

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСШИРЯЕМЫХ КЕЙДЖЕЙ ДЛЯ ПОЯСНИЧНОГО МЕЖТЕЛОВОГО СПОНДИЛОДЕЗА

Толкачев В.С., Бажанов С.П., Шульга А.Е., Островский В.В., Ульянов В.Ю.

*Научно-исследовательский институт травматологии, ортопедии и нейрохирургии ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава России (НИИТОН СГМУ), Саратов, e-mail: v.u.ulyanov@gmail.com*

В данном обзоре, цель которого – систематизировать информацию источников, посвященных оценке клинических результатов применения расширяемых кейджей для поясничного межтелового спондилодеза, в качестве материалов использованы отечественные и зарубежные (англоязычные) исследования за период 2014–2024 гг., включенные в PubMed, Google Scholar и eLibrary. Применение расширяемых кейджей при выполнении поясничного межтелового спондилодеза демонстрирует значительное улучшение показателей, измеряемых по индексу Освестри и визуальной аналоговой шкале для боли в спине, в течение года после операции, однако сравнение послеоперационных результатов между группами с использованием статических и расширяемых кейджей после минимально инвазивного трансфораминального межтелового спондилодеза не выявило значительных различий по вышеобозначенным показателям. Большинство научных публикаций демонстрируют лучшие результаты поясничного межтелового спондилодеза с применением расширяемых кейджей, однако в отдельных источниках сообщается о сопоставимых и даже худших результатах их использования по сравнению со статическими конструкциями. С учетом недостатков и достоинств расширяемых поясничных межтеловых кейджей исследования по их разработке и внедрению в клиническую практику могут позволить улучшить результаты лечения пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника.

Ключевые слова: позвоночник, поясничный отдел, дегенеративные заболевания, хирургическое лечение, межтеловой спондилодез, расширяемые кейджи.

*Финансирование исследования осуществляется в соответствии с соглашением Министерства здравоохранения Российской Федерации на выполнение государственного задания «Разработка прототипов имплантата для замещения тела позвонка грудного и поясничного отделов позвоночника и инструментария для его установки» (номер государственной регистрации НИОКТР 1023022700061-0-3.2.10).*

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

## POTENTIAL OF EXPANDABLE CAGES FOR LUMBAR INTERBODY FUSION

Tolkachev V.S., Bazhanov S.P., Shulga A.E., Ostrovskij V.V., Ulyanov V.Yu.

*Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education V.I. Razumovsky Saratov State Medical University, the Russian Federation Ministry of Healthcare, Saratov, e-mail: v.u.ulyanov@gmail.com*

The objective of this review was to systematize the data from Russian and foreign (in English) 2014-2024 studies on assessing the outcomes of using expandable cages for lumbar interbody fusion. The material was retrieved from PubMed, Google Scholar and eLibrary using the key words spine, lumbar spine, degenerative diseases, surgical management, interbody fusion, expandable cages. The use of expandable cages for lumbar interbody fusion ensures significant improvement in scores of Oswestry and pain visual analog scale for back pain within the first post-op year. However, the comparison of surgery outcomes between the groups of patients with static and expandable cages installed during minimal invasive transthoracic intertebral spondylodesis did not reveal significant differences in those indicators. Considering all advantages and disadvantages of the expandable lumbar interbody cages, further research aimed at improving their design and implementation in clinical practice may improve surgery outcomes for patients with degenerative spinal diseases.

Keywords: spine, lumbar spine, degenerative diseases, surgical management, interbody fusion, expandable cages

*The research is financed in accordance with the agreement of the Ministry of Health of the Russian Federation for the implementation of the state assignment "Development of prototypes of an implant for replacing the vertebral body of the thoracic and lumbar spine and instrumentation for its*

*installation" (state registration number of R&D 1023022700061-0-3.2.10). The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

**Введение.** С развитием хирургии позвоночника большинство операций при его дегенеративных изменениях в поясничном отделе сосредоточилось на межпозвонковых дисках. Как альтернатива классическим остеотомиям стали применяться расширяемые кейджи для поясничного спондилодеза, которые могут обеспечивать оптимальное увеличение высоты диска и восстановление лордоза по сравнению со статичными конструкциями. Расширяемые кейджи позволяют хирургам достичь планируемых результатов коррекции без необходимости во множестве пробных манипуляций, что снижает травматизм замыкательной пластины и вместе с тем уменьшает риск проседания имплантата.

Межтеловой спондилодез – это хирургическое вмешательство, направленное на достижение костного сращения между верхним и нижним телами позвонков путем удаления межпозвонкового диска и имплантации в дисковое пространство кейджа, содержащего костный материал или искусственный остеоиндуктор [1]. В классическом варианте применяется заднебоковой спондилодез, однако были разработаны еще и процедуры межтелового спондилодеза в поясничном отделе позвоночника, чтобы обеспечить надежное сращение между телами позвонков. Так, первый задний поясничный межтеловой спондилодез (PLIF) выполнили в 1944 году Бриггс и Миллиган, используя аутокость, взятую из остистых отростков позвонков [2], однако данная технология не была распространена вплоть до 1988 года, когда использование транспедикулярной фиксации позвоночно-двигательных сегментов привело к повышению стабильности и, как следствие, частоты состоявшегося спондилодеза [3].

**Цель исследования:** систематизировать отечественные и зарубежные компетенции в области применения расширяемых кейджей, используемых для поясничного межтелового спондилодеза у пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника.

**Материал и методы исследования.** Проведен анализ отечественных и зарубежных источников, включенных в поисковые системы по биомедицинским исследованиям PubMed, научным публикациям Google Scholar, а также в российскую научную электронную библиотеку eLibrary, по ключевым словам: «позвоночник», «поясничный отдел», «дегенеративные заболевания», «хирургическое лечение», «межтеловой спондилодез», «расширяемые кейджи».

В первичный анализ было включено 137 научных работ, опубликованных за период 2014–2024 гг. в отечественных и зарубежных изданиях. Критерием для последующего исключения из анализа литературных источников стало отсутствие описания конструктивных

особенностей поясничных межтеловых кейджей, имплантированных при спондилодезе, и результатов хирургического лечения. В итоге было проанализировано 29 источников, в структуре которых – клинические исследования и систематические обзоры литературы.

Исследование было рассмотрено и одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава России (протокол № 2 от 01.02.2024 г.).

**Результаты исследования и их обсуждение.** На современном этапе получили активное развитие мини-инвазивные процедуры, такие как латеральный косой (препсоас) доступ (OLIF), прямой латеральный (DLIF), передний межтеловой доступ (ALIF) и др. [4]. Разработка мини-инвазивных техник была направлена на снижение повреждения мягких тканей и предотвращение различных осложнений, таких как «кифозирование» оперированного сегмента, повреждение поясничного сплетения. По различным данным, частота подобных осложнений достигала 70% [5]. Для облегчения минимально инвазивных операций были разработаны расширяемые кейджи для спондилодеза, преимущество которых заключается в их способности увеличивать высоту межпозвоночного дискового пространства и угол лордоза по сравнению с традиционными статическими кейджами.

Изначальные модели межтеловых кейджей для спондилодеза изготавливались из титана. Он обладает высоким уровнем механической прочности и устойчивостью к коррозии, что делает этот материал предпочтительным для медицинских имплантатов. Однако применение таких моделей вызывало значительные артефакты при магнитно-резонансной томографии, что усложняло послеоперационный мониторинг окружающих сосудисто-нервных структур [6]. В 1987 году D.F. Williams и соавторы разработали полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), из которого стали изготавливать современные модели кейджей, так как этот материал сочетает прочность с оптимальной гибкостью и достаточной устойчивостью к износу. Кроме того, он обладает естественной радиопрозрачностью, что делало его совместимым с различными методами нейровизуализации [7]. Однако ПЭЭК является гидрофобным материалом, что не позволяет ему полностью срастаться с костной тканью. Для решения этих ограничений были разработаны трехмерные (3D) печатные титановые кейджи с пористой структурой.

Несмотря на обилие различных моделей расширяемых кейджей, они, как правило, функционируют на основе схожих принципов, заключающихся в изменении высоты, угла лордоза и площади контакта внутри диска [8]. Ранние версии расширяемых кейджей имели преимущественно простую конструкцию с ограниченным количеством компонентов, для расширения передней части кейджа использовались внутренние винты. Однако такая структура имела ограничения и не позволяла значительно изменять требуемые параметры.

Современные модели кейджей являются более сложными и позволяют достигнуть большей степени расширения [9]. Кейдж в сложенном состоянии вводится в дисковое пространство, где затем расширяется, что позволяет использовать его в узком хирургическом коридоре при мини-инвазивной операции. Угол лордоза дают возможность регулировать конструкции, у которых передняя часть расширяется больше, чем задняя, после чего внутрь кейджа вводят костный материал, что требует специального инструментария и дополнительной квалификации хирурга [9, 10].

При планировании хирургического вмешательства с целью изменения показателей сагиттального баланса важно учитывать особенности использующейся конструкции. Различия расширяемых кейджей заключаются в их размерах и возможности задавать градус лордоза. Минимальная высота наиболее часто встречающихся конструкций варьирует от 5 до 7 мм в сложенном состоянии с возможностью увеличения размера как в вертикальном, так и в латеральном направлении до 7–14 мм, при этом угол лордоза увеличивается в пределах 0–22 градусов [11].

Расширяемые кейджи имеют несколько преимуществ. Значительная площадь кейджа с большим количеством остеоиндуктора повышает шансы сращения и уменьшает риск проседания замыкательных пластин [12]. При задних доступах использование большого кейджа может быть затруднительно за счет узкого хирургического коридора, ограниченного нервными структурами и выраженными дегенеративно-дистрофическими изменениями позвонков, при этом введение небольшого кейджа в диск с последующим его расширением позволяет обеспечить безопасность в сочетании с достаточным объемом костного материала. Еще одним важным преимуществом является расширение по высоте [1, 13]. При выполнении PLIF или TLIF использование больших кейджей в ограниченных пространствах может привести к тракционным повреждениям корешков. Использование кейджей с изменяемой высотой позволяет обеспечить достаточный уровень фораминальной декомпрессии, а также дозировать натяжение задней продольной связки и фиброзного кольца, что приводит к более качественной стабилизации позвоночно-двигательного сегмента [14].

В литературе встречаются разрозненные сообщения об эффективности расширяемых кейджей по сравнению со статичными. Так, T. Tassemeier и соавт. [12] отметили улучшение высоты диска и сегментарного лордоза, измеренной по Коббу, у пациентов с установленными расширяемыми кейджами. Однако в сравнительном исследовании T.J. Yee и соавт. [15] не смогли продемонстрировать значимых различий в сегментарном или общем лордозе поясничного отдела, а J. Jagannathan и соавт. [16], напротив, достигли увеличения высоты диска и в итоге поясничного лордоза при установке расширяемого кейджа в передней части в сочетании с двусторонней фасетэктомией.

В ретроспективном сравнении изогнутых и прямых расширяемых кейджей T. Tassemeier и соавт. [12] сообщили об улучшении высоты диска в группе с изогнутыми кейджами. Изогнутые расширяемые кейджи, как и прямые, повышают высоту диска и фораминального отверстия, но дополнительно способствуют улучшению сегментарного лордоза, что коррелировало с улучшением клинических исходов. Поскольку прямые кейджи обычно устанавливаются под углом в соответствии с углом подхода, изогнутые кейджи могут быть размещены в передних отделах позвонка, что позволяет достичь большего лордоза.

Применение расширяемых кейджей при выполнении поясничного межтелового спондилодеза демонстрирует у пациентов значительное улучшение показателей, измеряемых по индексу Освестри (ODI) и визуальной аналоговой шкале (ВАШ) для боли в спине, в течение года после операции. Однако, сравнивая послеоперационные результаты между группами с использованием статических и расширяемых кейджей после минимально инвазивного трансфораминального межтелового спондилодеза (*minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion / MIS-TLIF*), B. Khechen и соавт. не выявили значительных различий в показателях ODI и ВАШ для боли в нижней части спины и нижних конечностях. Авторы предполагают, что оба типа кейджей обеспечивают достаточную декомпрессию корешков и сохранение сегментарного лордоза [17].

Несмотря на многочисленные преимущества, имплантация расширяемых кейджей связана с рядом осложнений. I.C. Stein и соавт. сообщили о случае осложнения при имплантации расширяемого ПЭЭК-кейджа [18]. Конструктивные особенности этого кейджа состояли в использовании пластин толщиной 1 мм, за счет имплантации этих пластин в кейдж происходило его расширение в размере, при этом контроль расширения заключался в имплантации большего или меньшего количества пластин. Хотя положение кейджа сразу после операции было удовлетворительным, контрольное исследование показало, что одна из пластин сместилась в позвоночный канал, что потребовало повторной операции.

Еще одной из важных проблем, связанных с расширяемыми кейджами, является то, что при их использовании чаще отмечается проседание, чем при использовании статических кейджей. По данным разных авторов, частота таких осложнений составляет 19–20% у расширяемых кейджей и 5–6% – у нерасширяемых [19]. Это связано с тем, что чрезмерное расширение у пациентов со сниженной высотой диска может привести к повреждению замыкательных пластин позвонков, особенно при выраженном остеопорозе и остеопении.

В литературе также встречаются сообщения о трудности введения костного материала при использовании расширяемых кейджей [20]. В отличие от статических кейджей, которые предварительно заполняются материалом для костного сращения, расширяемые кейджи сначала вводятся в тело и расширяются, а уже затем заполняются остеоиндуктором с помощью

специального инструментария. Это снижает плотность заполнения и может приводить к снижению случаев состоявшегося спондилодеза. Кроме того, как одно из препятствий для широкого распространения расширяемых кейджей следует отметить их высокую стоимость [21].

На современном этапе происходит увеличение числа минимально инвазивных операций. По мере этого расширяемые кейджи для поясничного межтелового спондилодеза становятся все более популярными за счет их конструктивных и технических возможностей. Данные конструкции позволяют восстановить лордоз, повысить площадь контакта замыкательных пластин с остеоиндуктором, а также свободно имплантировать их в узкое дисковое пространство. Однако на данный момент большинство расширяемых кейджей изготавливаются из металлов из-за их механических свойств.

Разработки в области материаловедения открывают новые возможности для создания более эффективных и надежных конструкций межтеловых кейджей. Одним из перспективных направлений является использование композитных материалов, таких как РЕЕК с добавлением биоактивных покрытий, которые стимулируют костное сращение. Например, покрытия на основе гидроксиапатита могут улучшить интеграцию кейджа с костной тканью, минимизируя риск его смещения или проседания. Металлы, например титан, могут создавать артефакты при магнитно-резонансной и компьютерной томографиях, затрудняя точную оценку окружающих тканей. Выполнение металлических частей расширяемых кейджей из рентгенпрозрачного ПЭЭК может принести значительные преимущества, однако изготовление кейджа, полностью состоящего из этого материала, на текущий момент не представляется возможным.

Также следует отметить, что использование аддитивных технологий может позволить улучшить клинические результаты при имплантации новых типов конструкций. Технологии 3D-печати позволяют создавать кейджи с пористой структурой, которая способствует росту костной ткани. Такие кейджи не только обеспечивают механическую стабильность, но и ускоряют процесс регенерации за счет увеличенной площади контакта с костной тканью. Персонализированные имплантаты, изготовленные с использованием 3D-печати, могут быть адаптированы к индивидуальным анатомическим особенностям пациента, что особенно важно при сложных случаях дегенеративных изменений позвоночника. Также обсуждается возможность использования биоактивных материалов, которые непосредственно участвуют в процессе костного сращения. Такие разработки могут радикально изменить подход к лечению пациентов с заболеваниями позвоночника, обеспечив более стабильные и долговременные результаты. Однако различные факторы, такие как высокая цена подобных конструкций и

ограниченное производство, снижают доступность кейджей такого типа для пациентов и лечащих врачей.

Расширяемые кейджи могут применяться в различных типах хирургических доступов, таких как TLIF, ALIF и LLIF. TLIF традиционно считается наиболее знакомым доступом для хирургов со специализацией в спинальной хирургии, однако при его применении возможно повышение степени рубцово-спаечного процесса. При выполнении ALIF статические кейджи обеспечивают наибольшее восстановление лордоза, поэтому добавление динамического компонента имеет наибольший потенциал для этого доступа, но результаты пока остаются предварительными. Крупнейший недостаток ALIF заключается в риске повреждений забрюшинного пространства и полых органов при манипуляциях перед поясничным отделом позвоночника. Использование расширяемых кейджей при LLIF позволяет получить доступ через неизмененные ткани без манипуляций с задними нервными структурами или рубцами после предыдущих операций, но данная процедура требует освоения и имеет кривую обучения.

С развитием цифровых технологий растет интерес к применению искусственного интеллекта в проектировании и использовании расширяемых кейджей для спондилодеза. Современные алгоритмы искусственного интеллекта позволяют анализировать огромные массивы данных клинической практики и моделировать оптимальные конструктивные решения для различных анатомических и клинических условий. Например, искусственный интеллект может использоваться для прогнозирования прочности кейджа, риска его проседания и вероятности успешного сращения с костной тканью.

Хотя многие клинические исследования подтверждают преимущества расширяемых кейджей над статическими, отдельные работы указывают на отсутствие значимых различий в долгосрочных результатах. Например, в сравнительных исследованиях отмечается, что клинические показатели, такие как уровень боли по шкале ВАШ и индексу Освестри, остаются сопоставимыми у пациентов, перенесших операции с использованием как статических, так и расширяемых кейджей. Кроме того, некоторые исследования подчеркивают, что риск осложнений, таких как проседание имплантата, может быть выше при использовании расширяемых конструкций. Это объясняется особенностями механизма расширения, который может оказывать чрезмерное давление на замыкательные пластины, особенно у пациентов с остеопорозом.

**Заключение.** С учетом недостатков и достоинств расширяемых поясничных межтеловых кейджей исследования по их разработке, оптимизации конструкции и внедрению в клиническую практику могут позволить улучшить результаты лечения пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника.

## Список литературы

1. Алейник А.Я., Млявых С.Г., Qureshi S. Латеральный косой (препсоас) доступ при выполнении поясничного спондилодеза (обзор) // Современные технологии в медицине. 2021. Т. 13, № 5. С. 70-82. DOI: 10.17691/stm2021.13.5.09.
2. Briggs H., Milligan P.R. Chip Fusion of the Low Back Following Exploration of the Spinal Canal // J. Bone Joint Surg. 1944. Is. 26. P. 125-130.
3. Steffee A.D., Sitkowski D.J. Posterior Lumbar Interbody Fusion and Plates // Clin. Orthop. Relat. Res. 1988. Is. 227. P. 99-102.
4. Mobbs R.J., Phan K., Malham G., Seex K., Rao P.J. Lumbar Interbody Fusion: Techniques, Indications and Comparison of Interbody Fusion Options Including Plif, Tlif, mi-Tlif, olif/atp, Llif and Alif // J. Spine Surg. 2015. Is. 1. P. 2-18. DOI: 10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05.
5. Kotwal S., Kawaguchi S., Lebl D., Hughes A., Huang R., Sama A., Cammisa F., Girardi F. Minimally invasive lateral lumbar interbody fusion: clinical and radiographic outcome at a minimum 2-year follow-up // J Spinal Disord Tech. 2015. Vol. 28, Is. 4. P. 119-125. DOI: 10.1097/bsd.0b013e3182706ce7.
6. McGilvray K.C., Waldorff E.I., Easley J., Seim H.B., Zhang N., Linovitz R.J., Ryaby J.T., Puttlitz C.M. Evaluation of a Polyetheretherketone (Peek) Titanium Composite Interbody Spacer in an Ovine Lumbar Interbody Fusion Model: Biomechanical, Microcomputed Tomographic, and Histologic Analyses // Spine J. 2017. Is. 17. P. 1907-1916. DOI: 10.1016/j.spinee.2017.06.034.
7. Williams D.F., McNamara A., Turner R.M. Potential of Polyetheretherketone (Peek) and Carbon-Fibre-Reinforced Peek in Medical Applications // J. Mater. Sci. Lett. 1987. Is. 6. P. 188-190.
8. Kim J.W., Park H.C., Yoon S.H., Oh S.H., Roh S.W., Rim D.C., Kim T.S. A Multi-center Clinical Study of Posterior Lumbar Interbody Fusion with the Expandable Stand-Alone Cage (Tyche(r) Cage) for Degenerative Lumbar Spinal Disorders // J. Korean Neurosurg. Soc. 2007. Vol. 42, Is. 4. P. 251-257. DOI: 10.3340/jkns.2007.42.4.251.
9. Buckland A.J., Proctor D.J. Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion with Expandable Cages // JBJS Essent. Surg. Tech. 2023. Vol. 13, Is. 2. e21. DOI: 10.2106/JBJS.ST.21.00062.
10. Park D.Y., Heo D.H. The Use of Dual Direction Expandable Titanium Cage with Biportal Endoscopic Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: A Technical Consideration with Preliminary Results // Neurospine. 2023. Vol. 20, Is. 1. P. 110-118. DOI: 10.14245/ns.2346116.058.
11. Cannestra A.F., Peterson M.D., Parker S.R., Roush T.F., Bundy J.V., Turner A.W. MIS Expandable Interbody Spacers: A Literature Review and Biomechanical Comparison of an



Expandable MIS TLIF with Conventional TLIF and ALIF // Spine. 2016. Vol. 41 (Suppl. 8). P. S44-S49. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001465

12. Tassemeier T., Haversath M., Jäger M. Transforaminal lumbar interbody fusion with expandable cages: Radiological and clinical results of banana-shaped and straight implants // J. Craniovertebr Junction Spine. 2018. Vol. 9, Is. 3. P. 196-201. DOI: 10.4103/jcvjs.JCVJS\_56\_18.

13. Chen C., Li Q., Wang W., Ji C., Kang Y., Wang C., Zhang H., Zhang M., Zhou H., Feng H., Feng S. Comparison of the efficacy of expandable interbody fusion cage (EXP-IFC) and non-expandable interbody fusion cage (NE-IFC) in MIS-TLIF for lumbar degenerative diseases: A systematic retrospective study on 62 patients // Front Surg. 2022. Is. 9. P. 1008171.

DOI: 10.3389/fsurg.2022.1008171.

14. Jitpakdee K., Sommer F., Gouveia E., Mykolajchuk C., Boadi B., Berger J., Hussain I., Härtl R. Expandable cages that expand both height and lordosis provide improved immediate effect on sagittal alignment and short-term clinical outcomes following minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS TLIF) // J Spine Surg. 2024. Vol. 10, Is. 1. P. 55-67.

DOI: 10.21037/jss-23-106.

15. Yee T.J., Joseph J.R., Terman S.W., Park P. Expandable vs static cages in transforaminal lumbar interbody fusion: radiographic comparison of segmental and lumbar sagittal angles // Neurosurgery. 2017. Vol. 81, Is. 1. P. 69-74. DOI: 10.1093/neuros/nyw177.

16. Jagannathan J., Sansur C.A., Oskouian R.J. Jr., Fu K.M., Shaffrey C.I. Radiographic restoration of lumbar alignment after transforaminal lumbar interbody fusion // Neurosurgery. 2009. Vol. 64, Is. 5. P. 955-963; discussion 963-954. DOI: 10.1227/01.NEU.0000343544.77456.46.

17. Khechen B., Haws B.E., Patel D.V., Yoo J.S., Guntin J.A., Cardinal K.L., Iyer S., Singh K. Static Versus Expandable Devices Provide Similar Clinical Outcomes Following Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion // HSS J. 2020. Vol. 16, Is. 1. P. 46-53.

DOI: 10.1007/s11420-019-09677-z.

18. Stein I.C., Than K.D., Chen K.S., Wang A.C., Park P. Failure of a polyether-ether-ketone expandable interbody cage following transforaminal lumbar interbody fusion // Eur. Spine J. 2015. Vol. 24, Suppl 4. P. S555-559. DOI: 10.1007/s00586-014-3704-1.

19. Chang C.C., Chou D., Pennicooke B., Rivera J., Tan L.A., Berven S., Mummaneni P.V. Long-term radiographic outcomes of expandable versus static cages in transforaminal lumbar interbody fusion // J Neurosurg Spine. 2020. Vol. 34, Is. 3. P. 471-480. DOI: 10.3171/2020.6.SPINE191378.

20. Lee S.B., Yoon J., Park S.J., Chae D.S. Expandable Cages for Lumbar Interbody Fusion: A Narrative Review // J. Clin. Med. 2024. Vol. 13, Is. 10. 2889. DOI: 10.3390/jcm13102889.

21. Macki M., Hamilton T., Haddad Y.W., Chang V. Expandable Cage Technology-Transforaminal, Anterior, and Lateral Lumbar Interbody Fusion // Oper Neurosurg (Hagerstown). 2021. Is. 21 (Suppl 1). S69-S80. DOI: 10.1093/ons/opaa342.