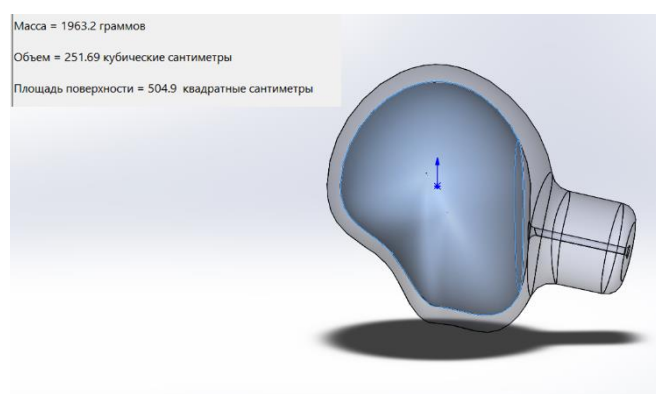


Рис. 4. Массовые характеристики общего объема матки

На рис. 5 – результат расчета объема только внутренней полости.

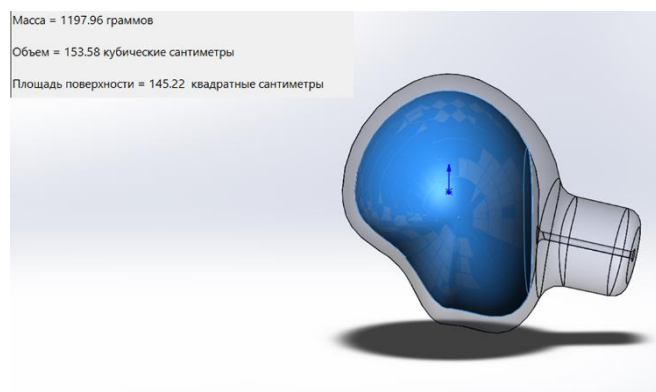


Рис. 5. Массовые характеристики внутренней полости матки

Как видно из первого рисунка, объем тела составил $251,69 \text{ см}^3$ в первом случае при массе модели $1963,2 \text{ г}$; и

$153,58 \text{ см}^3$ при массе модели $1197,96$. Если выполнить подобные расчеты для каждой модели на каждом сроке гестации можно получить, во-первых, индивидуальные картины изменения объемных параметров на протяжении беременности для каждой пациентки. Во-вторых, установить верхние и нижние границы нормальных значений для каждого параметра, что позволит в дальнейшем автоматизировать процесс отнесения отдельных значений к «норме» или «патологии» и, тем самым, повысить качество диагностики текущего состояния беременной.

Измерение общего объема матки во время беременности может дать ценные сведения о здоровье матери и плода. Общий объем матки может указывать на пространство, доступное для роста плода. Нормальное увеличение объема матки связано с адекватным ростом плода, в то время как отклонения могут указывать на потенциальные проблемы, такие как, например, внутриутробное ограничение роста. Завышенные значения объема могут указывать на такие состояния, как многоплодная беременность, или аномалии матки, в то время как малый объем матки может вызывать опасения по поводу плацентарной недостаточности. Оценка объема матки может помочь медицинским работникам в принятии обоснованных клинических решений относительно частоты мониторинга, дополнительных исследований и возможных вмешательств.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод получения параметрических трехмерных моделей матки и шейки матки, основанный на анализе данных, полученных при проведении УЗИ беременных женщин.

Разработанный метод базируется на геометрическом описании формы матки с опорой на ее физиологические характеристики. Необходимые для построения моделей параметры рассматриваются в качестве глобальных переменных и включают в себя величину маточной полости в разных направлениях, толщины маточных стенок, внешний и внутренний диаметры шейки матки, а также её смещение относительно горизонтальной оси матки и длину. Построение базовой модели матки на раннем сроке гестации позволяет автоматизировать получение моделей для более поздних сроков и проследить в динамике изменение её размеров и объема.

Построенные трехмерные модели облегчают визуализацию изменений, происходящих в матке на протяжении беременности. Они могут быть использованы для оценки механических нагрузок, расчета напряжения и деформации тканей, а также для расчета массовых и объемных характеристик матки.

Нехарактерные изменения размера матки могут являться ранними индикаторами возникновения патологии беременности, в связи с чем мониторинг этих показателей может иметь решающее значение для диагностики текущего состояния беременной женщины. Оценка объемных характеристик матки и шейки матки во время беременности может играть важную роль в дородовом наблюдении, влияя на стратегии мониторинга пациенток. По мере развития исследований, интеграция этих измерений в рутинную практику может стать более распространенной, улучшая результаты медицины матери и плода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Meijer-Hoogeveen, P. Stoutenbeek, G.H Visser. Methods of sonographic cervical length measurement in pregnancy: A review of the literature // *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, 2006. V. 19(12), pp. 755–762.
- [2] M. Jansova, L. Hyncik. Biomechanical model of pregnant female for impact purposes // *Engineering mechanics*, 2008. V. 15(4), pp. 225-240.
- [3] M. Fernandez, M. House, S. Jambawalikar, N. Zork, J. Vink, R. Wapner, K. Myers. Investigating the mechanical function of the cervix during pregnancy using finite element models derived from high-resolution 3D MRI // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2015. V. 19(4), pp.404-417.
- [4] S.M. Seyedpour, M. Nabati, L. Lambers, S. Nafisi, H.-M. Tautenhahn, I. Sack, J.R. Reichenbach, T. Ricken. Application of Magnetic Resonance Imaging in Liver Biomechanics: A Systematic Review // *Frontiers in Physiology*, 2021. V. 12.
- [5] A. Pommert, K. H. Höhne, B. Pflesser, E. Richter, M. Riemer, T. Schiemann, R. Schubert, U. Schumacher, U. Tiede. Creating a high-resolution spatial/symbolic model of the inner organs based on the Visible Human // *Medical Image Analysis*, 2001. V. 5(3), pp.221-228.
- [6] A.D. McCulloch. Systems Biophysics: Multiscale Biophysical Modeling of Organ Systems // *Biophysical Journal*. V.110(5), pp.1023-1027.
- [7] D.F. Kapraun, J.F. Wambaugh, R.W. Setzer, R.S. Judson. Empirical models for anatomical and physiological changes in a human mother and fetus during pregnancy and gestation // *PLOS ONE*, 2019. V. 14(5), e0215906.
- [8] A.R. Clark, K. Yoshida, M.L. Oyen. Computational modeling in pregnancy biomechanics research // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022. V.128, e105099.
- [9] J. Vink, V. Yu, S. Dahal. Extracellular Matrix Rigidity Modulates Human Cervical Smooth Muscle Contractility – New Insights into Premature Cervical Failure and Spontaneous Preterm Birth // *Reproductive Science*, 2021. V.28, pp.237-251.
- [10] A.B. Kurtz, W.M. Shaw, R.J. Kurtz, M.D. Rifkin, M.E. Pasto, C. Cole-Beuglet, B.B. Goldberg. The inaccuracy of total uterine volume measurements: sources of error and a proposed solution // *Journal of Ultrasound in medicine*, 1984. V. 3(7), pp.289-297.
- [11] H. Feltovich, T.J. Hall, V. Berghella. Beyond cervical length: emerging technologies for assessing the pregnant cervix // *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 2012. V. 207(5), pp.345-354.
- [12] I. Ahmed, S.R. Aldhaheri, J. Rodriguez-Kovacs, D. Narasimhulu, M. Putra, H. Minkoff, S. Haberman. Sonographic measurement of cervical volume in pregnant women at high risk of preterm birth using a geometric formula for a frustum versus 3-dimensional automated virtual organ computer-aided analysis // *Journal of Ultrasound in medicine*, 2017. V. 36(11), pp.2209-2217.
- [13] Yoshida K. Bioengineering and the cervix: The past, current, and future for addressing preterm birth // *Current Research in Physiology*, 2023. V6.
- [14] Louwagie E.M. Patient-specific parametric models of the gravid uterus and cervix from 2D Ultrasound: Ultrasound Dimensions // *Columbia University's Academic Commons*, 2020.