

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Компьютерное моделирование механического поведения аппарата Илизарова модификации Багирова / Ю.С. Лукина, Л.Л. Бионьшев-Абрамов, А.В. Сотин, П.Н. Суварлы, Д.Я. Самборский, А.Н. Клокова, А.Б. Багиров. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2024.4.02 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2024. – № 4. – С. 18–33.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 4, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.02

УДК 531/534: [57+61]



Компьютерное моделирование механического поведения аппарата Илизарова модификации Багирова

Ю.С. Лукина^{1,2}, Л.Л. Бионьшев-Абрамов¹, А.В. Сотин³, П.Н. Суварлы⁴,
Д.Я. Самборский¹, А.Н. Клокова², А.Б. Багиров^{1,5,6}

¹Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Российская Федерация

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

⁴Клиника научной медицины, Москва, Российская Федерация

⁵Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва, Российская Федерация

⁶Международная медицинская ассоциация – Университет Здоровья БРИКС, Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 14 сентября 2024

Одобрена: 14 октября 2024

Принята к публикации:

28 декабря 2024

Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства здравоохранения Российской Федерации (государственное задание «Применение рентгеноконтрастных материалов в изготовлении медицинских изделий по профилю травматология-ортопедия»).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

равноценен.

Ключевые слова:

аппарат внешней фиксации, математическая модель, аппарат Илизарова модификация Багирова, компоновка спице-стержневого аппарата, гибридный аппарат наружной фиксации, физико-механические испытания.

АННОТАЦИЯ

Разработка компьютерных моделей ортопедических изделий позволяет добавить в арсенал травматолога-ортопеда цифровой инструментарий, позволяющий рассчитать биомеханические последствия выбранной тактики реконструктивно-восстановительного лечения. Так, при использовании метода наружной чрескостной фиксации с помощью цифрового двойника аппарата Илизарова модификации Багирова оперирующий хирург на предоперационном этапе может оценить влияние выбора компоновки аппарата на риск возможной дестабилизации взаимоотношений костных фрагментов.

Клиническими показаниями к использованию аппарата Илизарова модификации Багирова являются переломы костей голени, которые составляют до 45 % случаев от всех переломов длинных костей скелета человека. Сращение переломов сопровождается большим числом осложнений, поэтому проблема улучшения результатов лечения пациентов с указанной травмой по-прежнему актуальна для современной травматологии и ортопедии. Использование аппаратов наружной фиксации позволяет также обеспечить стабильно-функциональную фиксацию костных фрагментов для устранения сложных деформаций костей конечностей. Применение компрессионно-дистракционных аппаратов позволяет расширить потенциальное использование аппаратов наружной фиксации для решения задач дистракционного остеогенеза. Биомеханические взаимоотношения в системе «кость – аппарат» являются значимым фактором, позволяющим объективизировать компоновку аппарата и режим двигательной реабилитации в раннем послеоперационном периоде.

В рамках проведенного исследования была построена математическая модель аппарата Илизарова модификации Багирова и с помощью метода конечных элементов рассчитано напряженно-деформированное состояние компонент конструкции аппарата при модельных нагрузках. Для валидации построенной компьютерной модели был проведен натурный эксперимент на универсальной испытательной машине Walter+Bai AG LFM-50. Исследуемая конструкция была подвергнута осевому сжатию нагрузкой до 1000 Н. В результате проведенного сравнительного анализа жесткости аппарата осевому сжатию, выявлено, что результаты расчета методом конечных элементов с достаточной точностью описывают результаты эксперимента. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными позволяет утверждать, что предложенная компьютерная модель корректно описывает механическое поведение исследованного медицинского изделия и может быть использована при проведении вычислительных экспериментов для оценки функциональности различных компоновок аппарата.

© Лукина Юлия Сергеевна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией разработки и испытания медицинских изделий, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова Минздрава России (127299, город Москва, ул. Приорова, 10, e-mail: lukinaYuS@cito-priogov.ru); доцент кафедры инженерного проектирования технологического оборудования, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (125047, Москва, Мусковская пл., 9, e-mail: lukina.i.s@muctr.ru).

Бионьшев-Абрамов Леонид Львович – научный сотрудник лаборатории разработки и испытания медицинских изделий, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова Минздрава России (127299, город Москва, ул. Приорова, 10, e-mail: bionyshevll@cito-priogov.ru).

Сотин Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: sotin@mail.ru).

Суварлы Первиз Низим оглы – врач травматолог-ортопед, ООО «Клиника научной медицины» (109559, Москва, Краснодарская улица, 52к2, e-mail: dr.suvarly@gmail.com).

Самборский Дмитрий Ярославович – оператор ЭВМ отдела информационного обеспечения Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова Минздрава России (127299, город Москва, ул. Приорова, 10, e-mail: samborskiyDYa@cito-priogov.ru).

Клокова Анастасия Николаевна – старший преподаватель кафедры инженерного проектирования технологического оборудования, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (125047, Москва, Мусковская пл., 9, e-mail: klokova.a.n@muctr.ru).

Багиров Акшин Бекюк Ага оглы – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник отдела повреждений опорно-двигательного аппарата и их последствий, врач травматолог отделения детской травматологии, руководитель научной группы реинженеринга метода наружной чрескостной фиксации, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова Минздрава России (127299, Москва, ул. Приорова, 10, e-mail: bagirovAB@cito-priogov.ru); профессор кафедры Перспективные материалы и технологии авиакосмического назначения, Московский Авиационный институт (государственный технический университет) (125080, Москва, Волоколамское шоссе д. 4); заведующий кафедрой Инновационной травматологии и ортопедии, Международная Медицинская Ассоциация – Университет Здоровья БРИКС (117418, Москва, ул. Профсоюзная, 25, оф. 196).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Lukina Yu.S., Bionyshev-Abramov L.L., Sotin A.V., Suvarly P.N., Samborskij D.Ya., Klokova A.N., Bagirov A.B. Computer modeling of mechanical behavior of the Ilizarov apparatus modified by Bagirov. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2024, no. 4, pp. 18–33. DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.02

MDPI and ACS Style: Lukina, Yu.S.; Bionyshev-Abramov, L.L.; Sotin, A.V.; Suvarly, P.N.; Samborskij, D.Ya.; Klokova, A.N.; Bagirov, A.B. Computer modeling of mechanical behavior of the Ilizarov apparatus modified by Bagirov. *Appl. Math. Control Sci.* **2024**, *4*, 18–33. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.4.02>

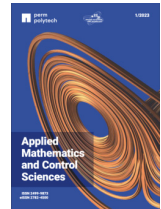
Chicago/Turabian Style: Lukina, Yulia S., Leonid L. Bionyshev-Abramov, Aleksandr V. Sotin, Perviz Nizim Suvarly, Dmitry Ya. Samborskiy, Anastasia N. Klokova and Akshin Boyuk Aga Bagirov. 2024. “Computer modeling of mechanical behavior of the Ilizarov apparatus modified by Bagirov”. *Appl. Math. Control Sci.* no. 4: 18–33. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.4.02>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES

№ 4, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.02

UDC 531/534: [57+61]



Computer modeling of mechanical behavior of the Ilizarov apparatus modified by Bagirov

Yu.S. Lukina^{1,2}, L.L. Bionyshev-Abramov¹, A.V. Sotin³, P.N. Suvarly⁴,
D.Ya. Samborskij¹, A.N. Klokova², A.B. Bagirov¹

¹Priorov National Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russian Federation

²D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

⁴Scientific Medicine Clinic LLC, Moscow, Russian Federation

⁵Moscow Aviation Institute (State Technical University), Moscow, Russian Federation

⁶International Medical Association – BRICS Health University, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 September 2024

Approved: 14 October 2024

Accepted for publication:
28 December 2024

Funding

The scientific research was carried out within the framework of the state assignment “Application of non-radiopaque materials in the manufacture of medical products in the field of traumatology - orthopedics” and was financed by the Ministry of Health of the Russian Federation.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions

equivalent.

Keywords:

external fixation apparatus; mathematical model; Ilizarov apparatus modified by Bagirov; spoke-rod apparatus layout; hybrid external fixation apparatus; physical and mechanical tests.

ABSTRACT

The development of computer models of orthopedic products allows adding to the arsenal of a trauma surgeon a digital toolkit that allows to calculate the biomechanical consequences of the chosen tactics of reconstructive and restorative treatment. Thus, when using percutaneous osteosynthesis systems with the help of a digital twin of the external fixation apparatus, the operating specialist at the preoperative stage can assess the influence of the choice of the apparatus layout on the risk of possible separation of bone fragments.

Clinical indications for the use of the Ilizarov apparatus of the Bagirov modification are fractures of diaphyses of the tibia bones, which account for up to 45 % of all fractures of long bones of the human skeleton. Fracture healing is accompanied by a large number of complications, so the problem of improving the results of treatment of patients with this injury is still relevant for modern traumatology and orthopedics. The use of external fixation devices makes it possible to ensure stable functional osteosynthesis and eliminate the need for plaster immobilization of the segment or limb in the postoperative period. The use of compression-distraction devices allows us to expand the potential use of external fixation devices to solve the problems of distraction osteogenesis. Biomechanical relationships in the bone-apparatus system are a significant factor that allows objectifying the apparatus layout and the mode of motor rehabilitation in the early postoperative period.

Within the framework of this study, a mathematical model of the Ilizarov apparatus of the Bagirov modification was constructed and the stress-strain state of the apparatus components under model loads was calculated using the finite element method. To validate the computer model, a field experiment was conducted on a Walter+Bai AG LFM-5 universal testing machine. The investigated structure was subjected to axial compression with a load up to 1000 N. As a result of the comparative analysis of the resistance of the device to axial compression, it was found that the results of finite element calculations describe the experimental results with sufficient accuracy. Comparison of the calculation results with experimental data allows us to state that the proposed computer model correctly describes the mechanical behavior of the studied medical device and can be used in computational experiments to assess the functionality of various device layouts.

© Yulia S. Lukina – PhD, Head of the Laboratory for development and testing of medical products and materials, National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov, Ministry of Health of the Russian Federation (10 Priorova ul., Moscow, 127299, e-mail: lukinaYuS@cito-priorov.ru); Associate Professor of the Faculty of Digital Technologies and Chemical Engineering, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9 Miusskaya Pl., Moscow, 125047).

Leonid L. Bionyshev-Abramov – Research Assistant of the Laboratory for development and testing of medical products and materials, National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov, Ministry of Health of the Russian Federation (10 Priorova ul., Moscow, 127299, e-mail: bionyshevl@cito-priorov.ru).

Aleksandr V. Sotin – PhD, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics, Mechanics, and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii Prospekt, Perm, 614990, e-mail: sotin@inbox.ru).

Perviz Nizim Suvarly – traumatologist-orthopedist, Clinic of scientific medicine LLC (52k2 Krasnodarskaya street, Moscow, 109559, e-mail: dr.suvarly@gmail.com).

Dmitry Ya. Samborskiy – Computer operator of the information support Department, National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov, Ministry of Health of the Russian Federation (10 Priorova ul., Moscow, 127299, e-mail: samborskiiDYa@cito-priorov.ru).

Anastasia N. Klokova – Senior of the Faculty of Digital Technologies and Chemical Engineering, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9 Miusskaya Pl., Moscow, 125047), e-mail: klokova.a.n@muctr.ru).

Akshin Boyuk Aga Bagirov – Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher of the Department of Injuries of the Musculoskeletal System and Their Consequences, Head of the scientific group for reengineering the method of external transosseous fixation, National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov, Ministry of Health of the Russian Federation (10 Priorova ul., Moscow, 127299, e-mail: bagirovAB@cito-priorov.ru); Professor, Department of advanced materials and technologies for aerospace applications, Moscow Aviation Institute (State Technical University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125080); Head of the Department of innovative traumatology and orthopedics, International Medical Association – BRICS Health University (of. 196, 25 Profsoyuznaya ul. Moscow, 117418).



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

Показаниями к использованию аппаратов внешней фиксации являются открытые и закрытые переломы, политравма, суставные переломы, малоинвазивная интраоперационная репозиция, артродез, корригирующие остеотомии, дистракционный остеогенез. По сравнению с пластинами для накостного остеосинтеза и интрамедуллярными гвоздями, спице-стержневые аппараты вызывают меньшее нарушение мягких тканей, кровоснабжения кости и надкостницы [1]. Возможность использования фиксирующих элементов в нескольких плоскостях обеспечивает универсальность, необходимую для обеспечения управляемости процессом сращения костных фрагментов и уменьшения травматизации окружающих тканей. Эффективность остеогенеза обеспечивается восстановлением нормального кровоснабжения, стабильностью костных фрагментов в месте перелома, костного несращения или остеотомии и дозированной нагрузкой [2; 3]. Контакт между костными фрагментами, геометрия перелома или остеотомического зазора влияют на стабильность репонируемого блока, поэтому подбирается такая компоновка аппарата, которая гарантирует стабильность зоны сращения [4; 5]. На сегодняшний момент в клинической практике принято, что оптимальной конструкцией для внешней фиксации является та, которая обеспечивает достаточную жесткость при кручении, изгибе и сдвиге, но допускает ограниченную подвижность в зоне перелома [6–10]. Продольная микроподвижность в месте дефекта приводит к повышению скорости формирования костной мозоли [6; 11] при условии ограниченности возникающих сдвиговых деформаций [12].

Стабильность и жесткость обычного аппарата Илизарова объясняются использованием в нем поперечной структуры спиц Киршнера. К недостаткам этой конструкции относятся боль и возможные неврологические и сосудистые повреждения, возникающие при введении спиц в критические нейроваскулярные области, а также повышенная сложность конструкции каркаса. Уменьшение количества спиц разрешает эти проблемы, но одновременно снижает жесткость системы [13].

Модульная трансформация элементов конструкции, допускающих фиксацию костных фрагментов при помощи стержней, позволила создать и внедрить в клиническую практику различные модификации классического аппарата Илизарова (рис. 1). В целом гибридная фиксация сочетает в себе фиксацию с помощью спиц на кольце/дуге (как в классическом аппарате Илизарова) с фиксацией стержнями (используемых в балочно-стержневых аппаратах). Преимуществами модифицированных конструкций являются: обеспечение стабильности в зоне остеотомии или перелома костей, уменьшение громоздкости и минимизация повреждения мышечных и других анатомически важных элементов сегмента. Механическое поведение гибридных внешних фиксаторов зависит от компоновки и физических свойств элементов спице-стержневой конструкции [14–16].

Исследованию механического отклика аппарата наружной фиксации на внешнюю нагрузку посвящены многочисленные работы, в которых как экспериментально [17–20], так и с применением математических расчетов [21; 22] или компьютерных моделей [23–35] определяются биомеханические последствия выбора конструкции и компоновки аппарата. Метод конечных элементов является хорошо зарекомендовавшим себя математическим инструментом, используемым многими исследователями для решения задач механики твердого деформируемого тела. Проведение вычислительного эксперимента позволяет проанализировать влияние изменений в компоновке аппарата, силе натяжения спиц, размерах опор, форме и механических свойствах фиксирующих элементов на жесткость конструкции. Для инженерного анализа используются специальное программное обеспечение ANSYS [25; 33; 34], ABAQUS [24; 27; 28; 31], SolidWorks [29], Marc Mentat [23; 35],

CATIA [30; 32], Matlab 6 [22]. Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию механического поведения аппаратов наружной фиксации с помощью метода конечных элементов, лишь некоторые авторы подтверждают адекватность построенной компьютерной модели сравнением с экспериментальными данными [30–32].

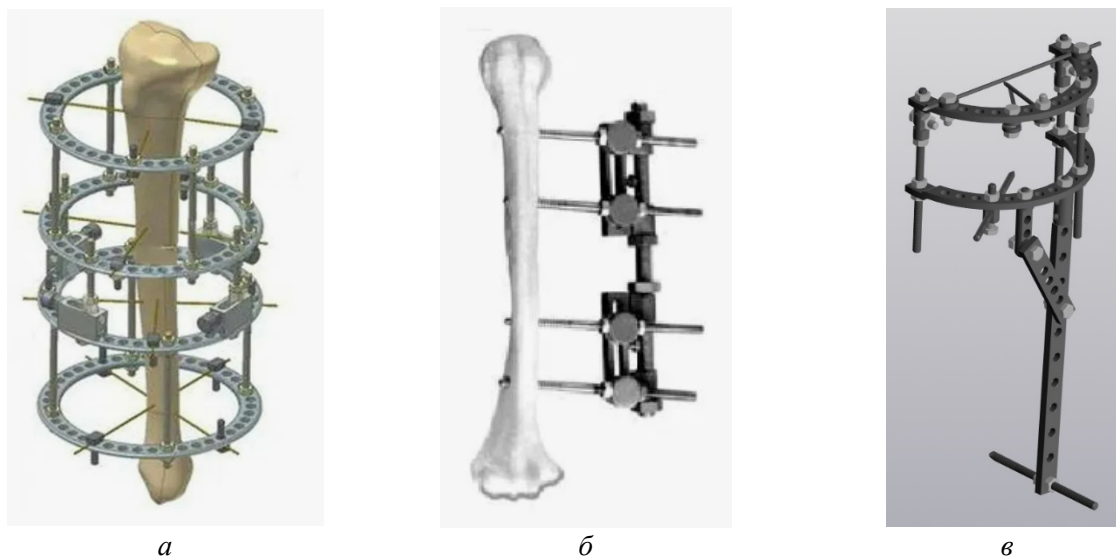


Рис. 1. Различные модификации аппарата наружной фиксации:
а – классический аппарат Илизарова; *б* – стержневой аппарат;
в – аппарат Илизарова модификации Багирова

Целью настоящего исследования является построение цифрового двойника конструкции аппарата наружной фиксации Илизарова модификации Багирова, использование которого позволит в дальнейшем проводить детальное параметрическое исследование различных факторов, влияющих на эффективность остеогенеза.

Материалы и методы

В случае наличия перелома или остеотомированного участка в проксимальном отделе большеберцовой кости аппарат Илизарова модификации Багирова, устанавливаемый на голень, представляет собой конструкцию трехуровневой фиксации, две опоры в виде полуколец и балки с резьбовым хвостовиком, закрепленным в дистальной части (рис. 2). Данная компоновка аппарата внешней фиксации эффективно применяется при устранении варусной деформации голени [36].

Для предотвращения повреждений анатомически важных зон определены допустимые области расположения фиксирующих элементов (спиц, стержней). На проксимальной опоре (полукольцо диаметром 120 мм) фиксируются одна диаметрально-проведенная спица диаметром 3 мм и две консольно-установленные спицы диаметром 3 мм (рис. 3, *а*). На дистальной опоре (полукольцо диаметром 120 мм) фиксируется консольно расположенный стержень диаметром 5 мм (рис. 3, *б*). На уровне дистального метафиза консольно введенный стержень диаметром 6 мм проходит через нижнее отверстие балки с резьбовым хвостовиком, соединяющей дистальную опору и стержень на уровне дистального метафиза.

С точки зрения механики деформируемого твердого тела аппарат Илизарова модификации Багирова можно рассматривать как составную конструкцию, состоящую из изотропных линейно-упругих тел сложной геометрической формы. Жесткая фиксация эле-

ментов конструкции между собой обеспечивается резьбовыми соединениями. Так как исследуемая область имеет сложную геометрию и неоднородное распределение механических свойств, построение компьютерной модели осуществляется с помощью пакета прикладных программ Solid Works 2014.

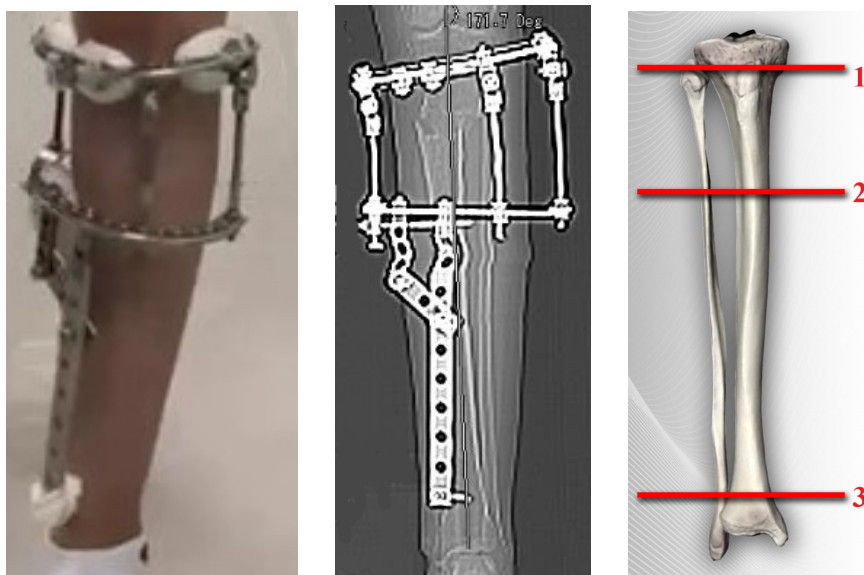


Рис. 2. Аппарат Илизарова модификации Багирова для проксимального отдела голени:
1 – проксимальная опора; 2 – опора на уровне 1/3 диафиза большеберцовой кости;
3 – крепление на уровне дистального метафиза

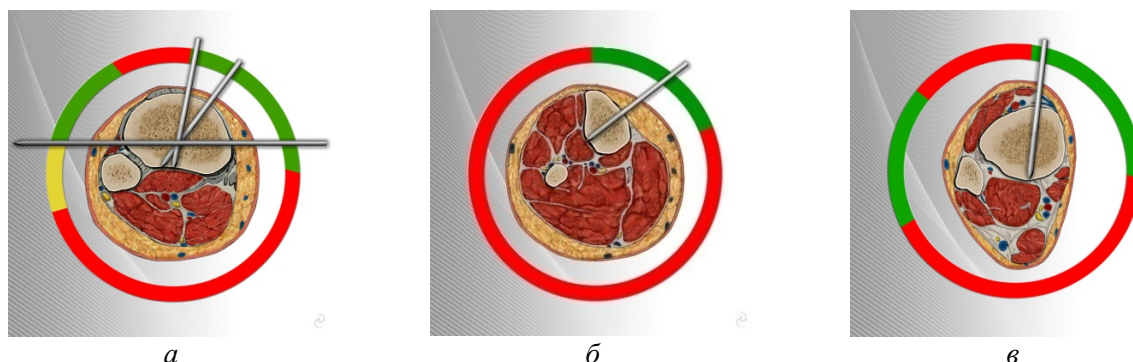


Рис. 3. Анатомические срезы большеберцовой кости с установленными фиксаторами на уровне:
а – проксимального метафиза; б – верхней 1/3 диафиза; в – дистального метафиза;
зеленым цветом показаны зоны для установки спиц и стержней; желтым – зоны нежелательной,
но возможной установки; красным – запрещенные зоны установки

Спецификация компоновки аппарата внешней фиксации модификации Багирова для коррекции голени представлена в табл. 1. Внешний вид компонентов аппарата наружной фиксации модификации Багирова и их компьютерные модели показаны на рис. 4.

Нержавеющая сталь широко используется в медицине для изготовления медицинских инструментов и оборудования. Она не вызывает аллергических реакций и не содержит вредных веществ, что делает ее безопасной для использования в медицинской сфере. Обозначение стали 08X18H10 указывает на то, что сплав содержит 0,08 % С, присутствует хром (Cr) с пропорцией примерно 18 % (17÷19 %), никель (Ni), приблизительно 10 % (9÷11 %). Также для производства компонентов аппаратов наружной фиксации используется нержа-

веющая сталь 12X18H10T, а для изготовления стрежней Шанца помимо медицинской стали, используют титановые сплавы BT16 и BT5-1.

Таблица 1

Состав аппарата модификации Багирова

№ п/п	Компонент	Кол-во	Материал
1	Верхнее полукольцо Ø 120 мм	1	08X18H10
2	Нижнее полукольцо Ø 120 мм	1	08X18H10
3	Втулка	2	08X18H10
4	Болт М6Х10	8	12X18H10T
5	Болт М6Х20	1	12X18H10T
6	Болт М6Х25	1	12X18H10T
7	Гайка М6Х10	26	12X18H10T
8	Шайба (d14)	3	08X18H10
9	Шайба (d15) под спицу 3 мм	4	08X18H10
10	Стержнефиксатор	1	08X18H10
11	Кронштейн с резьбовым хвостовиком и 1 гладким отв.	3	08X18H10
12	Кронштейн с резьбовым хвостовиком и 1 отв.	3	08X18H10
13	Кронштейн с резьбовым хвостовиком и 3 отв.	1	08X18H10
14	Планка	1	08X18H10
15	Балка с резьбовым хвостовиком	1	08X18H10
16	Стержень с резьбой без отв. М6х100	3	08X18H10
17	Стержень Шанца 5х110	1	08X18H11
18	Стержень Шанца 6х110	1	08X18H12
19	Спица 3Х70	2	08X18H13
20	Спица 3Х170	1	08X18H14

Общий вес аппарата составляет 790 г, и он включает в себя 65 элементов.

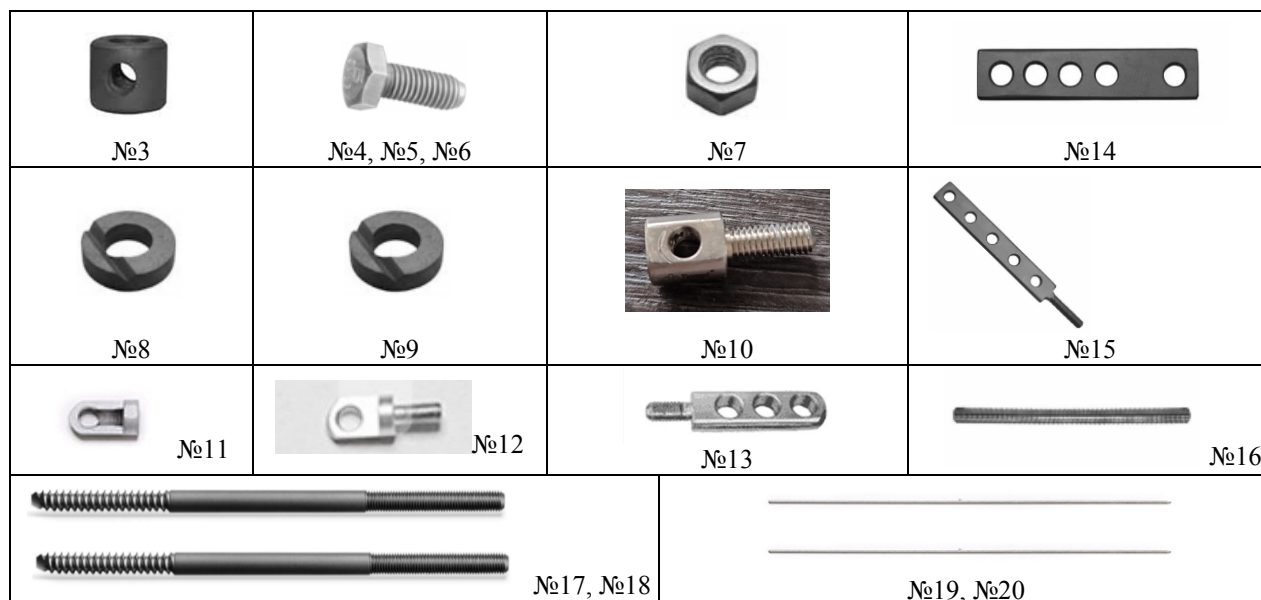


Рис. 4. Компоненты аппарата наружной фиксации аппарата Илизарова модификации Багирова для коррекции голени (нумерация деталей в соответствии с табл. 1)

Компьютерная модель аппарата Илизарова модификации Багирова была построена в точном соответствии с геометрическими размерами и механическими свойствами материалов, используемых в элементах конструкции.

Для проведения исследования влияния компоновки аппарата на стабильность фиксации костных обломков была смоделирована значимая клиническая ситуация, и аппарат Илизарова модификации Багирова был установлен на цилиндрический образец в соответствии с клиническим протоколом:

- провести спицу диаметром 3 мм во фронтальной плоскости на уровне проксимального метафиза большеберцовой кости;
- фиксировать спицу на полукольце 1-го уровня, закрепляя ее свободные концы в первые от «слепого» отверстия с каждой стороны полукольца;
- на «нулевые» отверстия полукольца 1-го уровня установить резьбовые стержни, снабженные шарнирным узлом, и соединить с полукольцом 2 на уровне верхней 1/3 большеберцовой кости;
- соединить балку с резьбовым хвостовиком с полукольцом 2-го уровня;
- ввести стержень диаметром 6 мм спереди назад и фиксировать к балке двумя гайками через крайнее дистальное отверстие;
- полукольцо уровня 2 фиксировать к большеберцовой кости стержнем диаметром 5 мм, введенным во фронтальной плоскости изнутри кнаружи;
- проксимальное полукольцо стабилизировать путем консольного введения в большеберцовую кость двух спиц диаметром 3 мм, спереди и внутри сзади и наружу.

Для исследования механического поведения аппарата Илизарова модификации Багирова при осевом сжатии были построены физическая и компьютерная модели (рис. 5, а, б), в которых вместо большеберцовой кости использован цилиндрический стержень диаметром 30,3 мм из мягких пород древесины. Между двумя верхними опорами аппарата внешней фиксации была выполнена «остеотомия» с разведением концов на 20 мм.

Расчет деформации элементов конструкции аппарата Илизарова модификации Багирова при приложении осевой нагрузки проводили с помощью метода конечных элементов. Для конечно-элементной аппроксимации исследуемой области использовали тетрагональные элементы с линейной аппроксимацией перемещений.

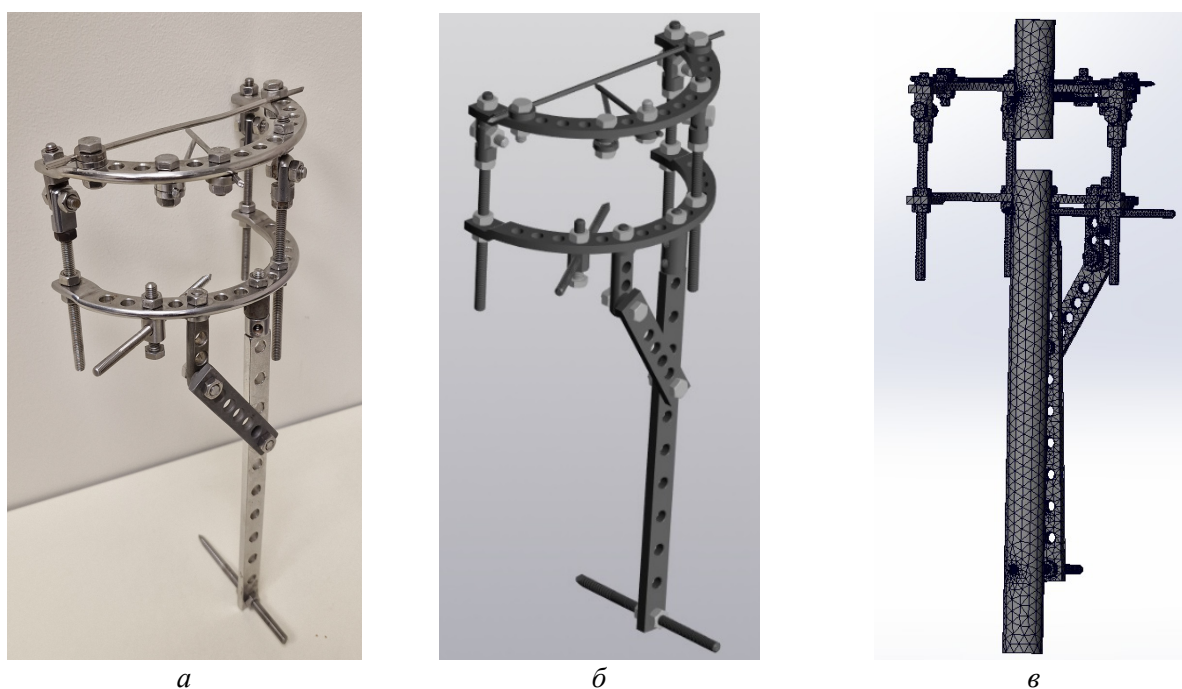


Рис. 5. Модель аппарата Илизарова модификации Багирова: а – физическая объект; б – компьютерная модель; в – конечно-элементная аппроксимация

Задачу решали в линейно-упругой постановке. Предполагая надежную взаимную фиксацию всех элементов конструкции аппарата Илизарова модификации Багирова, проскальзывание между элементами конструкции не учитывали. При расчетах использовали неоднородную конечно-элементную аппроксимацию исследуемой области (рис. 5, в). Параметры сетки приведены в табл. 2.

Механические свойства элементов конструкции аппарата Илизарова модификации Багирова были выбраны в соответствии с ГОСТ 5632-2014 (табл. 3).

Таблица 2

Параметры сетки

Параметр	Значение
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Сетка на основе смешанной кривизны
Точки Якобиана для сетки высокого качества	16 точек
Максимальный размер элемента	6,63889 мм
Минимальный размер элемента	0,331944 мм
Качество сетки	Высокое
Всего узлов	230068
Всего элементов	134000
Максимальное соотношение сторон	125,1
Процент элементов с соотношением сторон < 3	95
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,0269
Процент искаженных элементов	0

Таблица 3

Упругие свойства элементов конструкции

Материал	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент поперечной деформации
08X18H10	118,70	0,25
12X18H10T	128,70	0,25

Собранная конструкция аппарата Илизарова модификации Багирова была установлена в ячейку испытательной машины с жесткой фиксацией концов в цилиндрических углублениях с помощью радиальных болтов (рис. 6).

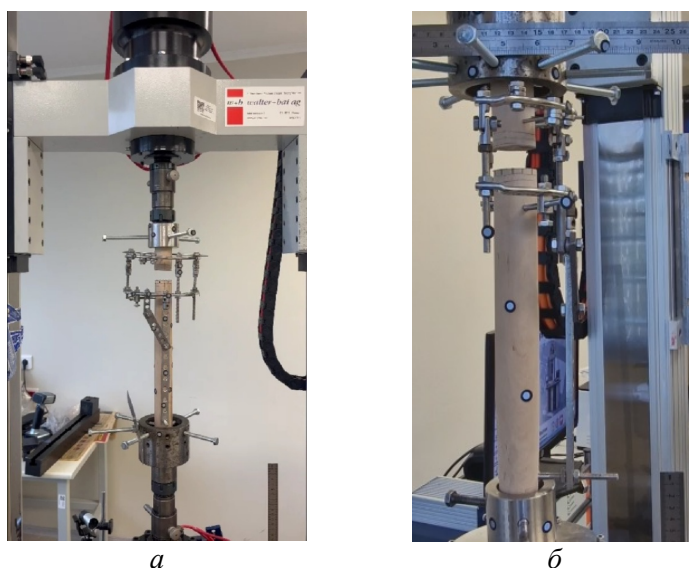


Рис. 6. Расположение установленного аппарата Илизарова модификации Багирова на испытательной машине: *а* – фронтальная плоскость; *б* – сагиттальная плоскость

Для определения механических свойств цилиндрического объекта из мягких пород дерева, используемого для имитации большеберцовой кости и исследования механического поведения выбранной компоновки аппарата Илизарова модификации Багирова, была использована универсальная испытательная машина Walter+Bai AG LFM-50. Технические характеристики испытательной машины приведены в табл. 4. Регистрация и обработка результатов измерения проводилась с помощью специализированного программного обеспечения Dion, версия 7.

Таблица 4

Технические характеристики Walter+Bai AG LFM-50

Параметр	Значение
Сила осевого нагружения, кН	0 ÷ 50
Скорость перемещения штока, мм/мин	0 ÷ 500
Точность измерения, %	0,34
Крутящий момент, Н·м	0 ÷ 200
Скорость вращения штока, об/мин	0 ÷ 60

Результаты

Цилиндрический образец размером 30×150 мм была установлен в вертикальном положении между двумя горизонтальными опорами. После чего он был нагружен вдоль продольной оси до 4000 N со скоростью 2 мм/мин. В результате проведенных испытаний были определены механические параметры исследуемого объекта (табл. 5).

Таблица 5

Упругие свойства цилиндрического объекта, имитирующего кость

Материал	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент поперечной деформации
Образец, имитирующий кость	11,70	0,25

Для исследования механического поведения выбранной компоновки аппарата Илизарова модификации Багирова и валидации построенной компьютерной модели был проведен натурный эксперимент. Исследуемая конструкция была установлена в вертикальном положении и консольно закреплена в канговых зажимах в проксимальном и дистальном концах (рис. 7). Затем конструкция была нагружена до 1000 N со скоростью 1 мм/мин.

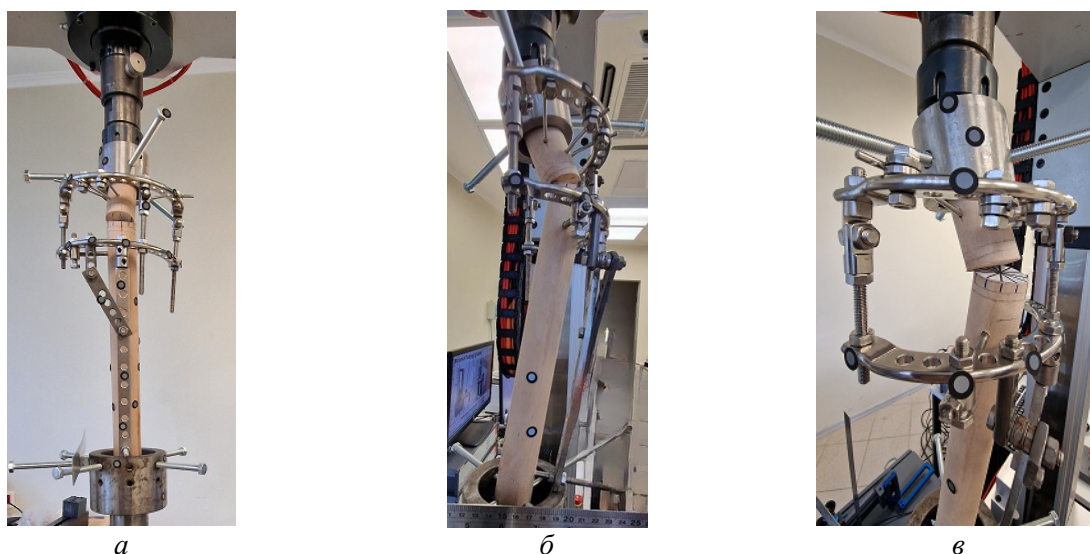


Рис. 7. Деформация аппарата Илизарова модификации Багирова под нагрузкой:
а – фронтальная плоскость; б, в – сагитальная плоскость

Анализ механического поведения конструкции выявил, что в диапазоне нагрузок от 0 до 1000 N аппарат деформируется со средней жесткостью 120 Н/мм. При нагрузке в 1000 N продольная деформация конструкции достигает 9 мм (рис. 8).

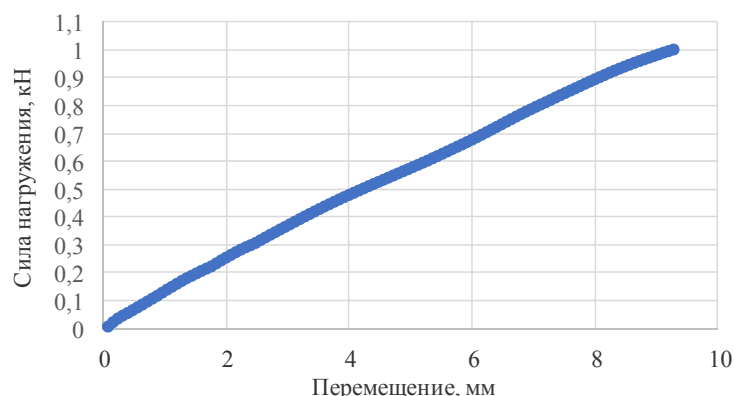


Рис. 8. Диаграмма испытания конструкции аппарата наружной фиксации

С помощью построенной пространственной конечно-элементной модели аппарата Илизарова модификации Багирова был проведен вычислительный эксперимент и рассчитаны поля продольных деформаций элементов конструкции. Граничные условия соответствовали условиям натурного эксперимента: нижний край цилиндра консольно закреплен, к верхнему краю приложена вертикальная нагрузка (рис. 9, а).

При вычислительном эксперименте нагружение осуществлялось вертикальной нагрузкой от 0 до 1000 N с шагом 200 N. Рассчитывались продольные перемещения проксимального (верхнего) края конструкции. Деформация исследуемой конструкции и её цифрового двойника при нагрузке 1000 N представлены на рис. 9, б, в.

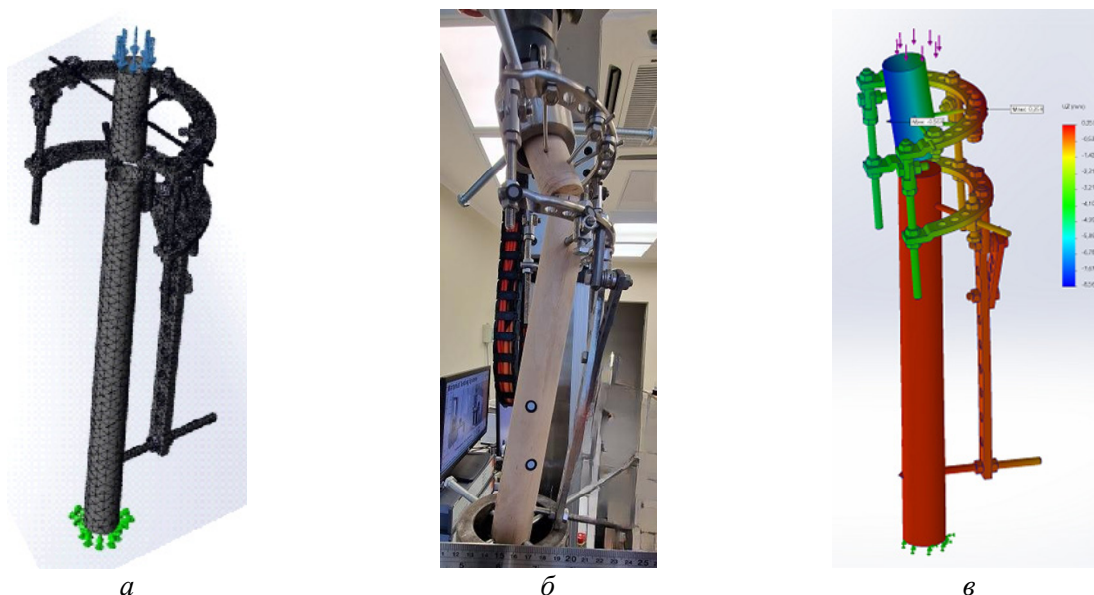


Рис. 9. Граничные условия (а). Продольная деформация элементов конструкции при нагрузке 1000 N: б – натурный эксперимент; в – вычислительный эксперимент

Значения экспериментально измеренных и рассчитанных перемещений проксимального края конструкции аппарата Илизарова модификации Багирова при модельных граничных условиях и нагрузке в диапазоне от 0 до 1000 N представлены на рис. 10.

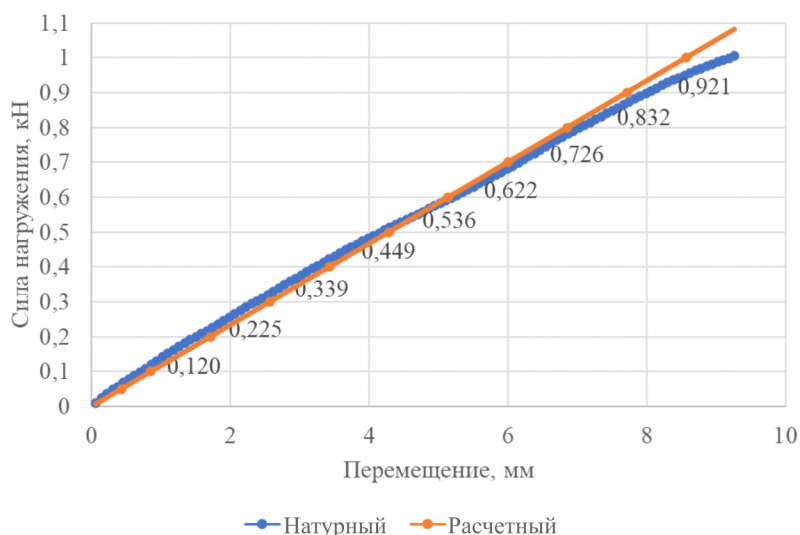


Рис. 10. Продольные перемещения в элементах конструкции рассчитанные с помощью компьютерной модели и полученные в эксперименте

Как видно из рис. 10, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Различия между расчетными и измеренными значениями не превышают 2 %. В таком случае можно полагать, что построенная компьютерная модель корректно описывает механическое поведение аппарата наружной фиксации Илизарова модификации Багирова и может быть использована для дальнейшего инженерного анализа влияния различных компоновок аппарата и механических свойств элементов конструкции на стабильность костных фрагментов в месте перелома или остеотомированного участка кости.

Заключение

Использование цифрового двойника аппарата Илизарова модификации Багирова позволит на предоперационном этапе провести оценку влияния различных компоновок на риск несостоятельности наружной чрескостной фиксации, дать количественную оценку рискованных клинических ситуаций и обосновать выбор технических решений для поставленной лечебной задачи.

Список литературы

1. Fixation technique influences osteogenesis of comminuted fractures / L. Claes, U. Heitemeyer, G. Krischak, H. Braun, G. Hierholzer / Clin Orthop. – 1999. - № 365. – P. 221–229.
2. Аппарат внешней фиксации конструкции Г.А. Илизарова. Оценка клинической эффективности и безопасности (обзор литературы) / Ю.П. Солдатов, М.В. Стогов, Е.Н. Овчинников, А.В. Губин, Н.В. Городнова / Гений ортопедии. - 2019. – № 4 (25). – С. 588–599. DOI: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-588-599
3. Ilizarov, G.A. The Apparatus: components and biomechanical principles of application / G.A. Ilizarov // Green S (Ed) Transosseus osteosynthesis. Theoretical and clinical aspects of the regeneration and growth of tissue. – Springer-Verlag Berlin, 1992. – P. 63–136.
4. Fragomen, A.T. The Mechanics of External Fixation / A.T. Fragomen, S.R. Rozbruch // HSS Journal. – 2006. – Vol. 1, iss. 3. – P. 13–29. DOI: 10.1007/s11420-006-9025-0
5. Пичхадзе, И.М. Роль биомеханической концепции фиксации отломков при лечении последствий огнестрельных переломов костей конечностей / И.М. Пичхадзе, Л.М. Данелия, К.А. Кузьменков // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2010. – № 4. – С. 59–64.

6. Axial movement and tibial fractures. A controlled randomized trial of treatment / J. Kenwright, J.B. Richardson, J.L. Cunningham, S.H. White, A.E. Goodship, M.A. Adams, J.H. Newman // *J Bone Joint Surg Br.* – 1991. – № 73. – P. 654–659.
7. The role of rigid frame stiffness in the control of fracture healing. An experimental study / A.E. Goodship, P.E. Watkins, H.S. Rigby, J. Kenwright // *J Biomech.* – 1993. – № 26. – P. 1027–1035.
8. Sarmiento, A. Fracture healing in rat femora as affected by functional weight-bearing / A. Sarmiento, J.F. Schaeffer, L. Beckerman // *J. Bone Jt Surg Am.* 1977. – Iss. 59. – P. 369–375.
9. Klein, P The initial phase of fracture healing is specifically sensitive to mechanical conditions / P. Klein, H. Schell, F. Streitparth // *J Orthop Res.* – 2003. – Iss. 21. – P. 662–669.
10. Yang, L. Stiffness characteristics and inter-fragmentary displacements with different hybrid external fixators / L. Yang, S. Nayagam, M. Saleh // *Clinical Biomechanics.* – 2003. – Vol. 2, iss. 18. – P. 166–172. DOI: 10.1016/s0268-0033(02)00175-4
11. Mitousoudis, A.S. A biomechanical analysis of the Ilizarov external fixator / A.S. Mitousoudis, E.A. Magnissalis, S.K. Kourkoulis // *EPJ Web of Conferences.* – 2010. – Iss. 6. – 21002. DOI: 10.1051/epjconf/201006210
12. Henderson, D.J. What are the biomechanical effects of half-pin and fine-wire configurations on fracture site movement in circular frames? / D.J. Henderson // *Clinical Orthopaedics and Related Research.* – 2016. – Vol. 474. – P. 1041–1049.
13. Calhoun, J.H. Rigidity of half-pins for the Ilizarov external fixator / J.H. Calhoun // *Bulletin (Hospital for Joint Diseases (New York, NY)).* – 1992. – Vol. 52, iss. 1. – P. 21–26.
14. Najim, A.A. Enhancing the Ilizarov Apparatus: Mechanical Stiffness / A.A. Najim, S.J. Hamandi, A. Alzubaidi // *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences.* – 2024. – Vol. 27, iss. 1. – P. 25–31.
15. Gasser, B. Stiffness characteristics of the circular Ilizarov device as opposed to conventional external fixators. / B. Gasser, B. Boman, D. Wyder, // *J BiomechEng.* – 1990. – Iss. 112. – P. 15–21.
16. Bending stiffness of unilateral and bilateral fixator frames. / F. Behrens, W.D. Johnson, T.W. Koch, N. Kovacevic // *Clin OrthopRelat Res.* – 1983. – Iss. 178. – P. 103–110.
17. Зедгенидзе, И.В. Характеристика систем аппаратов внешней фиксации, используемых при лечении диафизарных переломов длинных костей / И.В. Зедгенидзе, Л.Ю. Павлов // *Сибирский медицинский журнал.* – 2018. – № 1. – С. 38–42.
18. Соломин, Л.Н. Биомеханическое обоснование количества соединительных стержней между опорами аппарата Г.А. Илизарова / Л.Н. Соломин, М.В. Андрианов, В.А. Назаров // *Гений ортопедии.* – 2006. – № 3. – С. 21–24.
19. Исследование и сравнительная оценка показателей прочности фиксации отломков модели бедренной кости различными типами аппаратов внешней фиксации и наkostных пластин / О.Н. Ямщиков, И.А. Норкин, С.А. Емельянов, Д.А. Марков // *Вестник ТГУ.* – 2014. – № 6 (19). – С. 1968–1970.
20. Механические свойства систем кость-имплантат в условиях различных способов фиксации / Т.Б. Минасов, В.Л. Скрябин, А.В. Сотин, И.Б. Минасов, Р.А. Саубанов, А.А. Файзуллин, Р.М. Вахитов-Ковалевич // *Российский журнал биомеханики.* – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 364–369.
21. Биомеханическое обоснование чрескостной фиксации переломов бедренной кости / Д.А. Марков, К.К. Левченко, В.П. Морозов, О.А. Кауц, А.Г. Курманов, Р.К. Абдулнасыров, А.Г. Качатрян, А.Н. Перегородов, А.В. Мандров // *Саратовский научно-медицинский журнал.* – 2009. – № 4 (5). – С. 591–593.
22. Соловцова, Л.А. Методика компьютерного исследования жесткости спице-стержневых фиксирующих устройств / Л.А. Соловцова // *Российский журнал биомеханики.* – 2010. – № 1 (47). – С. 17–25.

23. A Finite Element Study: Finding the Best Configuration between Unilateral, Hybrid, and Ilizarov in terms of Biomechanical Point of View. / A.U.A. Aziz, A.H.A. Wahab, R.A.A. Rahim, M.R.A. Kadir, M.H. Ramlee / *Injury*. – 2020. DOI: 10.1016/j.injury.2020.08.001
24. Su, P. Screw analysis, modeling and experiment on the mechanics of tibia orthopedic with the Ilizarov external fixator / P. Su // *Micromachines*. – 2022. – Vol. 13, iss. 6. – P. 932.
25. Finite element modelling of the Ilizarov external fixation system / M. Watson, K.J. Mathias, N. Maffulli, D.W.L. Hukins, D.E.T. Shepherd // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. – 2007. – Vol. 8, № 221. – P. 863–871. DOI: 10.1243/09544119jeim225
26. Mitousoudis, A.S. A biomechanical analysis of the Ilizarov external fixator / A.S. Mitousoudis, E.A. Magnissalis, S.K. Kourkoulis // *EPJ Web of Conferences*. – 2010. – Vol. 6. – 21002. DOI 10.1051/epjconf/201006210
27. Toumanidou, T. A finite element model of the Ilizarov fixator system / T. Toumanidou, L.A. Spyrou, N. Aravas // *10th International Workshop on Biomedical Engineering*. – 2011. DOI: 10.1109/iwbe.2011.6079016
28. Zamani, A.R. Theoretical and Finite Element Modeling of Fine Kirschner Wires in Ilizarov External Fixator / A.R. Zamani, S.O. Oyadiji // *Journal of Medical Devices*. – 2010. – Vol. 3, iss. 4. – 031001. DOI: 10.1115/1.4001815
29. Цискарашвили, А.В. Анализ основных элементов фиксации аппарата для внешнего остеосинтеза / А.В. Цискарашвили, А.В. Дудченко // *Российский журнал биомеханики*. – 2019. – № 3 (23). – С. 435–450. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2019.3.09.
30. Development of Knowledge-Based Engineering System for Structural Size Optimization of External Fixation Device / E. Mesic, N. Pervan, A.J. Muminovic, A. Muminovic, M. Colic // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – 10775. DOI: 10.3390/app112210775
31. Design, analysis and testing of an external fixation device manufactured from composite materials / Z. Padovec, P. Ruzicka, R. Sedlacek, M. Ruzicka // *Applied and Computational Mechanics*. – 2017. – Vol. 11. – P. 145–154. DOI: 10.24132/acm.2017.398
32. Biomechanical Performance Analysis of the Monolateral External Fixation Devices with Steel and Composite Material Frames under the Impact of Axial Load / N. Pervan, E. Mesic, A.J. Muminovic, M. Delic, E. Muratovic, M. Trobradovic, V. Hadziabdic // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol. 12. – P. 722. DOI: 10.3390/app12020722
33. Математическое моделирование и опыт применения нового устройства при переломах костей голени / Цяо Гуанда, С.А. Лепехова, Н.В. Тишков, А.С. Бубнов // *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. – 2015. – Вып. 4.
34. Kumar, D.B. Finite element analysis of external Ilizarov ring and hybrid fixators / D.B. Kumar, K.G. Muthurajan // *Int. J. Sci. Res.* 2014. – Vol. 3, iss. 2. – P. 76–78.
35. Stress Distributions and Micromovement of Fragment Bone of Pilon Fracture Treated With External Fixator: A Finite Element Analysis / M.H. Ramlee, H.S. Gan, S.A. Daud, A. Abdul Wahab, M.R. Abdul Kadir // *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. – 2020. – Vol. 4, № 59. – P. 664–672. DOI: 10.1053/j.jfas.2019.09.006
36. Эффективность модифицированных компоновок аппаратов наружной фиксации при устранении варусной деформации голеней / А.Б. Багиров, К.А. Лаймуна, Н.А. Шестерня, Б.Д. Алиагиев, П.Н. Суварлы // *Клинические аспекты травматологии и ортопедии*. – 2021. – № 2 – С. 50–59. DOI:10.24412/1819-1495-2021-2-50-59

References

1. Claes L., Heitemeyer U., Krischak G., Braun H., Hierholzer G. Fixation technique influences osteogenesis of comminuted fractures. *Clin Orthop*, 1999, no. 365, pp. 221–229.

2. Soldatov YU.P., Stogov M.V., OvchinnikovYe.N., Gubin A.V., Gorodnova N.V. Apparat vneshnei fiksatsii konstruktssii G.A. Ilizarova. Otsenka klinicheskoy effektivnosti i bezopasnosti (obzor literatury) [Evaluation of clinical efficacy and safety (literature review)]. *Genii ortopedii*, 2019, no. 4 (25), pp. 588–599. DOI: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-588-599.
3. Ilizarov G.A. The Apparatus: components and biomechanical principles of application. [In: Green S (Ed) Transosseus osteosynthesis. Theoretical and clinical aspects of the regeneration and growth of tissue]. Springer-Verlag Berlin, 1992, pp 63–136.
4. Fragomen A.T., Rozbruch S.R. The Mechanics of External Fixation. *HSS Journal*, 2006, vol. 1, iss. 3, pp. 13–29. DOI: 10.1007/s11420-006-9025-0
5. Pichkhadze I.M., Daneliya L.M., Kuz'menkov K.A. Rol' biomekhanicheskoy kontseptsii fiksatsii otlomkov pri lechenii posledstviy ognestrel'nykh perelomov kostey konechnostey [Role of biomechanical concept of fragment fixation in the treatment of consequences of gunshot fractures of limb bones]. *Vestnik travmatologii i ortopedii im. N.N. Priorova*, 2010, no. 4, pp. 59–64.
6. Kenwright J., Richardson J.B., Cunningham J.L., White S.H., Goodship A.E., Adams M.A., Newman J.H. Axial movement and tibial fractures. A controlled randomized trial of treatment. *J Bone Joint Surg Br* 1991, vol. 73, pp. 654–659.
7. Goodship A.E., Watkins P.E., Rigby H.S., Kenwright J. The role of rigid frame stiffness in the control of fracture healing. An experimental study. *J Biomech*, 1993, no. 26, pp. 1027–1035.
8. Sarmiento A, Schaeffer J.F, Beckerman L. Fracture healing in rat femora as affected by functional weight-bearing. *J. Bone Jt Surg Am*, 1977, iss. 59, pp. 369–375.
9. Klein P., Schell H., Streitharth F. The initial phase of fracture healing is specifically sensitive to mechanical conditions. *J Orthop Res*, 2003, iss. 21, pp. 662–669.
10. Yang, L., Nayagam S., Saleh M. Stiffness characteristics and inter-fragmentary displacements with different hybrid external fixators. *Clinical Biomechanics*, 2003, vol. 2, iss. 18, pp. 166–172. DOI:10.1016/s0268-0033(02)00175-4
11. Mitousoudis A. S., Magnissalis E. A., Kourkoulis S. K. A biomechanical analysis of the Ilizarov external fixator. *EPJ Web of Conferences*, 2010, 6, 21002. DOI: 10.1051/epjconf/201006210
12. Henderson D. J. What are the biomechanical effects of half-pin and fine-wire configurations on fracture site movement in circular frames? *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2016, vol. 474, pp. 1041–1049.
13. Calhoun J. H. Rigidity of half-pins for the Ilizarov external fixator. *Bulletin (Hospital for Joint Diseases (New York, NY))*, 1992, vol. 52, iss. 1, pp 21–26.
14. Najim A. A., Hamandi S. J., Alzubaidi A. Enhancing the Ilizarov Apparatus: Mechanical Stiffness. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 2024, vol. 27, iss. 1, pp. 25–31.
15. Gasser B., Boman B., Wyder D. Stiffness characteristics of the circular Ilizarov device as opposed to conventional external fixators. *J BiomechEng*, 1990, iss. 112, pp. 15–21.
16. Behrens F., Johnson W.D., Koch T.W., Kovacevic N. Bending stiffness of unilateral and bilateral fixator frames. *Clin OrthopRelat Res*, 1983, iss. 178, pp. 103–110.
17. Zedgenidze I. V., Pavlov L. Yu. Kharakteristika sistem apparatov vneshney fiksatsii, ispolzuemykh pri lechenii diafizarnykh perelomov dlinnykh kostey [Characteristics of systems of external fixation devices used in the treatment of diaphyseal fractures of long bones]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal*, 2018, no. 1, pp. 38–42.
18. Solomin L. N., Andrianov M. V., Nazarov V. A. Biomekhanicheskoye obosnovaniye kolichestva soyedinitel'nykh sterzhney mezhdu oporami apparata G.A. Ilizarova [Biomechanical justification of the number of connecting rods between the supports of the G.A. Ilizarov apparatus]. *Geniy ortopedii*, 2006. No. 3, pp. 21–24.

19. Yamshchikov O. N., Norkin I. A., Yemel'yanov S. A., Markov D. A. Issledovaniye i sravnitel'naya otsenka pokazateley fiksatsii otlomkov modeley kostey bedrennoy kosti razlichnymi tipami apparatov vneshney fiksatsii i nakostnykh plastin [Investigation and comparative evaluation of fixation strength of femoral bone model fragments by different types of external fixation devices and cupping plates]. *Vestnik TGU*, 2014, no. 6(19), pp. 1968–1970.
20. Minasov T.B., Skryabin V.L., Sotin A.V., Minasov I.B., Saubanov R.A., Fayzullin A.A., Vakhitov-Kovalevich R.M. Mekhanicheskiye svoystva system kost-implantat v usloviyakh razlichnykh sposobov fiksatsii [Mechanical properties of bone-implant systems under the conditions of different fixation methods]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 2020, no. 3(24), pp. 364–369.
21. Markov D.A., Levchenko K.K., Morozov V.P., Kauts O.A., Kurmanov A.G., Abdulnasyrov R.K., Khachatryan A.G., Peregorodov A.N., Mandrov A.V. Biomekhanicheskoye obosnovaniye chreskostnoy fiksatsii perelomov kostey bedrennoy kosti [Biomechanical justification of percutaneous fixation of femoral fractures]. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal*, 2009, no. 4(5), pp. 591–593.
22. Solovtsova L. A. Metodika komp'yuternogo issledovaniya zhestkosti spitsesterzhnykh fiksiruyushchikh ustroystv [Methodology of computerized study of stiffness of spoke-rod fixation devices]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 2010, no. 14 (47), pp. 17–25.
23. Aziz A. U. A., Wahab A. H. A., Rahim R. A. A., Kadir M. R. A., Ramlee M. H. A Finite Element Study: Finding the Best Configuration between Unilateral, Hybrid, and Ilizarov in terms of Biomechanical Point of View. *Injury*, 2020 DOI: 10.1016/j.injury.2020.08.001
24. Su P. Screw analysis, modeling and experiment on the mechanics of tibia orthopedic with the Ilizarov external fixator. *Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 6, pp. 932.
25. Watson M., Mathias K.J., Maffulli N., Hukins D.W.L., Shepherd D.E.T. Finite element modelling of the Ilizarov external fixation system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2007, vol. 8, iss. 221, pp. 863–871. DOI: 10.1243/09544119jeim225
26. Mitousoudis A.S., Magnissalis E.A., Kourkoulis S.K.. A biomechanical analysis of the Ilizarov external fixator. *EPJ Web of Conferences*, 2010, 6, 21002. DOI: 10.1051/epjconf/201006210
27. Toumanidou T., Spyrou L. A., Aravas N. A finite element model of the Ilizarov fixator system. *10th International Workshop on Biomedical Engineering*, 2011. DOI: 10.1109/iwbe.2011.6079016
28. Zamani A. R., Oyadiji S. O. Theoretical and Finite Element Modeling of Fine Kirschner Wires in Ilizarov External Fixator. *Journal of Medical Devices*, 2010, vol. 3, iss. 4, 031001. DOI: 10.1115/1.4001815
29. Tsiskarashvili A. V., Dudchenko A. V. Analiz osnovnykh elementov fiksatsii apparata dlya naruzhnogo osteosinteza [Analysis of the main elements of fixation of the external osteosynthesis apparatus]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 2019, no. 3 (23), pp. 435–450. DOI:10.15593/RZhBiomeh/2019.3.09
30. Mesic E., Pervan N., Muminovic A. J., Muminovic A., Colic M. Development of Knowledge-Based Engineering System for Structural Size Optimization of External Fixation Device. *Appl. Sci*, 2021, iss. 11, 10775. DOI: 10.3390/app112210775.
31. Padovec Z., Ruzicka P., Sedlacek R., Ruzicka M. Design, analysis and testing of an external fixation device manufactured from composite materials. *Applied and Computational Mechanics*, 2017, iss. 11, pp. 145–154. DOI: 10.24132/acm.2017.398.
32. Pervan N., Mesic E., Muminovic A. J., Delic M., Muratovic E., Trobradovic M., Hadziabdic V. Biomechanical Performance Analysis of the Monolateral External Fixation Device.

es with Steel and Composite Material Frames under the Impact of Axial Load. *Appl. Sci*, 2022, iss.12, pp. 722. DOI: 10.3390/app12020722.

33. Tsyao Guanda, Lepekhova S. A., Tishkov N. V. Bubnov A. S. Matematicheskoye modelirovaniye i opyt primeneniya novogo ustroystva pri perelomakh kostey goleni [Mathematical modeling and experience of application of a new device for tibia bone fractures]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal (Irkutsk)*, 2015, no.4.

34. Kumar D. B., Muthurajan K. G. Finite element analysis of external Ilizarov ring and hybrid fixators. *Int. J. Sci. Res*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 76–78.

35. Ramlee M. H., Gan H. S., Daud S. A., Abdul Wahab A., Abdul Kadir M. R. Stress Distributions and Micromovement of Fragment Bone of Pilon Fracture Treated With External Fixator: A Finite Element Analysis. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 2020, vol. 4, iss. 59, pp. 664–672. DOI: 10.1053/j.jfas.2019.09.006

36. Bagirov A. B., Laymouna K. A., Shesternya N. A., Alinagiev B. D., Suvarly P. N. Effektivnost' modifitsirovannykh komponovok apparatov naruzhnoy fiksatsii pri ustraneni varusnoy deformatsii golenev [Efficiency of modified assemblies of external fixation in correction of varus deformity of legs]. *Klinicheskiye aspekty travmatologii i ortopedii*, 2021, no. 2, pp. 50–59. DOI: 10.24412/1819-1495-2021-2-50-59