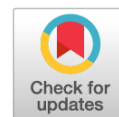


DOI: <https://doi.org/10.17816/vto321307>

Медицинский симулятор для подготовки рентген-лаборантов: экспериментальная работа

И.В. Маркин¹, К.С. Александров¹, Н.В. Варламова¹, П.К. Потапов¹, Е.А. Журбин¹,
А.Н. Матыцин¹, А.В. Ширшин², Е.С. Щелканова¹

¹ Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация;

² Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Травмы голеностопа различной природы — ушибы, растяжения, разрывы, вывихи и подвывихи, переломы — составляют 20–30% от всех возможных травм опорно-двигательного аппарата. Наиболее часто встречающимися травмами голеностопа являются разрыв и растяжение связок. Сложность лечения переломов данной локализации обусловлена необходимостью точной репозиции суставной поверхности и стабильной фиксации отломков. Актуальной задачей является практическая подготовка рентген-лаборантов. Внедрение в учебный процесс подготовки медицинских кадров на всех этапах обучающих симуляционных курсов способствует снижению ошибок, уменьшению осложнений и повышению качества оказания медицинской помощи населению.

Цель. Разработка и изготовление симулятора, имитирующего костную структуру и мягкие ткани человека и дающего возможность всесторонне подготовить и обучить рентген-лаборантов для выполнения рентгенологических исследований голеностопного сустава и стопы.

Материалы и методы. В процессе создания тренажёра выполнены следующие этапы: получение образцов костей голеностопа, изготовление формы для отливки и сборки тренажёра. Для создания образцов костей использовались результаты компьютерной и магнитно-резонансной томографии, на основе которых получена цифровая 3D-модель костей стопы и голеностопного сустава. Методом аддитивных технологий изготовлены анатомически точные копии костей стопы и голеностопного сустава человека. На следующем этапе разработана трёхмерная цифровая модель и изготовлена форма для отливки готового изделия. Внутри формы размещались образцы костей, собранные в единую структуру. Далее проводилось поэтапное заполнение формы мягким гелеподобным материалом. В данном случае выбран самовулканизирующийся состав на основе силиконового каучука, который после затвердевания имитирует мягкие ткани человека.

Результаты. В ходе работы изготовлен опытный образец медицинского симулятора, имитирующий костную структуру и мягкие ткани человека и позволяющий рентген-лаборантам получать практические навыки при выполнении рентгеновских снимков голеностопного сустава и стопы.

Заключение. Изготовленный симулятор может широко применяться в процессе подготовки и обучения рентген-лаборантов благодаря своей высокой анатомической точности, простоте использования и хорошему потенциалу для массового производства.

Ключевые слова: медицинский симулятор; аддитивные технологии; голеностопный сустав; стопа; рентгенология; тренажёр.

Как цитировать:

Маркин И.В., Александров К.С., Варламова Н.В., Потапов П.К., Журбин Е.А., Матыцин А.Н., Ширшин А.В., Щелканова Е.С. Медицинский симулятор для подготовки рентген-лаборантов: экспериментальная работа // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2023. Т. 30, № 3. С. 335–346.
DOI: <https://doi.org/10.17816/vto321307>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto321307>

Medical simulator for the training of radiologists: experimental work

Ilya V. Markin¹, Konstantin S. Alexandrov¹, Natalya V. Varlamova¹, Petr K. Potapov¹, Evgeniy A. Zhurbin¹, Anton N. Matytsin¹, Alexandr V. Shirshin², Elena S. Shchelkanova¹

¹ Military Innovation Technopolis «ERA», Anapa, Russian Federation;

² Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Ankle injuries of various nature — bruises, sprains, tears, dislocations and subluxations, and fractures — account for 20–30% of all musculoskeletal system injuries. The most common ankle injuries are a tear and sprain. The difficulty in treating fractures in this location is due to the need for accurate repositioning of the articular surface and stable fixation of fragments. The actual task is to train roentgenologists in the field. The inclusion of medical personnel in the educational process at all levels of training simulation courses aids in the reduction of errors, reduction of problems, and the improvement of the quality of medical treatment provided to the public.

OBJECTIVE: This study aims to develop and create a simulator that simulates human bone structure and soft tissues and allows roentgenologists to get through training and instruction radiological examinations of an ankle joint and a foot.

MATERIALS AND METHODS: The following stages of the simulator's development have been completed: acquiring ankle bone samples, creating a mold for casting, and constructing the simulator. The results of computer and magnetic resonance imaging were used to construct bone samples, from which a computerized 3D model of the bones of the foot and ankle joint was obtained. Using additive technologies, anatomically correct reproductions of human foot and ankle bones were made. At the next stage, a three-dimensional digital model was developed, and a mold for casting the finished product was made. Bone samples collected in a single structure were placed inside the mold. Next, a step-by-step filling of the form with a soft gel-like material was performed. In this case, a self-vulcanizing silicone rubber composition is selected, which, after solidification, imitates human soft tissues.

RESULTS: During the course of the study, a prototype medical simulator was created that models human bone structure and soft tissues and allows roentgenologists to practice performing ankle joint and foot roentgenography.

CONCLUSION: Because of its high anatomical accuracy, ease of use, and mass production potential, the developed simulator can be widely employed in the teaching of roentgenologists.

Keywords: medical simulator; additive technologies; ankle joint; foot; roentgenology; simulator.

To cite this article:

Markin IV, Alexandrov KS, Varlamova NV, Potapov PK, Zhurbin EA, Matytsin AN, Shirshin AV, Shchelkanova ES. Medical simulator for the training of radiologists: experimental work. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2023;30(3):335–346. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto321307>

ОБОСНОВАНИЕ

Травмы голеностопа различной природы — ушибы, растяжения, разрывы, вывихи и подвывихи, переломы — составляют 20–30% от всех возможных травм опорно-двигательного аппарата [1–4]. Наиболее часто встречающимися травмами голеностопа являются разрывы и растяжение связок, в некоторых случаях сопровождающиеся переломом костей [5] и отёком мягких тканей.

Кости и связки голени образуют кольцо, соединяющее большеберцовую, малоберцовую, таранную и пяточную кости. Переломы, нарушающие целостность кольца в одном месте, как правило, приводят к возникновению повреждений в другом месте. Сложность лечения переломов данной локализации обусловлена необходимостью точной репозиции суставной поверхности и стабильной фиксации отломков.

Не менее актуальной задачей является практическая подготовка рентген-лаборантов. Внедрение в учебный процесс подготовки медицинских кадров на всех этапах обучающих симуляционных курсов способствует снижению числа ошибок, уменьшению количества осложнений и повышению качества оказания медицинской помощи населению [6]. Включение в образовательные программы тренингов с применением симуляторов и электронных обучающих программ целесообразно при подготовке медицинского персонала [7–9].

За время профессиональной переподготовки по специальности «рентгенология» зачастую не все специалисты среднего звена овладевают достаточными практическими навыками для выполнения в дальнейшей клинической практике качественных рентгенологических исследований, в том числе при повреждениях и заболеваниях голеностопного сустава и стопы. Для обучения или повышения квалификации специалистов требуется более серьёзная практическая подготовка, которая малопродуктивна без качественных учебных тренажёров и моделей [10, 11].

Обучение медицинского персонала с использованием манекенов и тренажёров под наблюдением преподавателя предоставляет возможность делать ошибки в безопасной среде, что улучшает качество освоения практических навыков [12].

В настоящее время существует медицинский фантом X-Ray Phantom Foot Erler Zimmer (Erler Zimmer, Германия), использующийся при обучении рентген-лаборантов и врачей-рентгенологов работе с рентгеновскими аппаратами. Материал фантома, имитирующий мягкие ткани, не обладает гибкостью, что не позволяет изгибать изделие для имитации различных положений нижней конечности [13]. В качестве костной структуры используются натуральные человеческие кости, что может вызвать проблемы морально-этического характера. К тому же изделие характеризуется высокой ценой — порядка 400 тысяч рублей. Внешний вид фантома представлен на рис. 1.



Рис. 1. Медицинский рентгеновский фантом нижней конечности фирмы Erler Zimmer.

Fig. 1. Medical X-ray phantom of the lower limb from Erler Zimmer.

В результате анализа отечественных и зарубежных литературных источников выявлено, что существующие медицинские рентгенологические симуляторы предназначены для калибровки и настройки оборудования, в то время как обучающие симуляторы для рентгенологов присутствуют на рынке в малом количестве и, как правило, характеризуются высокой стоимостью [13, 14]. Очевидна актуальность разработки, создания и внедрения тренажёра для отработки практических навыков рентген-лаборантов при выполнении рентгенологических исследований голеностопного сустава и стопы.

Цель исследования — разработка технологии и создание простой в изготовлении и применении модели медицинского симулятора, имитирующего кости и мягкие ткани нижней трети берцовых костей и стопы человека. Костная система симулятора должна быть выполнена из рентгеноконтрастного материала с целью подготовки и обучения рентген-лаборантов проведению исследований стопы и голеностопного сустава в различных проекциях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Выполнена экспериментальная работа по созданию опытного образца медицинского симулятора для подготовки рентген-лаборантов к проведению рентгеновских исследований дистальных отделов нижних конечностей. Разработка симулятора основывается на результатах опубликованной экспериментальной работы «Медицинский симулятор для подготовки врачей-травматологов: экспериментальная работа» [15] и является её продолжением. Опыт, полученный при создании тренажёра наложения КСТ, развит и расширен при выполнении данной работы.

Условия проведения

Работа проводилась в военном инновационном технополисе «ЭРА» (г. Анапа) в период с октября 2022 по январь 2023 г.

Методы оценки целевых показателей

Процесс изготовления симулятора для подготовки рентген-лаборантов к выполнению рентгеновских исследований голеностопного сустава и стопы разделён на несколько основных этапов:

- 3D-моделирование костей нижней трети голени и стопы, подложки для анатомически верной сборки костей стопы и формы для отливки;
- изготовление анатомически точных копий костей нижней трети голени и стопы;
- изготовление подложки для анатомически верной сборки костей нижней трети голени и стопы;
- сборка всей костной системы с использованием подложки;
- изготовление формы для отливки;
- поэтапная заливка силиконового состава и экспозиция с последующей обработкой готового изделия.

В качестве исходных данных использовалась серия компьютерных томограмм дистального отдела нижних конечностей в формате DICOM, исследование выполнено в Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова. Снимки обрабатывались в программе 3D Slicer с целью получения 3D-моделей костей и внутренней поверхности формы для отливки. В программе SolidWorks 2018 на основе полученных данных создавалась трёхмерная цифровая модель формы для отливки. Далее файлы загружались в программное обеспечение ideaMaker, где производилась генерация управляющих команд для 3D-принтера на основе созданных 3D-моделей (слайсинг). Для печати моделей костей и формы для отливки использовался принтер Raise 3D Pro2 Plus (Raise3D Pioneering Flexible Manufacturing, Китай), основанный на технологии печати FDM (от англ. fused deposition modeling — моделирование методом послойного наплавления). В качестве материала для печати костей применялся полилактид (полимеризованная молочная кислота; англ. Polylactide Acid, PLA) (BestFilament, Россия). Материал для печати костей выбран исходя из более высокого значения механической прочности, чем у акрилонитрил-бутадиен-стирола (англ. Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS): прочность на изгиб — 55,3 МПа, прочность на разрыв — 57,8 МПа, модуль упругости при растяжении — 3,3 ГПа. Эти показатели позволяют ему с большей достоверностью имитировать натуральные кости человека по сравнению с другими доступными для 3D-печати видами пластиков.

В качестве материала для печати формы для отливки применялась нить из ABS диаметром 1,75 мм (BestFilament, Россия).

Условия печати: форма для отливки — температура экструдера 230 °С, температура стола 100 °С, скорость печати 60 мм/с, толщина слоя 0,2 мм, заполнение 75%; кости — температура экструдера 205 °С, температура стола 60 °С, скорость печати 40 мм/с, толщина слоя 0,2 мм, заполнение 75%. Выбор материала формы для отливки

обусловлен тем, что данный пластик легко поддаётся механической обработке, обладает высокой прочностью на изгиб — 41 МПа, предел его прочности на разрыв — 22 МПа, модуль упругости при растяжении — 1627 МПа.

Для анатомически верной сборки костной системы спроектирована и распечатана специальная подложка, позволяющая соблюсти необходимые углы между отдельными костями и верные размеры суставных щелей. При размещении костей стопы в предназначенных для них нишах складывается анатомически верная модель костной системы стопы.

Постобработка выполнялась механическим методом — отделение деталей от подложек и поддерживающих конструкций, обрезка и шлифование мелких дефектов печати. На следующей стадии распечатанные модели костей обрабатывались хлористым метиленом (ТУ 2631-019-44493179-98 с изм. 1, 2) для достижения гладкости внешних поверхностей и скреплялись между собой при помощи силиконового герметика («Монолит», Россия), а части формы — с помощью болтов (М6) и силиконового герметика.

После сборки формы на внутреннюю поверхность наносился вазелин, внутри размещались образцы костей и производилась поэтапная заливка формы силиконовой смесью, имитирующей мягкие ткани.

Заливка силиконового состава проводилась в лабораторных условиях при комнатной температуре (23–25 °С). Двухкомпонентный силиконовый состав производства SP-Polymer (Россия), отверждаемый катализатором на основе олова, обладает низкой вязкостью, коротким временем полного формования и длительным сроком эксплуатации. Для максимально достоверной имитации мягких тканей человека выбран силиконовый состав с твёрдостью по Шору А 30 единиц. Более мягкие и твёрдые образцы состава признаны неудовлетворительно передающими плотностные показатели мягких тканей. Компонент А перемешивался до однородности, переносился в лабораторный мерный стаканчик и точно дозировался (до 3-го знака после запятой) при помощи лабораторных весов. В массу компонента А (около 150 г) при помощи лабораторного дозатора вносился компонент Б — катализатор отверждения на основе олова — в соотношении 100:2. Смесью перемешивалась до однородности и заливалась в подготовленную форму.

Изделие заливалося поэтапно, после затвердевания силиконовой смеси собирался следующий ярус формы и проводилась заливка очередной порции смеси. Каждый ярус затвердевал в течение 15–20 часов при температуре 23–25 °С. Для предотвращения расслоения изделия на месте стыка ярусов формы заливка каждого яруса смеси осуществлялась до уровня в 2–3 сантиметра до верхнего среза яруса формы. С целью улучшения адгезии между слоями силиконовой смеси перед заливкой очередного слоя поверхность предыдущего затвердевшего слоя протиралась 70% раствором уксусной кислоты.

Такая обработка разрушает образующуюся на поверхности смеси оксидную плёнку и улучшает склеивание между слоями.

С целью точного и анатомически верного размещения костной структуры в толще мягких тканей использованы проволочные стяжки. Такой подход даёт возможность зафиксировать модели костей в нужном положении на время затвердевания силиконового состава. После затвердевания состава костная система оказывалась прочно и надёжно зафиксированной в правильном положении. При окончании работы с текущим ярусом формы оттяжки демонтировались и устанавливались на следующий, продолжая обеспечивать верное размещение костной системы. Общий вид поэтапной заливки силиконового состава представлен на рис. 2.

После затвердевания смеси выполнялись разборка и отделение готового изделия от формы.

Далее с помощью рентгеновского аппарата проводили рентгенографию изготовленного медицинского симулятора в прямой, боковой и косой проекциях при тех же параметрах исследования, с которыми выполняются стандартные рентгеновские снимки стопы и голеностопного сустава у пациентов.

Этическая экспертиза

Серия компьютерных томограмм получена в обезличенном виде, поэтому согласования с этическим комитетом не требовалось.

Статистический анализ

Не проводился.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели процесс создания симулятора разбит на 4 этапа, каждый из которых включает несколько стадий. Принципиальная

технологическая схема изготовления симулятора представлена на рис. 3.

Стадия 1. Изготовление анатомически точных копий костей голеностопа

Для упрощения процесса печати и обеспечения более высокого качества получаемых деталей модель костной системы разделили на 6 сегментов, которые печатались отдельно.

Полученные модели костей сохраняли в формате STL (от англ. Standard Triangulation Language — стандартный язык триангуляции) и загружали в слайсер ideaMaker с целью преобразования модели в набор управляющих инструкций и проверки целостности слоёв моделей при рассмотрении послойного печатания. По окончании проверки файл сохраняли в формате управляющих инструкций для 3D-принтера G-code и загружали в принтер.

Для печати 3D-модели применяли принтер Raise 3D Pro2 Plus и технологию печати FDM.

После снятия детали с печати проведены удаление элементов, поддерживающих конструкцию, устранение мелких артефактов и шероховатостей, шлифовка поверхностей и обработка хлористым метилом. Данные методы используются для удаления с поверхности модели крупных неровностей, образовавшихся в ходе печати, а также для удаления дефектов печати и сглаживания текстуры модели.

Стадия 2. Изготовление подложки для анатомически верной сборки костей стопы

С целью обеспечения анатомически верной сборки костной системы стопы разработана и создана подложка для сборки медицинского симулятора. Изделие спроектировано в программе для трёхмерного моделирования ZBrush. На нижней стороне модели костной системы стопы создана сплошная поверхность, повторяющая

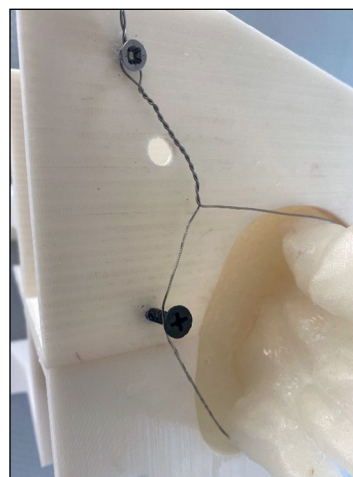


Рис. 2. Поэтапная заливка силиконового состава с установленными проволочными оттяжками.

Fig. 2. Step-by-step pouring of silicone compound with installed wire ties.

1) Создание костной системы



4) Создание формы для отливки



2) Создание подложки для сборки



5) Размещение костной системы в форме, поэтапная заливка состава



3) Сборка костной системы воедино



6) Разбор формы, готовое изделие



Рис. 3. Принципиальная технологическая схема изготовления симулятора.

Fig. 3. Basic technological scheme of simulator manufacturing.

геометрические формы нижней поверхности костей. В программе ZBrush размер полученной сплошной криволинейной поверхности увеличен на 5%. Затем при помощи функции булевой операции выполнен отпечаток нижней поверхности стопы. Полученная модель представляет собой пластину, повторяющую по контуру стопу человека, ограниченную с нижней стороны опорной плоскостью, а с верхней — углублениями для размещения костей стопы. При установке костей стопы в предназначенные для них ниши получилась анатомически верная модель костной системы стопы.

Изделие производится на 3D-принтере из филамента PLA.

Стадия 3. Сборка костной системы с использованием подложки

На данной стадии осуществлялась сборка костной системы в единое целое. Сборка начиналась с фаланг пальцев стопы. Модели костей устанавливались в соответствующих им углублениях на подложке для сборки. После расположения соседних костей их края скреплялись временной перемычкой из пластика при помощи 3D-ручки. Для этих временных связей использовался филамент ABS. После остывания пластика зафиксированное расстояние суставной щели заполнялось силиконовым герметиком. По прошествии времени, необходимого для полного отвердевания герметика, временная

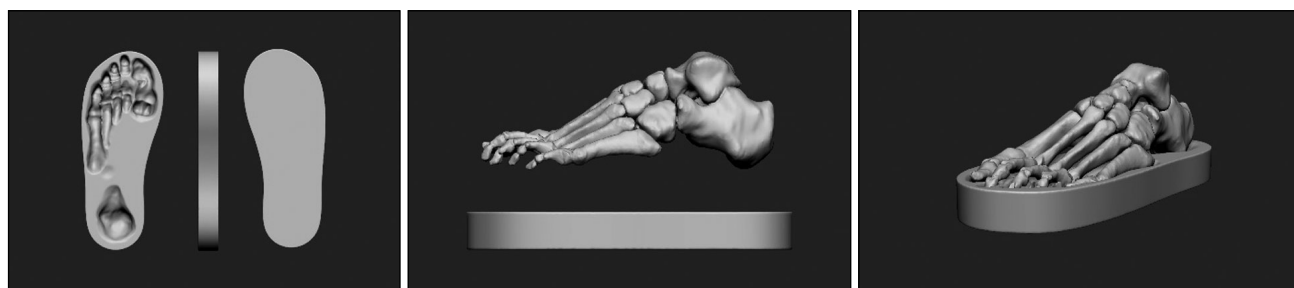


Рис. 4. 3D-модель подложки для анатомически верной сборки костей стопы.

Fig. 4. 3D substrate model for anatomically correct assembly of the foot bones.

перемычка из пластика удалялась. Трёхмерная модель подложки и способ размещения в ней костей представлены на рис. 4.

В результате постепенной сборки костей получена целостная костная система голеностопа. Костная система анатомически верна за счёт использования подложки для сборки костей стопы, фиксации размера суставной щели пластиковыми перемычками и заполнения этой щели силиконовым герметиком. Готовая система скрепляется воедино только при помощи силикона в суставных щелях, что обуславливает достаточную гибкость и подвижность конструкции.

Стадия 4. Изготовление формы для отливки

На данной стадии осуществляли изготовление формы для отливки симулятора. Моделирование и печать формы выполнялись по той же технологии, что и создание моделей костей. Ввиду ограниченности печатного пространства принтера (300×300×600 мм), а также для упрощения разборки и извлечения готового симулятора из формы модель разделили на 8 сегментов. Масса готовой формы составила 800 г без учёта болтов. Трёхмерная модель собранной формы для отливки представлена на рис. 5.

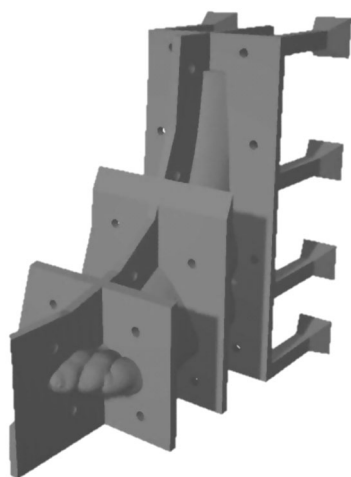


Рис. 5. Отливочная форма на этапе моделирования.

Fig. 5. Casting mould in the modelling phase.

Стадия 5. Поэтапная заливка силиконового состава

На данном этапе производилась заливка мягкой части симулятора — имитации мягких тканей конечности. Первым этапом осуществляли подбор наиболее оптимального состава материала для заливки. На основании предыдущего опыта разработки и создания медицинского симулятора при нестабильных переломах таза выбраны два вида состава. Критерием оптимальности выступала схожесть основных физико-механических характеристик затвердевшего состава с соответствующими усреднёнными характеристиками мягких тканей человека (упругость, прочность, твёрдость и т.д.). В результате сравнения используемых и доступных к приобретению пластичных составов выбран силиконовый каучук (ГОСТ 13835-73) — двухкомпонентный состав производства SP Polymer (Россия) с отвердителем на основе олова. Состав основного компонента: диметилсилоксан — 35%, полидиметилсилоксан — 30%, мелкодисперсный порошок диоксида кремния (аэросил) — 35%.

В линейке товаров данного производителя присутствуют 4 вида силиконовых составов, отличающихся цветом, прозрачностью и твёрдостью по Шору А. Использование окрашенных видов силикона не рассматривалось, так как необходимо достичь некоторой прозрачности изделия для видимости расположения костей стопы.

Неокрашенные составы присутствуют в двух видах — с твёрдостью по Шору А 10 и 30 единиц. Выбран состав с плотностью 30 единиц, так как состав с твёрдостью 10 единиц признан излишне мягким для достоверной имитации тканей организма.

Исполнение в силиконе имеет ряд преимуществ, таких как больший срок службы, отсутствие неприятного запаха, меньшее число оборудования при производстве, но стоимость используемого материала более высокая.

Далее осуществлялась заливка имитации мягких тканей путём посегментного перенесения состава в форму с размещённой внутри костной системой и производилась постобработка полученного изделия.

На внутреннюю поверхность формы наносился вазелин для облегчения последующего отделения симулятора, места стыковки заполнены силиконовым герметиком для предотвращения вытекания смеси.



Рис. 6. Заполнение формы силиконовым составом.

Fig. 6. Filling the mould with silicone compound.

Для осуществления заливки в последний ярус просверлено отверстие в самой высокой точке формы. Через отверстие при помощи шприца форма заполнялась силиконовым составом до конца. Процесс заполнения последнего яруса силиконовой смесью представлен на рис. 6.

После того как заливочный состав принимал однородную структуру, удалялись крепления, осуществлялись разборка формы и отделение её от макета, а также пост-обработка изделия. В результате был получен готовый медицинский симулятор голеностопа для подготовки и обучения рентген-лаборантов со следующими параметрами: силиконовое исполнение — масса изделия 1,2 кг, длина 25,5 см, ширина 10 см, высота 23 см. Общий вид готового симулятора представлен на рис. 7.



Рис. 7. Симулятор голеностопа после снятия отливочной формы.

Fig. 7. An ankle simulator after casting mould removal.

В процессе моделирования и производства медицинского симулятора выявлен ряд замечаний и подготовлены рекомендации для улучшения качества готового изделия и повышения его долговечности.

Ввиду того, что по мере заполнения давление на стенки и дно формы увеличивается, необходимо пересмотреть конструкцию заливочной формы, повысить плотность заполнения и количество слоёв стенки, особенно для первого яруса, на который приходится максимальная нагрузка. Аналогично — укрепить и увеличить толщину дна формы во избежание её деформации. Для улучшения показателя надёжности и безопасности формы следует дополнить количество рёбер жесткости — время изготовления увеличится примерно на 25–30%.

При применении технологии заливки силиконовой смеси в форму критически важным является неполное разовое заполнение ярусов формы. В процессе изготовления выявлено, что оптимальное заполнение яруса — не более 75%, так как смеси необходимо отстояться и затвердеть. В противном случае из-за высокого гидростатического давления смеси в форме увеличивается вероятность протекания состава между стыками ярусов и частей формы.

Перед заливкой очередного яруса поверхность затвердевшего силиконового состава обрабатывалась раствором уксусной кислоты (70%) для улучшения адгезии слоёв друг с другом и разрушения оксидного слоя на его поверхности.

В ходе постепенного наращивания числа залитых ярусов симулятора обнаружено, что фаланги пальцев костной системы упираются в верхнюю часть формы. Для обеспечения правильности размещения костной системы в толще мягких тканей напечатан дополнительный ярус формы толщиной 7 мм, что позволило увеличить общую высоту формы и анатомически верно расположить костную систему относительно поверхности симулятора.

По мере затвердевания состава необходимо осуществлять постепенное ослабление крепёжных элементов для снижения риска разрушения стенок, так как со временем фантом расширяется и возникает высокая нагрузка на форму.

На последней стадии заливки опалубки обнаружено, что после отливки и затвердевания состава в мягких тканях симулятора сохранились мелкие пузырьки воздуха, что некритично снижает плотность и анатомическую схожесть мягких тканей с тканями человека. Для устранения данной проблемы необходимо добавить стадию вибрационной обработки (простукивания формы) для упрощения и ускорения выхода пузырьков газа из плотной среды.

ОБСУЖДЕНИЕ

После завершения всех этапов сборки проводили рентгенографию медицинского симулятора левой стопы и голеностопного сустава (рис. 8) по аналогии с выполнением обзорных рентгеновских снимков стопы и голеностопного



Рис. 8. Рентгенограммы медицинского симулятора левой стопы и голеностопного сустава в прямой и боковой проекциях.

Fig. 8. Medical simulator radiographs of the left foot and ankle joint in straight and lateral projections.

сустава у пациентов. На полученных цифровых рентгеновских снимках определяются костные и мягкотканые структуры стопы и голеностопного сустава, соответствующие нормальной анатомии человека. Контуры костей медицинского симулятора ровные, чёткие. Суставные поверхности конгруэнтны, рентгеновские суставные щели прослеживаются.

Однако рентгенологическая картина медицинского симулятора всё же отличается от стандартных снимков стопы и голеностопного сустава. Кости медицинского симулятора однородны, высокой плотности, типичная костная структура не прослеживается, отсутствует дифференциация на кортикальную и губчатую кости. Мягкие ткани тренажёра также отличаются от визуализации мягких тканей при выполнении стандартной рентгенографии голеностопного сустава и стопы: отсутствует какая-либо дифференциация, ткани представлены однородной структурой с низкой плотностью. В толще мягких тканей визуализируются незначительные по размерам скопления воздуха в виде пузырьков, которые, вероятно, образовались в процессе заливки симулятора силиконом. Результаты рентгенологического исследования симулятора в виде рентгеновских снимков представлены на рис. 8.

Также несмотря на то, что у разработанного симулятора тактильное восприятие имеет относительное сходство с мягкими тканями человека, изделие не позволяет имитировать различные положения при рентгенографии.

Несмотря на имеющиеся недостатки и некоторое несоответствие в рентгенологической картине симулятора и настоящих рентгеновских снимков стопы, данный тренажёр всё же позволит повысить качество обучения рентген-лаборантов в период их профессиональной переподготовки за счёт освоения практических навыков проведения рентгенографии в разных проекциях на различных режимах аппарата и с изменением других параметров рентгенологического исследования.

Для ценового сравнения разработанного симулятора с зарубежными аналогами проведён ориентировочный расчёт стоимости основных компонентов и комплектующих

симулятора. Таким образом, ориентировочная стоимость всех основных компонентов и комплектующих симуляторов может составить 5300 рублей (в нашем случае).

Следует также отметить, что форма для отливки может быть многоразовой и использоваться при повторной заливке силиконом. Соответственно, изготовление последующих симуляторов с учётом имеющейся формы для отливки будет обходиться в 1300 рублей. Для сравнения: цена ранее представленного зарубежного аналога [13] составляет 5117 евро.

Производство разработанного симулятора является технологически простым, поэтому изготовлением данной продукции могут заниматься предприятия, владеющие технологией 3D-печати. В связи с развитием аддитивных технологий в Российской Федерации и их внедрением в повседневную деятельность медицинских организаций предложенную технологию разработки симуляторов целесообразно использовать непосредственно в медицинских учреждениях. Изготовление изделий на базе медицинских учреждений позволит воспроизводить симуляторы с учётом особенностей и задач, которые стоят перед медицинским персоналом.

Несомненным плюсом реализации данной технологии является использование доступных FDM 3D-принтеров начального уровня.

В отечественных реалиях производства и изготовления симуляторов особое место занимает импортозамещение исходных компонентов и расходных материалов. В данной экспериментальной работе разработан симулятор полностью из отечественных материалов.

Таким образом, медицинский симулятор целесообразно использовать для проведения учебно-тренировочных рентгенологических исследований, так как он позволяет рентген-лаборантам отрабатывать навыки выполнения рентгеновских снимков стопы и голеностопного сустава, правильно подбирать параметры исследования, накапливать опыт позиционирования пациента и рентгеновской трубки с целью получения качественных прицельных рентгенограмм отдельных анатомических структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен медицинский симулятор для отработки навыков выполнения рентгенологических исследований стопы и голеностопного сустава рентген-лаборантами. Полученное изделие имеет ряд недоработок и конструктивных недостатков, однако отличается низкой себестоимостью и может применяться в процессе подготовки и обучения рентген-лаборантов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку

статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Не указан.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Author's contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding source. Not specified.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенко И.В. Биомеханическое исследование состояния структур ступни при переломе наружной лодыжки // Наука настоящего и будущего. 2018. № 1. С. 418–421.
2. Li Y., Guo R., Wang Y., Ma J., Miao X., Yang J., Zhang Z., Wu X., Ren T., Jiang D. Shoe-Integrated Sensor System for Diagnosis of the Concomitant Syndesmotic Injury in Chronic Lateral Ankle Instability: A Prospective Double-Blind Diagnostic Test // *Nanomaterials* (Basel). 2023. Vol. 13, № 9. P. 1539. doi: 10.3390/nano13091539
3. Koh D., Chandrakumara D., Kon Kam King C. Incidence of Injuries Associated with Anterior Talofibular Ligament Injury Based on the Reporting of Magnetic Resonance Imaging // *Cureus*. 2023. Vol. 15, № 7. P. e41738. doi: 10.7759/cureus.41738
4. Zeng J., Xu C., Xu G., Wang D., et al. The Global Status of Research in Ankle Fracture: A Bibliometric and Visualized Study // *Front Surg*. 2022. Vol. 14, № 9. P. 853101. doi: 10.3389/fsurg.2022.853101
5. Солод Э.И., Загородний Н.В., Лазарев А.Ф., и др. Возможности оперативного лечения переломов лодыжек при проблемах кожных покровов области голеностопного сустава // Уральский медицинский журнал. 2019. № 12. С. 96–101.
6. Самохвалов И.М., Борисов М.Б., Магомедов Н.Б., Ганин Е.В. Опыт 3D-моделирования в травматологии и ортопедии // Клиническая патофизиология. 2020. Т. 26, № 1. С. 52–58.
7. Карлова Н.А., Бойцова М.Г., Зорин Я.П. Организация самостоятельной работы ординаторов по специальности «Рентгенология» с элементами симуляционного обучения // Визуализация в медицине. 2020. Т. 2, № 4. С. 3–6.
8. Венцорова Н.В., Потлов А.Ю., Тымчук Т.М. Тканеимитирующие фантомы в медицине и биологии // V Международная научно-практическая конференция «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн»; 2018; Тамбов. Режим

доступа: https://www.elibrary.ru/ip_restricted.asp?page=https%3A%2F%2Fwww%2Eelibrary%2Eru%2Fitem%2Easp%3Fid%3D37068545

9. Солдатов Ю.П. Симуляторы собственной конструкции в обучении врачей травматологов-ортопедов // Виртуальные технологии в медицине. 2019. № 2. С. 63. doi: 10.46594/2687-0037_2019_2_63
10. Кушнарев С.В., Железняк И.С., Кравчук В.Н., и др. Применение 3D-моделей сердца, созданных на основе DICOM-изображений, в медицинской практике // Лучевая диагностика и терапия. 2020. Т. 11, № 3. С. 7–13. doi: 10.22328/2079-5343-2020-11-3-7-13
11. Ramos S.M.O., Thomas S., Berdeguez M.B.T., et al. Anthropomorphic phantoms-potential for more studies and training in radiology // *Int J Radiol Radiat Ther*. 2017. Vol. 2, № 4. P. 101–104. doi: 10.15406/ijrt.2017.02.00033
12. Бондаренко Е.В., Хоронько Л.Я. Симуляционное обучение как ведущее направление развития медицины // Мир науки. Педагогика и психология. 2022. Т. 10, № 3. С. 1–7.
13. X-Ray Phantom Foot, transparent [Internet] [дата обращения 19.02.2023]. Доступ по ссылке: www.erler-zimmer.de/shop/en/9318?c=2241
14. Громов А.И., Низовцова Л.А., Петрайкин А.В., и др. Симуляционные модули в обучении и квалификационной оценке врачей и средних медработников по специальности «Рентгенология» // Виртуальные технологии в медицине. 2015. Т. 2, № 14. С. 43–44.
15. Парамонов Т.А., Маркин И.В., Ан В.Р., и др. Медицинский симулятор для подготовки врачей-травматологов: экспериментальная работа // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2022. Т. 29, № 3. С. 279–288. doi: 10.17816/vto110979

REFERENCES

1. Kondratenko IV. Biomechanical study of the foot structure at the time of the lateral malleolus fracture. *Nauka nastoyashchego i budushchego*. 2018;(1):418–421. (In Russ).
2. Li Y, Guo R, Wang Y, Ma J, Miao X, Yang J, Zhang Z, Wu X, Ren T, Jiang D. Shoe-Integrated Sensor System for Diagnosis of the

Concomitant Syndesmotic Injury in Chronic Lateral Ankle Instability: A Prospective Double-Blind Diagnostic Test. *Nanomaterials* (Basel). 2023;13(9):1539. doi: 10.3390/nano13091539

3. Koh D, Chandrakumara D, Kon Kam King C. Incidence of Injuries Associated with Anterior Talofibular Ligament Injury

Based on the Reporting of Magnetic Resonance Imaging. *Cureus*. 2023;15(7):e41738. doi: 10.7759/cureus.41738

4. Zeng J, Xu C, Xu G, Wang D, et al. The Global Status of Research in Ankle Fracture: A Bibliometric and Visualized Study. *Front Surg*. 2022;14(9):853101. doi: 10.3389/fsurg.2022.853101

5. Solod EI, Zagorodnij NV, Lazarev AF, i dr. Vozmozhnosti operativnogo lecheniya perelomov lodyzhek pri problemah kozhnykh pokrovov oblasti golenostopnogo sustava. *Ural'skij medicinskij zhurnal*. 2019;(12):96–101. (In Russ).

6. Samohvalov IM, Borisov MB, Magomedov NB, Ganin EV. Opyt 3D-modelirovaniya v travmatologii i ortopedii. *Klinicheskaya patofiziologiya*. 2020;26(1):52–58. (In Russ).

7. Karlova NA, Bojcov MG, Zorin YaP. Organizatsiya samostoyatel'noj raboty ordinatov po special'nosti «Rentgenologiya» s elementami simulyacionnogo obucheniya. *Vizualizatsiya v medicine*. 2020;2(4):3–6. (In Russ).

8. Vencerova NV, Potlov AY, Tymchuk TM. Tkaneimitiruyushchie fantomy v medicine i biologii. V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizajn»; 2018; Tambov. Available from: https://www.elibrary.ru/ip_restricted.asp?rpage=https%3A%2F%2Fwww%2Eelibrary%2Eru%2Fitem%2Easp%3Fid%3D37068545 (In Russ).

9. Soldatov YuP. Simulyatory sobstvennoj konstrukcii v obuchenii vrachej travmatologov-ortopedov. *Virtual'nye tekhnologii v medicine*. 2019;(2):63. (In Russ). doi: 10.46594/2687-0037_2019_2_63

10. Kushnarev SV, Zheleznyak IS, Kravchuk VN, i dr. Primenenie 3D-modelej serdca, sozdannykh na osnove DICOM-izobrazhenij, v medicinskoj praktike. *Luhevaya diagnostika i terapiya*. 2020;11(3):7–13. (In Russ). doi: 10.22328/2079-5343-2020-11-3-7-13

11. Ramos SMO, Thomas S, Berdeguez MBT, et al. Anthropomorphic phantoms-potential for more studies and training in radiology. *Int J Radiol Radiat Ther*. 2017;2(4):101–104. doi: 10.15406/ijrrt.2017.02.00033

12. Bondarenko EV, Khoronko LYa. Simulation training as a leading direction in the development of medicine. *Mir nauki. Pedagogika i psihologiya*. 2022;10(3):1–7. (In Russ).

13. X-Ray Phantom Foot, transparent [Internet] [cited 2023 February 19]. Available from: www.erler-zimmer.de/shop/en/9318?c=2241

14. Gromov AI, Nizovcova LA, Petryajkin AV, i dr. Simulyacionnye moduli v obuchenii i kvalifikacionnoj ocenke vrachej i srednih medrabotnikov po special'nosti «Rentgenologiya». *Virtual'nye tekhnologii v medicine*. 2015;2(14):43–44. (In Russ).

15. Paramonov TA, Markin IV, An VR, i dr. Medicinskij simulyator dlya podgotovki vrachej-travmatologov: eksperimental'naya rabota. *Vestnik travmatologii i ortopedii im. N.N. Priorova*. 2022;29(3):279–288. (In Russ). doi: 10.17816/vto110979

ОБ АВТОРАХ

* **Маркин Илья Владимирович**, к.т.н.;

адрес: Россия, Анапа, 353456, Пионерский пр., 41;

ORCID: 0000-0002-9334-910X;

eLibrary SPIN: 6021-7645;

e-mail: ilya.markin.92@bk.ru

Александров Константин Сумбатович, ефрейтор,

старший оператор 3-й научной роты;

e-mail: alexandrov.97@mail.ru

Варламова Наталья Валерьевна, д.т.н.,

старший научный сотрудник;

ORCID: 0000-0002-6100-2427;

eLibrary SPIN: 9139-6019;

e-mail: varlamova@tpu.ru

Потапов Пётр Кириллович, к.м.н.;

eLibrary SPIN: 5979-4490;

e-mail: forwardspb@mail.ru

Журбин Евгений Александрович, к.м.н.;

ORCID: 0000-0002-0867-3838;

eLibrary SPIN: 8426-1354;

e-mail: zhurbin-90@mail.ru

Матыцин Антон Николаевич, ефрейтор,

старший оператор 3-й научной роты;

e-mail: an.matysyn@gmail.com

AUTHORS' INFO

* **Ilya V. Markin**, Cand. Sci. (Tech.);

address: 41 Pionerskiy prospect, Anapa, 353456, Russia;

ORCID: 0000-0002-9334-910X;

eLibrary SPIN: 6021-7645;

e-mail: ilya.markin.92@bk.ru

Konstantin S. Alexandrov, corporal,

senior operator of the 3rd scientific company;

e-mail: alexandrov.97@mail.ru

Natalya V. Varlamova, Dr. Sci. (Tech.),

senior researcher;

ORCID: 0000-0002-6100-2427;

eLibrary SPIN: 9139-6019;

e-mail: varlamova@tpu.ru

Petr K. Potapov, MD, Cand. Sci. (Med.);

eLibrary SPIN: 5979-4490;

e-mail: forwardspb@mail.ru

Evgeniy A. Zhurbin, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-0867-3838;

eLibrary SPIN: 8426-1354;

e-mail: zhurbin-90@mail.ru

Anton N. Matysyn, corporal,

senior operator of the 3rd scientific company;

e-mail: an.matysyn@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Ширшин Александр Вадимович, аспирант,
врач-рентгенолог;
ORCID: 0000-0002-1494-9626;
eLibrary SPIN: 4412-0498;
e-mail: asmdot@gmail.com

Щелканова Елена Сергеевна, к.б.н.;
ORCID: 0000-0003-0672-8820;
eLibrary SPIN: 8396-0602;
e-mail: shchelkanova_el@mail.ru

Alexandr V. Shirshin, post-graduate student,
radiologist;
ORCID: 0000-0002-1494-9626;
eLibrary SPIN: 4412-0498;
e-mail: asmdot@gmail.com

Elena S. Shchelkanova, Cand. Sci. (Biol.);
ORCID: 0000-0003-0672-8820;
eLibrary SPIN: 8396-0602;
e-mail: shchelkanova_el@mail.ru