

УДК 531/534:57

О. В. Погребной

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОСТНО-МОЗГОВОГО КАНАЛА ТРУБЧАТЫХ КОСТЕЙ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Предложен способ построения трехмерной геометрической модели костно-мозгового канала трубчатых костей на основании поперечных срезов, получаемых с помощью мультиспиральной компьютерной томографии. Описана последовательность действий, предшествующих построению модели. В качестве практического примера предложенный способ использован при построении 3D-модели костно-мозгового канала III пястной кости. Практическое значение применения способа состоит в возможности предоставить необходимые размеры для проектирования ножек оптимальной формы при изготовлении эндопротезов.

Ключевые слова: геометрическая модель, мультиспиральная компьютерная томография, трубчатая кость, костно-мозговой канал, аппроксимация, сплайн.

Введение. Лечение повреждений кисти связано с большими трудностями, особенно в тех случаях, когда разрушающему воздействию подвержены суставы пальцев, функциональную значимость которых трудно переоценить. Наиболее тяжелыми последствиями этих травм являются контрактуры и выраженные деформации суставов, связанные со значительными дефектами суставных поверхностей. Проблема восстановления функции кисти при тяжелых внутрисуставных повреждениях остается трудной медико-социальной проблемой и комплексно решается путем проведения операции эндопротезирования суставов. Одним из важнейших принципов оперативного лечения костных дефектов, включающих суставные компоненты, является жесткая фиксация конструкции и формирование геометрически подобных контактных суставных поверхностей. Анатомическая форма импланта создает условия для лучшего контакта ножки в костномозговом канале и уменьшает вероятность вывихов и асептической нестабильности. Несмотря на многообразие конструкций фиксации и их типоразмеров, не всегда достигается оптимальное взаимодействие импланта с костью и стабильная фиксация конструкции. Учитывая длительный период функционирования имплантов, к фиксирующим элементам предъявляются повышенные требования в зонах контактных взаимодействий [6]. Строение костно-мозгового канала костей кисти изучалось в ряде работ [3 - 8].

Математическая теория геометрического моделирования достаточно подробно изложена в [1, 2]. В [1] указывается, что результатом гео-

метрического моделирования некоторого объекта является математическая модель его геометрии. Математическая модель позволяет *графически отобразить* моделируемый объект, получить его *геометрические характеристики*, выполнить *исследование* многих *физических свойств* объекта путем постановки численных экспериментов, *подготовить производство* и, наконец, *изготовить* объект. (Курсив автора [1]).

Цель работы. Построение трехмерной геометрической модели костно-мозгового канала (КМК) для вычисления размеров ножки оптимальной формы при изготовлении эндопротезов костей кисти.

Объект исследования - пястные кости кисти, являющиеся короткими трубчатыми костями.

Для построения трехмерной геометрической модели КМК предполагается выполнение следующей последовательности (алгоритма) действий (шагов).

Алгоритм построения 3D-модели.

1. Получение исходных данных.

С помощью метода мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) выполняется серия поперечных срезов изучаемого объекта.

2. Предварительный анализ исходных данных.

Серия поперечных срезов (цифровые изображения) переносятся на персональный компьютер и анализируются опытным врачом ортопедом-травматологом. При этом в каком-либо графическом редакторе на каждом поперечном срезе осуществляется расстановка набора «разделительных» точек на границе КМК и кортикальной ткани.

3. Аппроксимация контуров поперечных срезов.

Аппроксимация наборов «разделительных» точек осуществляется *B*-сплайнами. При этом используются встроенные функции современной системы компьютерной математики (СКМ).

4. Построение уравнения оси КМК.

Вычисляются координаты центров тяжести поперечных срезов. При помощи аппроксимации координат центров тяжести поперечных срезов находится уравнение оси КМК. Выполняется визуализация оси КМК. Как правило, ось КМК имеет пространственное искривление.

5. Построение параметрической функции 3D-модели.

Уравнение поверхности КМК вычисляется на основании аппроксимаций поперечных срезов. Используется аппроксимация *B*-сплайнами по двум переменным. Результат – параметрическая функция двух переменных, описывающая поверхность КМК.

6. Визуализация модели.

Построение каркасной (дискретной) модели и сплайновой (непрерывной) модели КМК.

Пункты 3 - 6 приведенного алгоритма программно реализованы в СКМ.

Заметим, что выбор системы «разделительных» точек, составляющих дискретное описание поперечных срезов (пункт 2 алгоритма), выполняется врачом травматологом, имеющим достаточный опыт в рас-

познавании анатомических особенностей расположения кортикальной и спонгиозной костных тканей.

Применение на практике. Описанный алгоритм апробирован на построении модели КМК III пястной кости. Расположение прямоугольной системы координат показано на продольном томографическом срезе центрального сагиттального сечения пястной кости, приведенном на рис. 1.

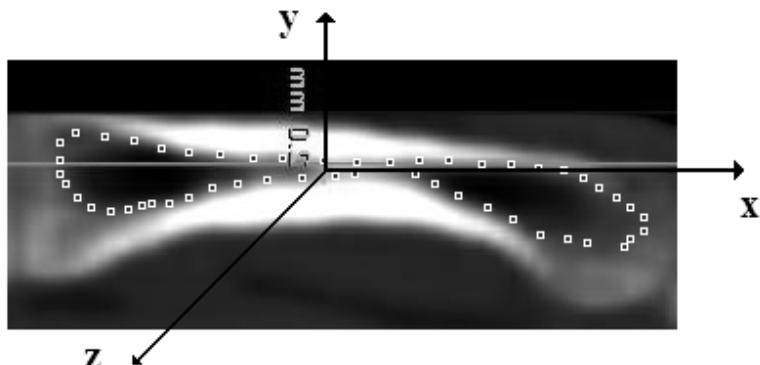


Рис. 1 - Томографический срез II пястной кости

Начало координат выбрано посередине длины кости в месте ее сужения (по горизонтали) и посередине КМК (по вертикали), ось x расположена горизонтально в дистальном направлении, ось y – под прямым углом к оси x в направлении тыльной стороны ладони. В графическом редакторе на изображение нанесены точки, обозначающие границу КМК [7].

На рис. 2 представлен поперечный томографический срез проксимальных фаланг I – V пальцев кисти. Снизу и справа на изображении приведены масштабные линейки (в сантиметрах).

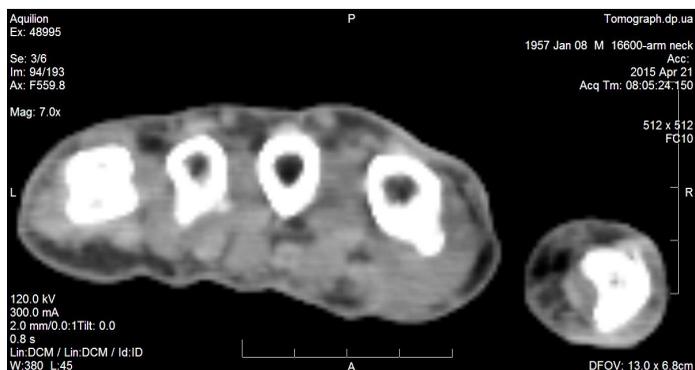


Рис. 2 - Поперечный томографический срез I – V пястных костей

Срезы выполнены через равные расстояния (2 мм) по всей длине кисти. Характерные поперечные срезы различных локализаций пястной кости III пальца представлены на рис. 3. Форма и размеры сечений КМК заметно отличаются в разных отделах кости.

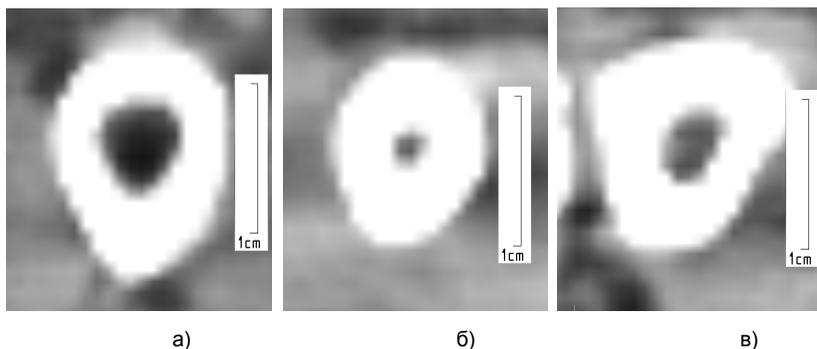


Рис. 3 – Поперечные срезы пястной кости III пальца:
а) дистальный отдел; б) средний отдел; в) проксимальный отдел

Для срезов, представленных на рис. 3, выбраны по два набора «разделительных» точек, ограничивающие границу раздела КМК и кортикальной ткани (внутренний контур) и внешнюю границу кортикального слоя. Расположение наборов «разделительных» точек и их аппроксимация В-сплайнами представлены на рис. 4.

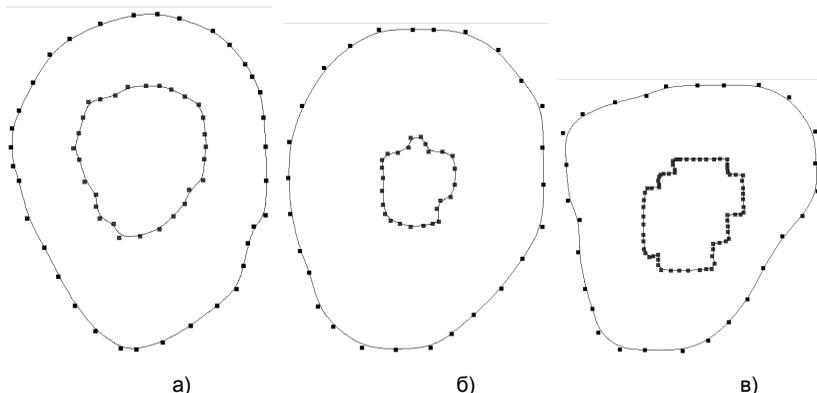


Рис. 4 – Наборы «разделительных» точек и их аппроксимация В-сплайнами:
а) дистальный отдел; б) средний отдел; в) проксимальный отдел

Согласно приведенному выше алгоритму для каждого поперечного томографического среза построены аппроксимации КМК, вычислены координаты центров тяжести.

На рис. 5 представлена геометрическая ось КМК, построенная на основании координат центров тяжести поперечных срезов. Сплошной линией представлена аппроксимация экспериментальных данных.

Средняя часть оси имеет явную выпуклость, соответствующую своду, характерному для конфигурации пястных костей.

«Разделительные» точки поперечных срезов объединены посредством процедуры аппроксимации B -сплайнами в замкнутые контуры. На каждом из контуров выбраны равные количества точек, объединенные, в свою очередь, процедурой аппроксимации в продольные кривые. На основании поперечных контуров и продольных кривых сформирована каркасная (дискретная) модель КМК, представленная на рис. 6.

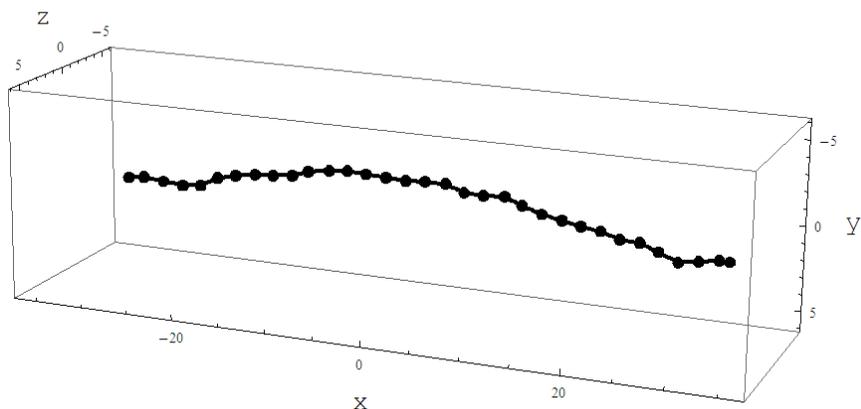


Рис. 5 - Геометрическая ось КМК

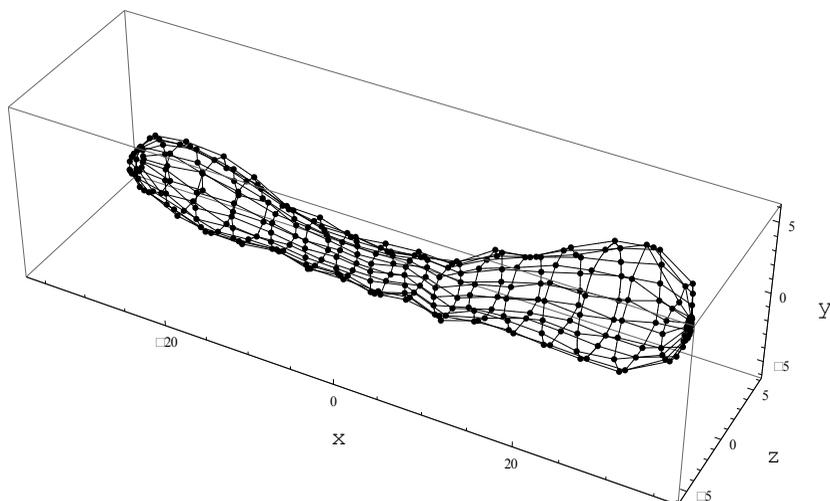


Рис. 6 - Каркасная 3D – модель КМК

Завершение разработки 3D-модели КМК осуществляется путем на-

хождения параметрической функции двух переменных $F(u, v)$. При построении поверхности КМК использовалась аппроксимация B -сплайнами по двум переменным. Сплайновая (непрерывная) 3D-модель КМК приведена на рис. 7.

Задавая определенные значения параметров u и v в пределах от 0 до 1, можно получить координаты любой точки поверхности КМК. Например, задав значения $u = 0.4$ и $v = 0.2$, получим точку с координатами $x = 20.4$ мм, $y = -2.65$ мм, $z = -1.1$ мм. Положение этой точки отмечено стрелкой на рис. 7.

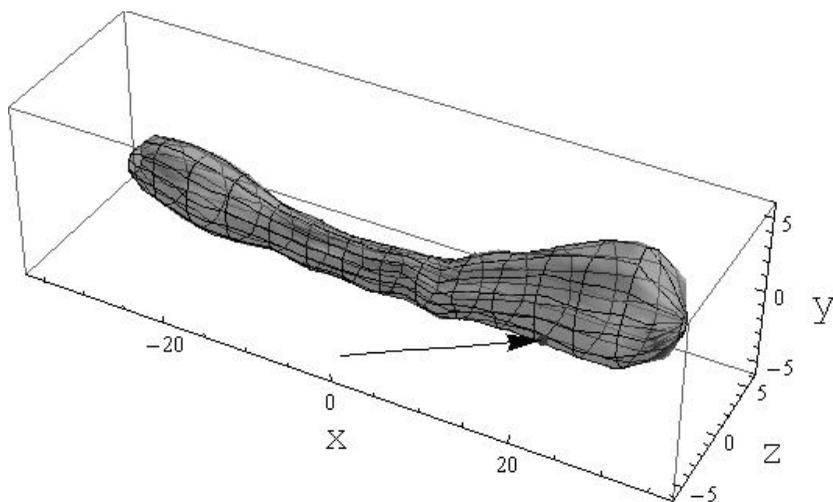


Рис. 7 - Сплайновая 3D-модель КМК

Возможность вычисления координат любой точки поверхности КМК позволяет определить необходимые размеры для изготовления ножки эндопротеза оптимальной формы.

Выводы. Предложен способ построения трехмерной геометрической модели костно-мозгового канала трубчатых костей на основании поперечных срезов, получаемых с помощью мультиспиральной компьютерной томографии. Описана последовательность действий, предшествующих построению модели. В качестве практического примера предложенный способ использован при построении 3D-модели костно-мозгового канала III пястной кости. Практическое значение применения способа построения 3D-модели костно-мозгового канала состоит в возможности предоставить необходимые размеры для проектирования ножек оптимальной формы при изготовлении эндопротезов.

Описанный способ применим для построения геометрических моделей костно-мозгового канала, а также и поверхностей любых трубчатых костей.

Автор признателен д. м. н. Науменко Л. Ю. (Днепропетровская Государственная Медицинская Академия) и к. м. н. Маметьеву А. А. (ГУ «Украинский Государст-

венний НІІІ медико-соціальних проблем інвалідності МЗ України») за предоставленні дані та конструктивне обговорення статті.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Михайленко В. Е.** Геометрическое моделирование и машинная графика в САПР: Учебник. / В. Е. Михайленко, В. Н. Кислюкий, А. А. Лященко, К. А. Сазонов, О. Ф. Цурин. – К.: Вища школа, 1991. – 374 с.
2. **Голованов Н. Н.** Геометрическое моделирование: учебник для учреждений высш. проф. образования / Н.Н. Голованов. – М.: Издательский центр "Академия", 2011. – 272 с.
3. **Маметьев А. А.** Математическое моделирование геометрической оси костномозгового канала длинных костей кисти применительно к проблеме эндопротезирования. / А. А. Маметьев, Л. Ю. Науменко, О. В. Погребной // Науково-практична конференція з міжнародною участю "Лікування травм та захворювань верхньої кінцівки", (Рівне, 18-19 вересня 2014 р.). – Рівне. – 2014. - С. 90–92.
4. **Науменко Л. Ю.** Математическое моделирование геометрической оси костномозгового канала длинных костей кисти. / Л. Ю. Науменко, А. А. Маметьев, О. В. Погребной // Травма.– 2013. –Том 14, № 5. - С. 74-76.
5. **Науменко Л. Ю.** Математическое моделирование фиксирующих элементов эндопротезов костей кисти / Л. Ю. Науменко, А. А. Маметьев, О. В. Погребной // Науковий симпозіум з міжнародною участю "Актуальні питання сучасної ортопедії та травматології", II Український симпозіум з біомеханіки опорно-рухової системи, (Дніпропетровськ, 17-18 вересня 2015 р.). – Д. : Ліра, 2015. – С. 33.
6. **Науменко Л. Ю.** Моделирование геометрической формы конструкции внутрисуставных фиксирующих элементов имплантов / Л. Ю. Науменко, А. А. Маметьев, О. В. Погребной // XVII з'їзд ортопедів-травматологів України, (Київ, 5-7 жовтня 2016 г.). –Київ. – 2016. - С. 225–226.
7. **Погребной О. В.** Определение оси костно-мозгового канала трубчатых костей по данным мультиспиральной компьютерной томографии / О. В. Погребной; Днепропетр. нац. ун-т. // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. зб. наук. праць. – Д. : Ліра. – 2014. – Вип. 22. – С. 208–221.
8. **Погребной О. В.** Вычисление объема костно-мозгового канала трубчатых костей с помощью точечного метода / О. В. Погребной; // Проблеми обчислювальної механіки конструкцій: зб. наук. праць. - Д. : Ліра. – 2015. - Вип. 24. - С. 220–231.

УДК 531/534:57

О. В. Погрібній

ПОБУДОВА ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ КІСТКОВО-МОЗКОВОГО КАНАЛУ ТРУБЧАСТИХ КІСТОК ЗА ДАНИМИ МУЛЬТІСПИРАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Запропоновано спосіб побудову тривимірної геометричної моделі кістково-мозкового каналу трубчастих кісток, ґрунтуючись на поперечних зрізах, що виконуються за допомогою мультиспиральної комп'ютерної томографії. Описана послідовність дій, що необхідні для побудови моделі. Як практичний зразок, запропонований спосіб використання при побудові 3D-моделі кістково-мозкового каналу III п'ястної кістки. Практичне значення застосування способу знаходиться у можливості обчислення розмірів для проектування ніжок оптимальної форми для виготовлення ендопротезів.

Ключові слова: геометрична модель, мультіспиральна комп'ютерна томографія, трубчаста кістка, кістково-мозковий канал, апроксимація, сплайн.

UDC 531/534:57

O. V. Pogrebnoy

DEVELOPMENT OF GEOMETRICAL MODEL OF MARROW BONE CHANNEL OF TUBULAR BONES ON THE BASE OF MULTISPIRAL COMPUTER TOMOGRAPHY DATA

A method for development of geometrical 3D-model of long tubular bones marrow bone channel was proposed. As initial data the images of cross-section made by multispiral computer tomography were used. An algorithm of the method was described. The method was tested on development of geometrical 3D-model of marrow bone channel of III bone metacarpus. The practical value of the proposed method consists in its application during project and manufacture of the optimal shape stem of endoprosthesis of metacarpus-phalange and other carpal joints.

Keywords: *geometrical model, marrow bone channel, multispiral computational tomography, approximation, spline.*

The treatment of hand injuries as usual is connected with great difficulties especially in cases of traumatic or disease damages of digit joints. The most hard consequences of that traumas are contractions and deformations of joints. One of the operation methods is an implementation of endoprosthesis. The conformity of endoprosthesis stem to the real form of bone marrow channel is one of the most important conditions for used implant. Taking into account the long term of usage the strong requirements were demanded to implants [6]. The anatomy structure of marrow channel of hand bones was investigated in series [3 – 8]. Mathematical theory of geometrical modeling was comprehensively presented in [1, 2].

The development of 3D-model of bone marrow channel with the aim to determine the necessary sizes of the optimal shape stem of endoprosthesis is the object of presented paper. The metacarpal bones were studied during this investigation.

The following algorithm (sequence) of actions was elaborated to receive 3D – model of marrow bone channel.

Algorithm for 3D-model development.

1. Preparation of initial data in form of cross-section digital images with the use of multispiral computer tomography.
2. Preliminary analysis of initial data. Placing sets of «boundary points» with divide cortical bone and marrow.
3. Approximation of cross-section contours. Forming of analytical descriptions of contours by means of B -splines.
4. Calculation of bone marrow axis equation. Calculating of the centers of mass coordinates and approximating obtained data.
5. Development of parametrical function that describes 3D-model.
6. Visualization of carcass and spline variants of surfaces of 3D-model.

For realization of 3 – 6 algorithm positions the special code was worked out in environment of modern system of computer mathematics.

The method was tested on development of geometrical 3D-model of marrow bone channel of III bone metacarpus. The cross-sections were made in the distance of 2 mm from each to other using multispiral computer tomography apparatus. The cross-sections had distinguished shape and size in different localization of the bone. The bone marrow axis equation was calculated. The parametrical function of two variables was obtained by means of *B*-splines and carcass and spline surfaces were built. The spline variant of surface is demonstrated in Fig.1.

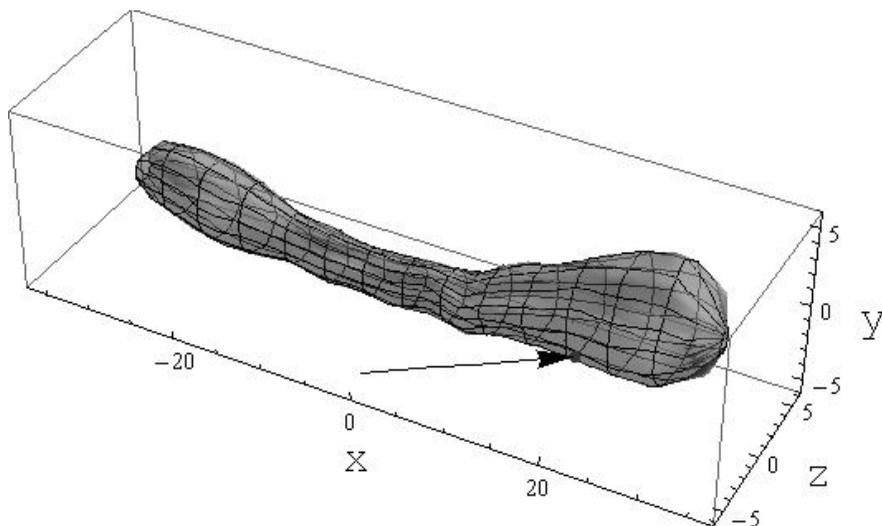


Fig. 1 - Spline surface of 3D-model

When determine definite variables in parametrical function it receive an arbitrary point on spline surface. For example, such point with parametrical coordinates (0.4, 0.2) is marked on Fig. 1 by an arrow.

The calculation of an arbitrary point coordinates gives the possibility to determine the necessary sizes of the optimal shape stem of endoprosthesis.

Conclusions. A method for development of geometrical 3D-model of tubular bones marrow bone channel was proposed. As initial data the images of cross-section made by multispiral computer tomography were used. An algorithm of the method was described. The method was tested on development of geometrical 3D-model of marrow bone channel of III bone metacarpus. The practical value of the proposed method consists in its application during project and manufacture of the optimal shape stem of endoprosthesis of metacarpus-phalange and other carpal joints. The proposed method can be used for development of geometrical 3D-model not only of marrow bone channel but also of surface of tubular bones.

REFERENCES

1. **Mikhailenko V. E.** Geometrical modeling and computer graphics in CAD: Textbook / V. E. Mikhailenko, V. N. Kislookii, A. A. Liashenko, K. A. Sazonov, O. F. Tsurin. – Kiev: Vishcha shkola, 1991. – 374 p. (in Russian).
2. **Golovanov N. N.** Geometrical modeling: textbook for departments of high professional education. / N. N. Golovanov // Publisher center «Akademia», 2011. – 272 p. (in Russian).
3. **Mametiiev A. A.** Mathematical modeling of marrow channel geometrical axis of hand long bones in application with the endoprosthesis problem / A. A. Mametiiev, L. Yu. Naumenko, O. V. Pogrebnoy // Scientific and practical conference with international participation "Likuvannya travm ta zakhvorian' verkhnoi kintsivki", (Rivne, 18-19 septembri 2014). – Rivne. – 2014. – P. 90–92. (in Russian).
4. **Naumenko L. Yu.** Mathematical modeling of marrow channel geometrical axis of hand long bones / L. Yu. Naumenko, A. A. Mametiiev, O. V. Pogrebnoy // Trauma. – 2013. – Vol. 14, No5. – P. 74-76. (in Russian).
5. **Naumenko L. Yu.** Mathematical modeling of fixing elements of hand bone endoprosthetics / L. Yu. Naumenko, A. A. Mametiiev, O. V. Pogrebnoy // Scientific symposium with international participation "Actual problems of contemporary orthopedy and traumatology", II Ukrainien symposium in biomechanics of the musculoskeletal system, (Dnipropetrovsk, 17 – 18 September 2015). – Dnipropetrovsk: Lira. - P. 33. (in Russian).
6. **Naumenko L. Yu.** Modeling of construction geometrical shape of inner joints fixing elements of implants / L. Yu. Naumenko, A. A. Mametiiev, O. V. Pogrebnoy // XVII Ukrainian congress of orthopedists and traumatologists, (Kiev, 5-7 octobri 2016.). – Kiev: 2016. – P. 225–226. (in Russian).
7. **Pogrebnoy O.V.** Calculation of axis tubular bones marrow channel on the base of multispiral computer tomography / O. V. Pogrebnoy // Problems of mechanics and strength of structures: Collection of scientific works. - Dnipropetrovsk: Lira, 2014. - Vol. 22, – P. 208-221. (in Russian).
8. **Pogrebnoy O.V.** Calculation of volume of tubular bone marrow channel by point-test / O. V. Pogrebnoy // Problems of mechanics and strength of structures: Collection of scientific articles. – Dnipropetrovsk: Lira. –2015. - Vol. 24. – P. 220-231. (in Russian).

*Днепропетровский национальный
университет им. Олеся Гончара,
Днепр, Украина*

Поступила в редколлегию 27.03.2017