



ИМПЛАНТАЦИЯ МЕЖТЕЛОВОГО ШЕЙНОГО КЕЙДЖА КАДАВЕРНОЙ МОДЕЛИ ПОЗВОНОЧНИКА БАРАНА: БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

О.А. Спирин¹, А.Г. Аганесов¹, М.М. Алексанян¹, С.А. Макаров¹, Н.Г. Седуш², А.Е. Крупнин², В.В. Побежимов²

¹Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского, Москва, Россия;

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Цель исследования. Оценка биомеханических свойств биоразлагаемых кейджей из поли-L-лактида на кадаверной модели шейного отдела позвоночника крупного рогатого скота.

Материал и методы. Разработаны прототипы межтеловых шейных устройств на 3D-принтере Ender 3v2. Проведена оценка механических характеристик экспериментальных образцов кейджей, исследована ориентация образцов при 3D-печати. В 12 случаях на кадаверных моделях выполнена одноуровневая шейная дискэктомия с фиксацией кейджем из поли-L-лактида. Проведены биомеханические испытания прооперированного позвоночного сегмента в условиях циклического нагружения.

Результаты. В данном виде испытаний разработанные модели шейных кейджей продемонстрировали высокую деформационную стабильность при компрессионной нагрузке, отсутствие деформации и миграции в статических и циклических испытаниях.

Заключение. Разработка биосовместимых биоразлагаемых шейных кейджей является перспективным направлением в медицине. С учетом высокого процента послеоперационных осложнений, связанных с миграцией и проседанием кейджей из нерезорбируемых материалов, биоразлагаемые имплантаты могут стать конкурентноспособным аналогом для фиксации шейного сегмента.

Ключевые слова: шейная дискэктомия; шейный кейдж; кадаверная модель; биомеханические испытания.

Для цитирования: Спирин О.А., Аганесов А.Г., Алексанян М.М., Макаров С.А., Седуш Н.Г., Крупнин А.Е., Побежимов В.В. Имплантация межтелового шейного кейджа кадаверной модели позвоночника барана: биомеханические испытания // Хирургия позвоночника. 2025. Т. 22, № 3. С. 97–103.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.3.97-103>

INTERBODY CERVICAL CAGE IMPLANTATION INTO CADAVERIC MODEL OF THE RAM SPINE: BIOMECHANICAL TESTS

О.А. Spirin¹, А.Г. Aganesov¹, М.М. Aleksanyan¹, С.А. Makarov¹, Н.Г. Sedush², А.Е. Krupnin², В.В. Pobezhimov²

¹Russian Scientific Center of Surgery n.a. acad. B.V. Petrovsky, Moscow, Russia;

²National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

Objective. To evaluate the biomechanical properties of biodegradable poly-L-lactide cages on a cadaveric model of the cattle cervical spine.

Material and Methods. Prototypes of interbody cervical implants were developed on the Ender 3v2 3D printer. The mechanical characteristics of experimental cage specimens were evaluated, and the orientation of the specimens during 3D-printing was investigated. Single-level cervical discectomy with fixation by a cage made of poly-L-lactide was performed in 12 cadaveric models. Biomechanical tests of the operated vertebral segment were carried out under cyclic loading conditions.

Results. In this type of testing, the developed cervical cage models demonstrated high deformation stability under compression load, and the absence of deformation and migration in static and cyclic tests.

Conclusion. The development of biocompatible biodegradable cervical cages is a promising direction in medicine. Given the high rate of postoperative complications associated with migration and subsidence of cages made of non-resorbable materials, biodegradable implants may become a competitive analog for cervical segment fixation.

Keywords: cervical discectomy; cervical cage; cadaveric model; biomechanical testing.

Please cite this paper as: Spirin OA, Aganesov AG, Aleksanyan MM, Makarov SA, Sedush NG, Krupnin AE, Pobezhimov VV. Interbody cervical cage implantation into cadaveric model of the ram spine: biomechanical tests. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2025;22(3):97–103.

In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.3.97-103>

Выбор материала для последующей фиксации шейного кейджа после передней шейной дискэктомии является актуальной темой в мировом медицинском сообществе. Наибольшую распространенность в хирургической практике получили кост-

ные аутооттрансплантаты, ригидные шейные пластины с фиксацией винтами и межтеловые кейджи. Основными осложнениями при данном методе фиксации являются миграция пластин, винтов, переломы пластин, дислокация аутооттрансплантата,

гематомы и нагноение в области забора трансплантата [1–4]. У 1,3–15,0 % больных происходит миграция металлоконструкции (винтов, пластин), у 0,2–21,0 % – дислокация костного трансплантата [5]. По данным мета-анализа исследований, посвящен-

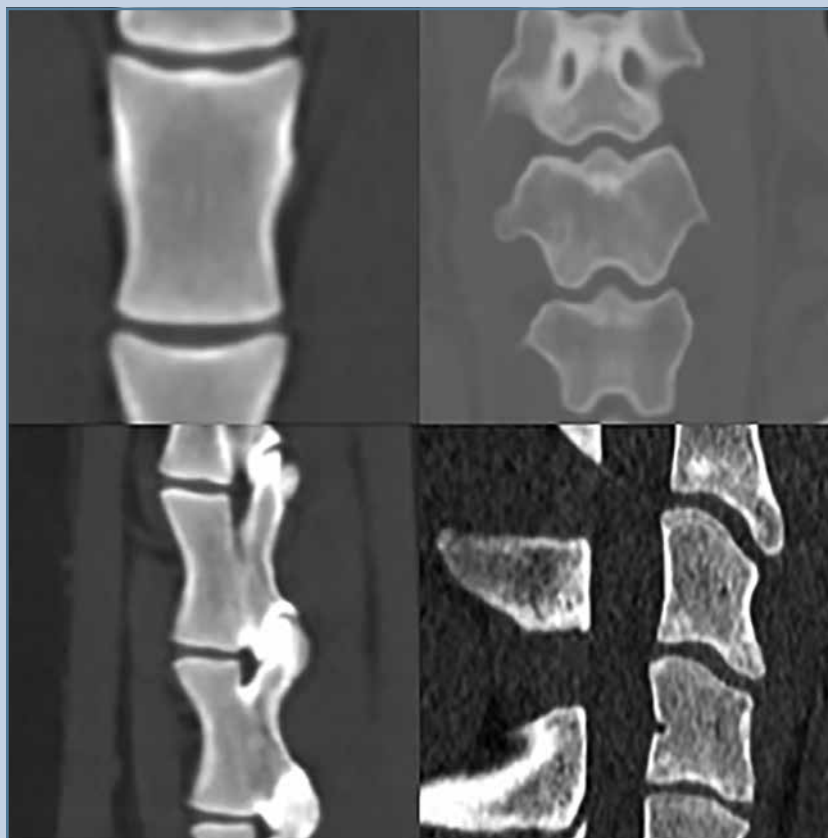


Рис. 1

Предоперационное КТ-исследование

ных фиксации шейного сегмента кейджами из небioresорбируемых материалов (титан, РЕЕК), частота формирования костного блока составила 46–100 % у титановых кейджей, 76–100 % – у кейджей из РЕЕК,

частота проседания кейджа – 16–35 % и 0–28 % соответственно [6]. По данным других авторов, межтеловой костный блок наблюдался у 94,3–100 % пациентов, проседание межтелового имплантата – у 0–10 % пациентов [7].

Неоднозначность полученных результатов и высокая частота осложнений явились катализатором развития технологии производства биорезорбируемых материалов [8, 9]. Так, например, биосовместимые пористые композитные скаффолды из полилактида/ β -трикальцийфосфата (PLA/ β -TCP) могут быть использованы для лечения остеохондральных дефектов [10]. В работе Laubach et al. [11] показаны результаты испытаний биодеградируемых кейджей из разных полимеров лактида. Материалом для изготовления был выбран поли-L-лактид и сополимер поли-L-лактид-со-D,L-лактид. Кейджи устанавливали крупным парнокопытным животным *in vivo*. Авторы сообщают о полной биорезорбции установленного кейджа через 2 года и формировании костного блока через 4 года после оперативного лечения. Актуальным остается вопрос оценки стабильности кейджей *ex vivo*. Работа в лаборатории на испытательных силовых машинах дает возможность моделирования разных видов механической нагрузки на позвоночный сегмент кадаверной модели позвоночника. В работе Teunissen et al. [12] сообщается об установке титановых кейджей в поясничный отдел позвоночника после дискэктомии. В качестве материала для исследования использовали кадаверные модели собак. Позвоночные сегменты до дискэктомии и после помещали в устройство для четырехточечного изгиба (сгибание–разгибание,

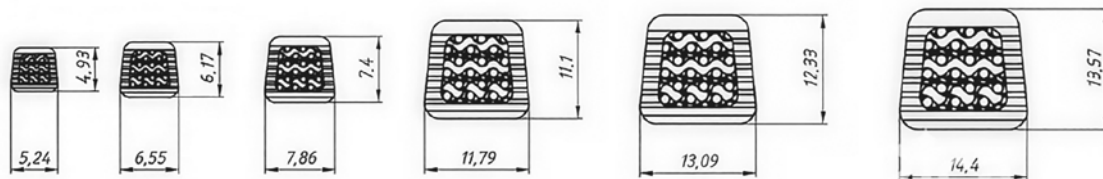


Рис. 2

Размерная линейка прототипов шейных кейджей

Таблица

Параметры 3D-печати экспериментальных образцов кейджей

Параметры	Кейджи с высотой 2,0; 2,5; 3,0 мм	Кейджи с высотой 4,5; 5,0; 5,5 мм
Температура сопла, °C	200	200
Температура стола, °C	70	70
Плотность заполнения, %	100	100
Скорость печати, мм/с	40	60
Высота слоя, мм	0,15	0,2

боковые наклоны и осевое вращение). По данным авторов, имплантация титановых кейджей без пластины (stand-alone-cage) восстанавливает стабильность позвоночного сегмента до состояния, аналогичного неоперированному позвоночному сегменту. К сожалению, в современных литературных источниках отсутствуют статьи о биомеханических испытаниях *ex vivo* с использованием биоразлагаемых шейных кейджей.

Материал и методы

Для исследования отобраны 12 кадаверных моделей шейного отдела позвоночника овец. Все модели были подвергнуты предоперационному КТ-исследованию (рис. 1) для оценки межтелового расстояния. Оценивали расстояние во фронтальной и сагиттальной плоскостях, размер варьировал от 2,5 до 5,0 мм.

Прототипы шейных кейджей по намеченным эскизам и рассчитанным заранее параметрам производили на 3D-принтере Ender 3v2. Размерная линейка прототипов шейных кейджей варьировала в следующих диапазонах: 2,0–5,5 мм в высоту, 5,24–14,4 мм в ширину, 4,93–13,57 мм в длину (рис. 2, табл.).

Прототипы кейджей нарезали при помощи программного обеспечения PrusaSlicer 2.7.1. Образцы производили из филамента на основе полилактида-L-лактида (рис. 3).

Механические характеристики экспериментальных образцов кейджей оценивали на испытательной машине INSTRON5982 при температуре 37 °C.

Испытания на сжатие проводили между параллельными пластинами при постоянной скорости деформирования 50 % в минуту. Дополнительно исследовали влияние ориентации образцов при 3D-печати на механические свойства (рис. 4).

После производства устройства на 12 моделях выполнили субтотальную резекцию межпозвонкового диска (рис. 5а). Кюретаж диска производили с помощью конхотомов и кусачек Керрисона, затем измеряли дисковое пространство и устанавливали опытные образцы шейных кейджей (рис. 5б, в).

Механические характеристики экспериментальных образцов кейджей оценивали на испытательной машине INSTRON5965 при температуре 23 °C и постоянной скорости деформирования



Рис. 3

Прототип шейного кейджа

5 мм/мин (рис. 6а). Провели статические и циклические испытания (10 циклов) в условиях действия компрессионной силы 300 Н.

Результаты

Независимо от ориентации изделий на печатном столе, образцы демонстрировали пластические свойства под действием компрессионной нагрузки без разрушения в заданном диапазоне деформаций. Для образцов с параллельной печатному столу ориентацией слоев сила текучести F_т составила 4,5 кН, после достижения которой наблюдали упрочнение.



Рис. 4

Экспериментальные образцы кейджей: **а** – с параллельной печатному столу ориентацией слоев (as built); **б** – с перпендикулярной печатному столу ориентацией слоев (transverse)

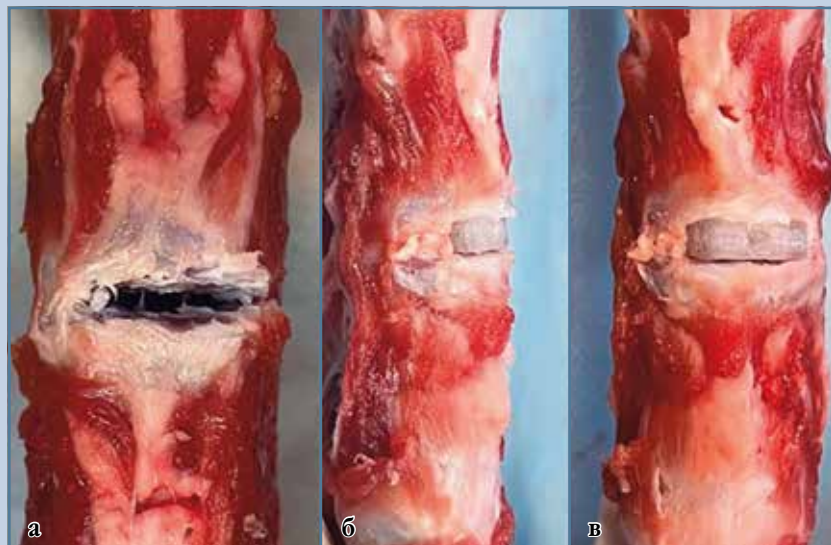


Рис. 5

Сегмент после субтотальной дискэктомии (а), установленный кейдж, вид сбоку (б), установленный кейдж, вид спереди (в)

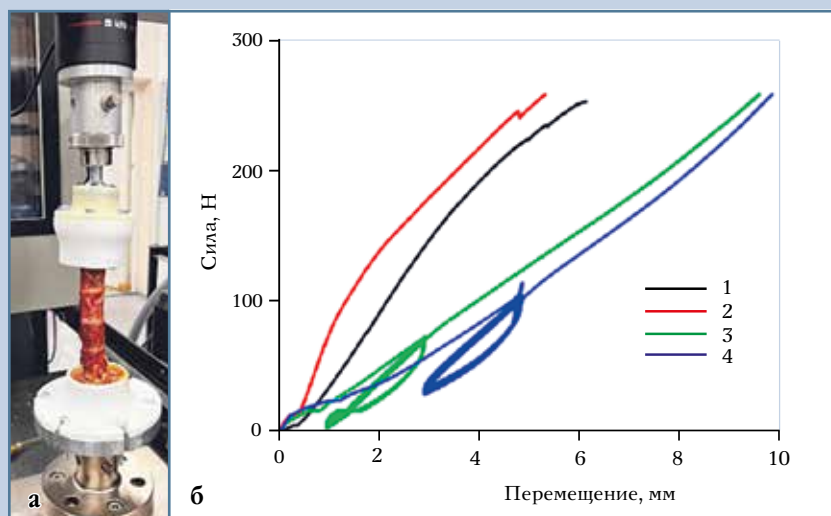


Рис. 6

Биомеханические испытания кейджа толщиной 5 мм: а – сегмент позвоночника с установленным кейджем и оснастка в сборке; б – деформационные кривые: 1 – сегмент позвоночника без кейджа, 2 – статическое нагружение сегмента позвоночника с установленным кейджем, 3 – циклические (в диапазоне 20–80 Н) испытания сегмента позвоночника с установленным кейджем, 4 – циклические (в диапазоне 40–120 Н) испытания сегмента позвоночника с установленным кейджем

Образцы с перпендикулярной печатному столу ориентацией слоев показали меньшую жесткость (наклон

прямолинейного участка на кривой), но большую силу текучести: $F_T = 5,5$ кН. При этом фиксировали на диаграмме

участок разупрочнения, вызванный изгибом отдельных слоев и потерей их устойчивости (рис. 7). Для прототипов из каждой серии установлены параметры компрессионной нагрузки, при наступлении которой возникают нежелательные пластические деформации.

Полученные значения превышают физиологическую компрессионную нагрузку, действующую в шейном отделе позвоночника человека и равную 736 Н [13–15].

На рис. 6б показаны деформационные кривые, полученные по итогам проведенных испытаний. Гистерезис при циклических испытаниях обусловлен вязкоупругими свойствами межпозвонковых дисков и не связан со свойствами материала изделия. При достижении силы, равной 300 Н, в позвоночном сегменте возникали большие, не свойственные реальным биомеханическим системам перемещения до 10 мм. В данном виде испытаний разработанные модели кейджей продемонстрировали высокую устойчивость к деформации при компрессионной нагрузке, отсутствие деформации и миграции в статических и циклических испытаниях. Так как естественными ограничениями использованной биомеханической системы являлось низкое значение силы, сопровождаемое большими перемещениями и деформациями межпозвонковых дисков, а также изменение свойств живых тканей *ex vivo*, проведены циклические (10 циклов) испытания в соответствии со стандартом ASTM F2077 на универсальной испытательной машине INSTRON 5965 при температуре 23 °С и постоянной скорости деформирования 1 мм/мин (рис. 8). Нагружение проводили до значения силы 5000 Н (500 кг) с предварительным циклированием для каждого из образцов в диапазоне от 1000 до 2000 Н, от 2000 до 3000 Н и от 3000 до 4000 Н соответственно.

Образцы с перпендикулярной печатному столу ориентацией слоев показали меньшую жесткость, но большую силу текучести ($F_T = 5,5$ кН). Таким образом, для произведенных

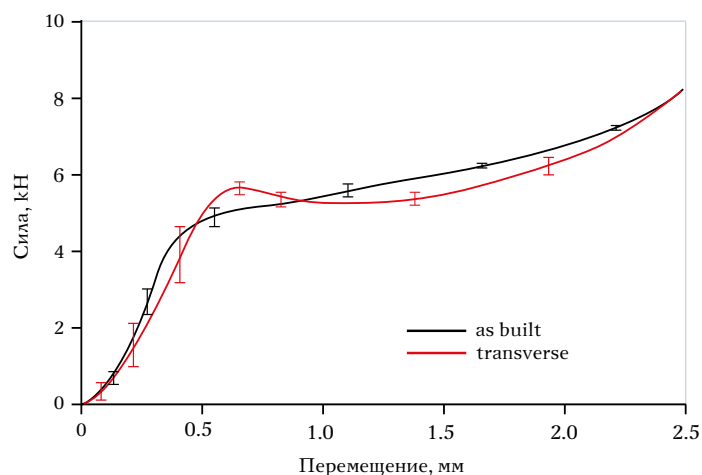


Рис. 7

Кривые деформирования экспериментальных образцов кейджей

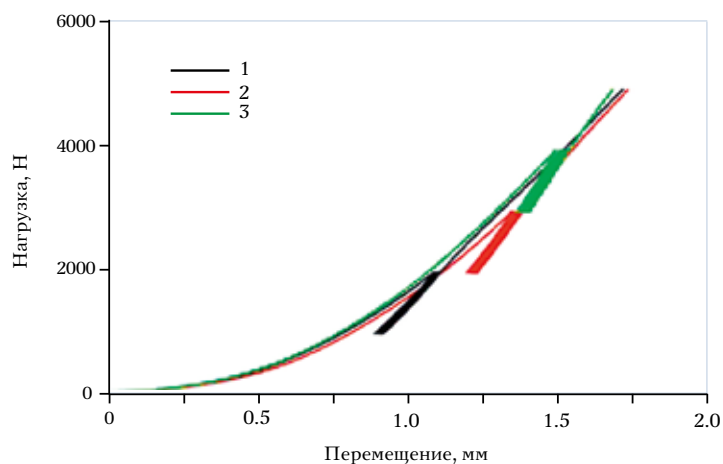


Рис. 8

Результаты механических испытаний с предварительным циклированием конструкций кейджей

устройств из каждой серии установлены значения компрессионной нагрузки, при достижении которой в опытном образце возникают нежелательные пластические деформации. Полученные значения кратно превы-

шают физиологическую компрессионную нагрузку, действующую в шейном отделе позвоночника человека. Кейджи высотой 5 мм, шириной 7,86 мм и длиной 7,4 мм показали оптимальную жесткость и стабильность в позво-

ночном сегменте. При заданных значениях амплитудных нагрузок циклов гистерезис практически отсутствует, что говорит о высокой устойчивости к деформации разработанных шейных изделий (рис. 8).

Заключение

Изделия демонстрируют пластические свойства и отсутствие разрушения независимо от ориентации на печатном столе. Параметры компрессионной нагрузки в данном виде испытаний несвойственны для биомеханических систем и значительно превышают компрессионную нагрузку, действующую в шейном отделе позвоночника человека, что доказывает высокую устойчивость кейджей к деформации и миграции в статических и циклических испытаниях.

Разработанные и протестированные *ex vivo* модели шейных кейджей, возможно, могут использоваться в качестве альтернативы небiorазлагаемым металлофиксаторам и кейджам, что предположительно позволит уменьшить количество вышеописанных послеоперационных осложнений за счет пластических свойств и биоразлагаемого компонента кейджей из поли-L-лактида. В дальнейшем планируется оценка механических, биосовместимых и биорезорбируемых свойств установленных имплантатов.

Работа частично проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (проектирование и 3D-печать образцов кейджей), частично – в рамках соглашения между НИЦ «Курчатовский институт» и РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского (подготовка кадаверных моделей и испытания).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом учреждения.

Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Литература/References

1. Аганесов А.Г., Арестов С.О., Асютин Д.С., Бадалов Н.Г., Бородулина И.В., Вершинин А.В., Вершинина Н.С., Гринь А.А., Гуца А.О., Древал М.Д., Кашцев А.А., Колесов С.В., Коновалов Н.А., Кордонский А.Ю., Королишин В.А., Кротенкова И.А., Крутько А.В., Курочкина Н.С., Мартынова М.А., Назаренко А.Г., Назаметдинова Д.М., Петросян Д.В., Полторако Е.Н., Юсупова А.Р. Хирургия дегенеративных поражений позвоночника: национальное руководство. Под ред. А.О. Гуца, Н.А. Коновалова, А.А. Гриня. Москва, 2019. [Aganesov AG, Arestov SO, Asyutin DS, Aganesov AG, Arestov SO, Asyutin DS, Badalov NG, Borodulina IV, Vershinin AV, Vershinina NS, Grin AA, Gushcha AO, Dreval MD, Kashcheev AA, Kolesov SV, Konovalov NA, Kordonsky AYU, Korolishin VA, Krotchenkova IA, Krutko AV, Kurochkin NS, Martynova MA, Nazarenko AG, Nazametdinova DM, Petrosyan DV, Poltorako EN, Yusupova AR. *Surgery of degenerative lesions of the spine: national manual*. Ed. by AO Gushcha, NA Konovalov, AA Grin. Moscow, 2019. IJ. SBN: 978-5-9704-5001-7]
2. Ваккаро А.Р., Барон И.М. Хирургия позвоночника. Оперативная техника. Пер. с англ. под ред. Ю.А. Шчербука. Москва, 2015. [Vaccaro AR, Baron IM. *Spine surgery. Operative technique*. Trans. from English ed by Yu.A. Shcherbuk. Moscow, 2015. ISBN: 978-5-91839-068-9.]
3. Bohlman HH, Emery SE, Goodfellow DB, Jones PK. Robinson anterior cervical discectomy and arthrodesis for cervical radiculopathy. Long-term follow-up of one hundred and twenty-two patients. *J Bone Joint Surg Am*. 1993;75(9):1298–307. DOI: 10.2106/00004623-199309000-00005
4. Emery SE, Bohlman HH, Bolesta MJ, Jones PK. Anterior cervical decompression and arthrodesis for the treatment of cervical spondylotic myelopathy. Two to seventeen-year follow-up. *J Bone Joint Surg Am*. 1998;80(7):941–951. DOI: 10.2106/00004623-199807000-00002
5. Гринь А.А., Касаткин Д.С. Несостоятельная фиксация шейного отдела позвоночника при его травмах и заболеваниях. *Клиническая практика*. 2017;2(30):49–55. [Grin AA, Kasatkin DS. Cervical spine insolvent fixation in the cases of its traumas and diseases. *Journal of Clinical Practice*. 2017;2(30):49–55]. EDN: YLYKMU
6. Seaman S, Kerezoudis P, Bydon M, Torner JC, Hitchon PW. Titanium vs. polyetheretherketone (PEEK) interbody fusion: Meta-analysis and review of the literature. *J Clin Neurosci*. 2017;44:23–29. DOI: 10.1016/j.jocn.2017.06.062
7. Ahmed AF, Al Dosari MAA, Al Kuwari A, Khan NM. The outcomes of stand alone polyetheretherketone cages in anterior cervical discectomy and fusion. *Int Orthop*. 2020;45:173–180. DOI: 10.1007/s00264-020-04760-1
8. Аржакова О.В., Аржаков М.С., Бадамшина Э.Р., Брюзгина Е.Б., Брюзгин Е.В., Быстрова А.В., Ваганов Г.В., Василевская В.В., Вдовиченко А.Ю., Галлямов М.О., Гумеров Р.А., Диденко А.Л., Зефилов В.В., Карпов С.В., Комаров П.В., Куличихин В.Г., Курочкин С.А., Ларин С.В., Малкин А.А., Миленин С.А., Музафаров А.М., Молчанов В.С., Навроцкий А.В., Новаков И.А., Панарин Е.Ф., Панова И.Г., Потемкин И.И., Светличный В.М., Седущ Н.Г., Серенко О.А., Успенский С.А., Филиппова О.Е., Хохлов А.Р., Чвалун С.Н., Шейко С.С., Шибасев А.В., Эльманович И.В., Юдин В.Е., Якиманский А.В., Ярославов А.А. Полимеры будущего. *Успехи химии*. 2022;91(12):RCR5062. [Arzhakova OV, Arzhakov MS, Badamshina ER, Bryuzgina EB, Bryuzgin EV, Byistrova AV, Vaganov GV, Vasilevskaya VV, Vdovichenko AYU, Gallyamov MO, Gumerov RA, Didenko AL, Zefirov VV, Karpov SV, Komarov PV, Kulichikhin VG, Kurochkin SA, Larin SV, Malkin AYU, Milenin SA, Muzafarov AM, Molchanov VS, Navrotsky AV, Novakov IA, Panarin EF, Panova IG, Potemkin II, Svetlichny VM, Sedush NG, Serenko OA, Uspensky SA, Filippova OE, Khokhlov AR, Chvalun SN, Sheiko SS, Shibaev AV, Elmanovich IV, Yudin VE, Yakimansky AV, Yaroslavov AA. *Polymers of the future. Uspekhi Khimii (Russ. Chem. Rev)*. 2022;91(12):RCR5062]. DOI: 10.57634/RCR5062 EDN: EFUAAAB
9. Crouzier T, Sailhan F, Becquart P, Guillot R, Logeart-Avramoglou D, Picart C. The performance of BMP-2 loaded TCP/HAP porous ceramics with a polyelectrolyte multilayer film coating. *Biomaterials*. 2011;32:7543–7554. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.06.062
10. Haaparanta AM, Haimi S, Ell V, Hopper N, Miettinen S, Suuronen R, Kellomäki M. Porous polylactide/beta-tricalcium phosphate composite scaffolds for tissue engineering applications. *J Tissue Eng Regen Med*. 2010;4:366–373. DOI: 10.1002/term.249
11. Laubach M, Kobbe P, Hutmacher DW. Biodegradable interbody cages for lumbar spine fusion: Current concepts and future directions. *Biomaterials*. 2022;288:121699. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2022.121699
12. Teunissen M, van der Veen AJ, Smit TH, Tryfonidou MA, Meij BP. Effect of a titanium cage as a stand-alone device on biomechanical stability in the lumbosacral spine of canine cadavers. *Vet J*. 2017;220:17–23. DOI: 10.1016/j.tvjl.2016.12.007
13. Sun B, Han Q, Sui F, Zhang A, Liu Y, Xia P, Wang J, Yang X. Biomechanical analysis of customized cage conforming to the endplate morphology in anterior cervical discectomy fusion: A finite element analysis. *Heliyon*. 2023;9:e12923. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e12923
14. Moussa A, Tanzer M, Pasini D. Cervical fusion cage computationally optimized with porous architected Titanium for minimized subsidence. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018;85:134–151. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.05.040
15. Wang Y, Liu Y, Zhang A, Han Q, Jiao J, Chen H, Gong X, Luo W, Yue J, Zhao X, Wang J, Wu M. Biomechanical evaluation of a novel individualized zero-profile cage for anterior cervical discectomy and fusion: a finite element analysis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1229210. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1229210

Адрес для переписки:

Спирин Олег Артемович

119991, Россия, Москва, Абрикосовский пер., 2,

Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского,

spirinoleg94@gmail.com

Address correspondence to:

Spirin Oleg Artyomovich,

Russian Scientific Center of Surgery n.a. Acad. B.V. Petrovsky,

2 Abrikosovsky Pereulok, Moscow, 119991, Russia,

spirinoleg94@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.12.2024

Рецензирование пройдено 19.06.2025

Подписано в печать 14.07.2025

Received 29.12.2024

Review completed 19.06.2025

Passed for printing 14.07.2025

Олег Артемович Спирин, младший научный сотрудник, врач отделения хирургии позвоночника, Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского, Россия, 119991, Москва, Абрикосовский пер., 2, eLibrary SPIN: 2168-6039, ORCID: 0000-0002-3243-4327, spirinoleg94@gmail.com;
Александр Георгиевич Аганесов, д-р мед. наук, проф., руководитель отделения хирургии позвоночника, Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского, Россия, 119991, Москва, Абрикосовский пер., 2, eLibrary SPIN: 1805-5790, ORCID: 0000-0001-8823-5004, aaganesov@gmail.com;
Марк Микаелович Алексанян, канд. мед. наук, старший научный сотрудник, врач отделения хирургии позвоночника, Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского, Россия, 119991, Москва, Абрикосовский пер., 2, eLibrary SPIN: 3477-2860, ORCID: 0000-0003-1321-086X, Alexanyanmm@gmail.com;
Сергей Александрович Макаров, научный сотрудник, врач отделения хирургии позвоночника, Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского, Россия, 119991, Москва, Абрикосовский пер., 2, eLibrary SPIN: 2010-9879, ORCID: 0000-0001-7237-240X, makarov.spine@gmail.com;
Никита Геннадьевич Седуш, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории полимерных материалов, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, ORCID: 0000-0002-6744-7662, Sedush_NG@nrcki.ru;
Артур Евгеньевич Крупнин, младший научный сотрудник, и.о. руководителя ресурсного центра аддитивных и виртуальных технологий, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, ORCID: 0000-0002-5674-4143, artkrupnin@gmail.com;
Всеволод Васильевич Побежимов, лаборант-исследователь ресурсного центра аддитивных и виртуальных технологий, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, eLibrary SPIN: 9760-4662, ORCID: 0009-0003-6326-2382, vsevladeyu@mail.ru.

Oleg Artemovich Spirin, junior researcher of the Spine Surgery Department, Russian Scientific Center of Surgery n.a. Acad. B.V. Petrovsky, 2 Abrikosovsky Pereulok, Moscow, 119991, Russia, eLibrary SPIN: 2168-6039, ORCID: 0000-0002-3243-4327, spirinoleg94@gmail.com;
Alexander Georgyevich Aganesov, DMSc, Prof., Chief of the Spine Surgery Department, Russian Scientific Center of Surgery n.a. Acad. B.V. Petrovsky, 2 Abrikosovsky Pereulok, Moscow, 119991, Russia, eLibrary SPIN: 1805-5790, ORCID: 0000-0001-8823-5004, aaganesov@gmail.com;
Mark Mikaelovich Aleksanyan, MD, PhD, senior researcher of the Spine Surgery Department, Russian Scientific Center of Surgery n.a. Acad. B.V. Petrovsky, 2 Abrikosovsky Pereulok, Moscow, 119991, Russia, eLibrary SPIN: 3477-2860, ORCID: 0000-0003-1321-086X, Alexanyanmm@gmail.com;
Sergei Aleksandrovich Makarov, researcher of the Spine Surgery Department, Russian Scientific Center of Surgery n.a. Acad. B.V. Petrovsky, 2 Abrikosovsky Pereulok, Moscow, 119991, Russia, eLibrary SPIN: 2010-9879, ORCID: 0000-0001-7237-240X, makarov.spine@gmail.com;
Nikita Gennadyevich Sedush, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of Polymeric Materials, National Research Center "Kurchatov Institute", 1 Akademika Kurchatova Square, Moscow, 123182, Russia, ORCID: 0000-0002-6744-7662, Sedush_NG@nrcki.ru;
Artur Evgenyevich Krupnin, junior researcher of the Laboratory of Polymeric Materials, Acting Head of the Resource Center for Additive and Virtual Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", 1 Akademika Kurchatova Square, Moscow, 123182, Russia, ORCID: 0000-0002-5674-4143, artkrupnin@gmail.com;
Vsevolod Vasilyevich Pobezhimov, research assistant of the Resource Center for Additive and Virtual Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", 1 Akademika Kurchatova Square, Moscow, 123182, Russia, eLibrary SPIN: 9760-4662, ORCID: 0009-0003-6326-2382, vsevladeyu@mail.ru.