МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Стогній Артем Володимирович

УДК: 616.721.7-001.7-089-035.1(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛІКУВАННЯ СПОНДИЛОЛІСТЕЗІВ ПОПЕРЕКОВОГО ВІДДІЛУ ХРЕБТА З НЕЙРОКОМПРЕСІЙНИМИ РОЗЛАДАМИ

Галузь знань: 22 – Охорона здоров'я
Спеціальність: 222 — Медицина
Спеціалізація: Нейрохірургія
Подається на здобуття ступеня
доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А. В. Стогній
_____
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:
П'ятикоп Володимир Олександрович,
доктор медичних наук, професор

Харків — 2026

АНОТАЦІЯ

Стогній А. В. Вдосконалення лікування спондилолістезів поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 222 — Медицина. — Харківський національний медичний університет МОЗ України, — Харків, 2026.

Дегенеративний спондилолістез поперекового відділу хребта належить до числа найбільш клінічно значущих дегенеративно-дистрофічних уражень хребта, які супроводжуються хронічним больовим синдромом, радикулопатією, нейрогенною переміжною кульгавістю, обмеженням повсякденної активності та істотним зниженням якості життя пацієнтів. Актуальність проблеми визначається не лише значною поширеністю цієї патології, а й складністю її патогенезу, що включає поєднання сегментарної нестабільності, звуження хребтового каналу, стенозу міжхребцевих отворів, порушення локального та глобального сагітального балансу, а також прогресуючих неврологічних розладів. За наявності таких змін традиційні способи оперативного лікування не завжди забезпечують достатню декомпресію нервових структур, повноцінне відновлення міжтілової висоти, корекцію лістезної деформації та реконструкцію біомеханіки ураженого сегмента. Саме тому питання вибору оптимальної хірургічної технології при симптомному дегенеративному поперековому спондилолістезі залишається дискусійним і потребує подальшого наукового обґрунтування.

Сучасна хірургія хребта орієнтована на досягнення двох взаємопов'язаних цілей: мінімізацію операційної травми та одночасне забезпечення повноцінної реконструкції передньої і задньої опорних колон хребта. У зв'язку з цим особливий інтерес становлять малоінвазивні технології міжтілової стабілізації, які дають змогу поєднати щадний доступ з достатнім обсягом реконструкції. Одним із перспективних напрямів є використання

титанових кейджів, здатних до контрольованої дистракції in situ, оскільки вони потенційно забезпечують не лише формування надійної передньої опори, а й збільшення висоти міжхребцевого проміжку, непряму декомпресію, покращення форамінального резерву, часткову редукцію аксіальної трансляції та сприятливі умови для відновлення сагітального профілю.

Метою дослідження було підвищення ефективності лікування спондилолістезів поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами шляхом впровадження малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації з можливістю одномоментної дистракції та редукції аксіальної трансляції з використанням титанових кейджів, що дистрагуються in situ, у поєднанні з транспедикулярним металоспондилодезом. Об'єктом дослідження був дегенеративний спондилолістез поперекового відділу хребта I–III ступенів з неврологічними проявами. Предмет дослідження включав неврологічні порушення, розміри хребтового каналу, показники функціонального стану хребта, параметри спіно-тазового балансу, характеристики напружено-деформованого стану системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж», а також клінічні результати застосування авторської методики.

Виконано клінічне проспективне порівняльне контрольоване одноцентрове інтервенційне дослідження з подальшим обсерваційним етапом. У клінічну частину включено 24 пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом і нейрокомпресійними розладами, які проходили стаціонарне лікування у 2017–2024 роках. Серед них 18 жінок і 6 чоловіків віком від 32 до 68 років; медіана та міжквартильний розмах віку становила 56 [50; 65] років. Залежно від застосованої хірургічної тактики пацієнтів розподілено на три групи: основну (n=5), у якій використовували авторський спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із дистракційним кейджем; групу порівняння (n=11), у якій застосовували стандартний мінімально інвазивний задній міжтіловий спондилодез поперекового відділу хребта (MIS-PLIF); контрольну (n=8), у якій було використано інші методи

міжтілового спондилодезу. Такий дизайн дозволив порівняти не лише клінічні результати різних підходів, а й оцінити характеристики авторської технології з позицій інтраопераційної травматичності, рентгенометричної корекції та безпеки.

Клініко-інструментальна програма дослідження охоплювала нейрохірургічне та загальноклінічне обстеження, рентгенографію, комп'ютерну та магнітно-резонансну томографію, оцінку вираженості болю за візуально-аналоговою шкалою (VAS), визначення індексу неповносправності Освестрі (ODI), а також рентгенометричне визначення pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope, sagittal vertical axis, загального та сегментарного лордозу, висоти міжхребцевого простору і ступеня зміщення хребця. Окремий блок становило біомеханічне моделювання методом скінченних елементів на моделі L3–S1, за допомогою якого оцінювали особливості розподілу напружень у задній інструментації та міжтіловій опорі, а також можливості відновлення функціональних параметрів хребта за використання дистракційного кейджа.

У доопераційному періоді досліджувана когорта характеризувалася значним клінічним тягарем захворювання. Медіана больового синдрому становила 8 [8; 9] балів за VAS, а індексу ODI — 48 [44; 50] балів, що свідчило про суттєве обмеження функціонального стану та виражений вплив патології на якість життя пацієнтів. Тривалість клінічних симптомів досягала 24 [18; 36] місяців, тривалість консервативного лікування — 12 [12; 18] місяців, що вказувало на вичерпання можливостей неоперативної терапії. Найчастіше уражувався рівень L4–L5 — у 66,7 % випадків, тоді як частка уражень на рівні L5–S1 становила 33,3 %. За класифікацією Meyerding I ступінь лістезу виявлено у 54,2 % пацієнтів, II ступінь — у 37,5 %, III ступінь — у 8,3 %. Клінічно у більшості пацієнтів спостерігалося поєднання радикулярного больового синдрому, нейрогенної переміжної кульгавості, сегментарних чутливих порушень та периферичного парезу 3–4 бали за

шкалою Медичної дослідницької ради (MRC), що підтверджувало як компресійний, так і функціонально-дезадаптивний характер патології.

Біомеханічна частина роботи дала змогу обґрунтувати доцільність застосування дистракційного кейджа як активної передньої опори при задньому міжтіловому спондилодезі. Встановлено, що використання нового кейджа не спричиняє критичного збільшення навантаження на замикальні пластинки порівняно зі стандартною поліефіркетоновою (PEEK) опорою. Напруження на нижній площині тіла L5 становило 40,7 МПа для моделі з дистракційним кейджем проти 40,2 МПа для моделі з PEEK-імплантатом, а в тілі S1 — 14,5 МПа проти 13,5 МПа відповідно. Водночас у зоні кістково-гвинтового інтерфейсу S1 напруження зменшувалося з 35,7 МПа до 17,8 МПа, а в зоні з'єднання гвинта зі стрижнем — з 80,8 МПа до 72,2 МПа. Отримані результати свідчать, що дистракційний кейдж перебирає на себе суттєву частину осьового навантаження, виконує функцію повноцінної передньої колони та одночасно розвантажує задню металоконструкцію. З біомеханічної точки зору це створює передумови для більш стабільного міжтілового спондилодезу, зменшення ризику перевантаження транспедикулярної системи та досягнення ефективнішої сегментарної реконструкції.

На підставі клінічних, рентгенометричних і біомеханічних даних розроблено авторський спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням титанового дистракційного кейджа. Сутність способу полягає у введенні імплантату через обмежений малоінвазивний задній доступ у колабованому стані з подальшою контрольованою дистракцією in situ. Такий підхід забезпечує формування передньої опори, збільшення висоти міжхребцевого проміжку, поліпшення форамінального резерву, сприяє непрямій декомпресії та полегшує редукцію лістезної деформації без надмірної тракції невральних структур. Отже, запропонована технологія поєднує в собі реконструктивний потенціал міжтілової стабілізації з перевагами малоінвазивного доступу.

Клінічна апробація авторського способу продемонструвала його переваги за низкою інтраопераційних і ранніх післяопераційних показників. У пацієнтів основної групи медіанна тривалість операції становила 180 [180; 180] хвилин, що відповідало групі стандартного MIS-PLIF, але було у два рази менше, ніж у контрольній групі — 360 [240; 480] хвилин. Інтраопераційна крововтрата в основній групі була найнижчою — 100 [100; 100] мл порівняно з 200 [200; 300] мл у групі порівняння та 500 [400; 600] мл у контролі. У хворих основної групи не виникало потреби в гемотрансфузії та післяопераційному дренуванні, що свідчить про меншу операційну травматичність і кращий профіль раннього післяопераційного ведення. Зменшення болю після операції сягало 4 [4; 4] балів за VAS у основній групі, 3 [3; 4] балів — у групі порівняння та 2 [1; 2] балів — у контрольній, що вказує на більш виражений ранній клінічний ефект запропонованого втручання.

Не менш важливими були рентгенометричні ефекти застосованої технології. У пацієнтів основної групи відновлення висоти міжхребцевого простору становило +10 [9; 11] мм, післяопераційний відсоток зміщення зменшувався до 5 [5; 5] %, а показник сагітальної вертикальної осі (SVA) поліпшувався до 5 [4; 6] см. Поліпшення pelvic tilt і sacral slope свідчило про позитивний вплив втручання не лише на локальну архітектоніку ураженого сегмента, а й на глобальний сагітальний баланс. Таким чином, авторська методика забезпечувала не тільки декомпресію і стабілізацію, а й біомеханічно значущу реконструкцію сегмента, що має принципове значення для пацієнтів із поєднанням нестабільності, стенозу та деформації. У цьому полягає одна з ключових відмінностей запропонованого підходу від традиційних технік, які не завжди дозволяють у повному обсязі впливати на геометрію ураженого рухового сегмента.

Профіль безпеки запропонованого способу був найбільш сприятливим серед порівнюваних методів. В основній групі не зареєстровано випадків післяопераційної кровотечі, ліквореї, венозної тромбоемболії, атрофії

паравертебральних м'язів, неповноцінного спондилодезу, пошкодження твердої мозкової оболонки, розхитування гвинтів, мальпозиції металоконструкцій, пошкодження невральних структур, травм великих судин та інфекції ділянки хірургічного втручання. Це дає підстави розглядати авторський спосіб як технологію з добрим співвідношенням реконструктивного потенціалу та хірургічної безпеки. Позитивний профіль безпеки був досягнутий не за рахунок зменшення обсягу корекції, а навпаки — на тлі відновлення висоти диска, зменшення ступеня зміщення та покращення параметрів сагітального вирівнювання.

У дисертаційній роботі вперше на підставі клінічних, рентгенометричних, біомеханічних даних обґрунтовано концепцію реконструктивно-орієнтованої малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації за дегенеративного поперекового спондилолістезу. Доведено, що клінічна ефективність хірургічного лікування визначається не лише фактом міжтілової стабілізації, а передусім досягненням адекватного відновлення функціональної геометрії хребтового рухового сегмента, міжтілової висоти, сегментарного лордозу, зменшенням аксіальної трансляції та покращенням параметрів сагітального і хребтово-тазового балансу.

Вперше в межах єдиного клініко-біомеханічного підходу доведено взаємозв'язок між вираженістю неврологічних порушень, ступенем стенозу хребтового каналу, рентгенометричними характеристиками ураженого сегмента, показниками напружено-деформованого стану системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — міжтілова опора» та безпосередніми результатами хірургічного лікування хворих із дегенеративним поперековим спондилолістезом.

Доведено, що реконструктивний малоінвазивний підхід, спрямований на контрольоване відновлення висоти міжхребцевого проміжку та редукцію зміщення, асоціюється зі зменшенням операційної травматичності та покращенням ранніх клінічних результатів, що підтверджено статистично. Досягнення оптимальних рентгенометричних параметрів оперованого

сегмента супроводжується більш вираженим регресом больового синдрому, покращенням неврологічного статусу та функціональних результатів лікування.

Набули подальшого розвитку наукові уявлення про механізми відновлення функціонального стану поперекового відділу хребта за хірургічного лікування дегенеративного спондилолістезу. Показано, що оцінювання ефективності оперативного втручання має ґрунтуватися на інтегральному аналізі клінічних, неврологічних, рентгенометричних і біомеханічних критеріїв, а не лише на технічних характеристиках виконаної стабілізації.

Таким чином, наукова новизна роботи полягає у обґрунтуванні клінічної та біомеханічної концепції реконструкції хребтового рухового сегмента як визначального чинника підвищення ефективності хірургічного лікування дегенеративного поперекового спондилолістезу.

Ключові слова: спондилолістез, лікування, операція, хірургія, малоінвазивна задня міжтілова стабілізація хребта.

ANNOTATION

Stognii A. V. Improvement of treatment for spondylolisthesis of the lumbar spine with neurocompression disorders. — Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Philosophy Doctor degree in the specialty 222 — Medicine. — Kharkiv National Medical University MOH of Ukraine, — Kharkiv, 2026.

Stognii A. V. Improvement of treatment for spondylolisthesis of the lumbar spine with neurocompression disorders. Qualifying scientific work as a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 222 Medicine, specialization Neurosurgery. Kharkiv National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Kharkiv, 2026.

Degenerative spondylolisthesis of the lumbar spine is one of the most clinically significant degenerative-dystrophic spinal conditions, accompanied by chronic pain, radiculopathy, neurogenic intermittent claudication, limitations in daily activities, and a significant reduction in patients' quality of life. The relevance of the problem is determined not only by the high prevalence of this pathology but also by the complexity of its pathogenesis, which includes a combination of segmental instability, narrowing of the spinal canal, stenosis of the intervertebral foramina, disruption of local and global sagittal balance, as well as progressive neurological disorders. In the presence of such changes, traditional surgical methods do not always provide sufficient decompression of neural structures, full restoration of intervertebral height, correction of spondylolisthesis, and reconstruction of the biomechanics of the affected segment. This is why the choice of the optimal surgical technique for symptomatic degenerative lumbar spondylolisthesis remains a matter of debate and requires further scientific justification.

Modern spinal surgery is focused on achieving two interrelated goals: minimizing surgical trauma while ensuring complete reconstruction of the anterior and posterior support columns of the spine. In this regard, minimally invasive interbody stabilization techniques are of particular interest, as they allow for a minimally invasive approach combined with sufficient reconstruction. One promising approach is the use of titanium cages capable of controlled in situ distraction, as they potentially provide not only the formation of a reliable anterior support but also an increase in the height of the intervertebral space, indirect decompression, improvement of the foraminal reserve, partial reduction of axial translation, and favorable conditions for the restoration of the sagittal profile.

The aim of the study was to improve treatment outcomes in patients with lumbar spondylolisthesis and neurocompression disorders by introducing minimally invasive posterior interbody stabilization with simultaneous distraction and reduction of axial translation using titanium cages expandable in situ in combination with transpedicular posterior fixation. The object of the study was degenerative lumbar spondylolisthesis of grades I to III with neurological manifestations. The

subject of the study included neurological disorders, spinal canal dimensions, indices of functional spinal status, spinopelvic parameters, the stress-strain characteristics of the system “transpedicular construct - spinal motion segment - distraction cage,” and the clinical outcomes of the proprietary technique.

A prospective, comparative, controlled, single-center interventional clinical trial with a subsequent observational phase was conducted. The clinical phase included 24 patients with degenerative lumbar spondylolisthesis and neurocompressive disorders who underwent inpatient treatment between 2017 and 2024. Among them were 18 women and 6 men aged 32 to 68 years; the median and interquartile range of age were 56 [50; 65] years. Depending on the surgical approach used, patients were divided into three groups: the main group (n=5), in which the authors’ method of minimally invasive posterior interbody stabilization of the vertebrae with a distraction cage was used; the comparison group (n=11), in which standard minimally invasive posterior lumbar interbody fusion (MIS-PLIF) was performed; and the control group (n=8), in which other methods of interbody fusion were used. This design allowed not only for a comparison of the clinical outcomes of different approaches but also for an evaluation of the characteristics of the authors’ technique in terms of intraoperative trauma, radiometric correction, and safety.

The clinical and imaging study protocol included neurosurgical and general clinical examinations, radiography, computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI), assessment of pain intensity using the visual analog scale (VAS), determination of the Oswestry Disability Index (ODI), as well as radiometric determination of pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope, sagittal vertical axis, total and segmental lordosis, intervertebral space height, and the degree of vertebral displacement. A separate component involved biomechanical modeling using the finite element method on the L3–S1 model, which was used to assess the distribution of stresses in the posterior instrumentation and interbody support, as well as the potential for restoring the functional parameters of the spine using a distraction cage.

In the preoperative period, the study cohort was characterized by a significant clinical burden of the disease. The median pain score was 8 [8; 9] points on the VAS, and the ODI index was 48 [44; 50] points, indicating a significant limitation of functional status and a pronounced impact of the pathology on patients' quality of life. The duration of clinical symptoms reached 24 [18; 36] months, and the duration of conservative treatment was 12 [12; 18] months, indicating that the possibilities of non-surgical therapy had been exhausted. The L4–L5 level was most commonly affected—in 66.7% of cases—while the proportion of lesions at the L5–S1 level was 33.3%. According to the Meyerding classification, Grade I spondylolisthesis was found in 54.2% of patients, Grade II in 37.5%, and Grade III in 8.3%. Clinically, most patients presented with a combination of radicular pain syndrome, neurogenic intermittent claudication, segmental sensory disturbances, and peripheral paresis rated 3–4 on the Medical Research Council (MRC) scale, confirming both the compressive and functionally maladaptive nature of the pathology.

The biomechanical part of the study provided evidence supporting the use of a distraction cage as an active anterior support in posterior interbody spondylodesis. It was found that the use of the new cage does not result in a critical increase in the load on the locking plates compared to a standard polyetheretherketone (PEEK) support. The stress on the inferior surface of the L5 body was 40.7 MPa for the model with the distraction cage versus 40.2 MPa for the model with the PEEK implant, and in the S1 body—14.5 MPa versus 13.5 MPa, respectively. At the same time, in the S1 bone-screw interface zone, stress decreased from 35.7 MPa to 17.8 MPa, and in the screw-rod connection zone—from 80.8 MPa to 72.2 MPa. The results indicate that the distraction cage assumes a significant portion of the axial load, functions as a full-fledged anterior column, and simultaneously relieves the posterior metal structure. From a biomechanical standpoint, this creates the conditions for more stable interbody spondylodesis, reduces the risk of overloading the transpedicular system, and enables more effective segmental reconstruction.

Based on clinical, radiometric, and biomechanical data, the author has developed a method for minimally invasive posterior interbody stabilization of the

vertebrae using a titanium distraction cage. The essence of the method lies in the insertion of the implant through a limited minimally invasive posterior approach in a collapsed state, followed by controlled in situ distraction. This approach ensures the formation of an anterior support, increases the height of the intervertebral space, improves the foraminal reserve, promotes indirect decompression, and facilitates the reduction of spondylolisthesis without excessive traction on neural structures. Thus, the proposed technique combines the reconstructive potential of interbody stabilization with the advantages of minimally invasive access.

Clinical validation of the authors' method demonstrated its advantages based on a number of intraoperative and early postoperative parameters. In patients of the main group, the median duration of the operation was 180 [180; 180] minutes, which corresponded to the standard MIS-PLIF group but was half that of the control group—360 [240; 480] minutes. Intraoperative blood loss in the main group was the lowest—100 [100; 100] mL compared to 200 [200; 300] mL in the comparison group and 500 [400; 600] mL in the control group. Patients in the main group did not require blood transfusions or postoperative drainage, indicating less surgical trauma and a better profile of early postoperative management. The reduction in postoperative pain reached 4 [4; 4] points on the VAS in the main group, 3 [3; 4] points in the comparison group, and 2 [1; 2] points in the control group, indicating a more pronounced early clinical effect of the proposed intervention.

Equally important were the radiographic effects of the applied technology. In patients of the main group, the restoration of intervertebral space height was +10 [9; 11] mm, the postoperative displacement percentage decreased to 5 [5; 5] %, and the sagittal vertical axis (SVA) improved to 5 [4; 6] cm. Improvements in pelvic tilt and sacral slope indicated a positive effect of the intervention not only on the local architecture of the affected segment but also on global sagittal balance. Thus, the authors' technique provided not only decompression and stabilization but also biomechanically significant reconstruction of the segment, which is of fundamental importance for patients with a combination of instability, stenosis, and deformity. This constitutes one of the key differences between the proposed approach and

traditional techniques, which do not always allow for a comprehensive influence on the geometry of the affected motion segment.

The safety profile of the proposed method was the most favorable among the compared methods. In the main group, there were no reported cases of postoperative bleeding, cerebrospinal fluid leakage, venous thromboembolism, paravertebral muscle atrophy, incomplete spondylodesis, dura mater damage, screw loosening, malposition of metal implants, damage to neural structures, injury to major vessels, or infection at the surgical site. This provides grounds for considering the authors' method as a technique with a good balance between reconstructive potential and surgical safety. The positive safety profile was achieved not by reducing the extent of correction, but rather by restoring disc height, reducing the degree of displacement, and improving sagittal alignment parameters.

This dissertation is the first to substantiate, based on clinical, radiometric, and biomechanical data, the concept of reconstructive-oriented minimally invasive posterior interbody stabilization for degenerative lumbar spondylolisthesis. It has been demonstrated that the clinical efficacy of surgical treatment is determined not only by the fact of interbody stabilization, but primarily by the achievement of adequate restoration of the functional geometry of the spinal motion segment, intervertebral height, and segmental lordosis, as well as by a reduction in axial translation and an improvement in the parameters of sagittal and spino-pelvic balance.

For the first time, within a unified clinical-biomechanical approach, a correlation has been demonstrated between the severity of neurological deficits, the degree of spinal canal stenosis, the radiometric characteristics of the affected segment, the stress-strain state indicators of the "transpedicular structure—spinal motion segment—intervertebral support" system, and the immediate outcomes of surgical treatment in patients with degenerative lumbar spondylolisthesis.

It has been proven that a reconstructive minimally invasive approach aimed at controlled restoration of the intervertebral disc height and reduction of displacement is associated with reduced surgical trauma and improved early clinical

outcomes, as statistically confirmed. Achieving optimal radiographic parameters of the operated segment is accompanied by a more pronounced regression of pain syndrome, improvement in neurological status, and functional treatment outcomes.

Scientific understanding of the mechanisms underlying the restoration of the functional state of the lumbar spine following surgical treatment of degenerative spondylolisthesis has been further developed. It has been demonstrated that the assessment of the effectiveness of surgical intervention should be based on an integrated analysis of clinical, neurological, radiometric, and biomechanical criteria, rather than solely on the technical characteristics of the stabilization procedure performed.

Thus, the scientific novelty of this work lies in substantiating the clinical and biomechanical concept of spinal motion segment reconstruction as a determining factor in improving the effectiveness of surgical treatment for degenerative lumbar spondylolisthesis.

Key words: spondylolisthesis, treatment, operation, surgery, minimally invasive posterior interbody stabilization of the spine.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Stognii AV, Piatykop BO, Yaresko OV, Popuyskapka KO, Pidgaiska OO, Karpinsky MY. Study of stress distribution in a model of posterior intervertebral spondylodesis of the lumbar spine (PEEK implant and distraction cage) [Ukrainian: Вивчення розподілу напружень моделі заднього міжхребцевого спондилодезу поперекового відділу хребта (імплантат PEEK і дистракційний кейдж)]. Trauma [Ukrainian: Травма] [Internet]. 2022;23[6]:47–55. Available from: https://www.mif-ua.com/archive/article/52502 DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.6.23.2022.923

2. Stognii AV, Piatykop VO, Babalian IO. Substantiation and development of an optimal method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2025;31[2]:55–64. Available from: https://theunj.org/article/view/322446 DOI: 10.25305/unj.322446.

3. Stognii AV, Piatykop VO, Efficacy of minimally invasive posterior interbody stabilization with distraction cages in lumbar spondylolisthesis. Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine, Inter Collegas [Internet], Availible from:https://inter.knmu.edu.ua/issue/view/10.35339.ic.2025.12.3 DOI: https://doi.org/10.35339/ic.2025.12.3

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Stognii A. Engineering and mathematical modeling of stress-strain state in the "transpedicular structure – spinal motor segment – distraction cage" system in context of degenerative lumbar spondylolisthesis neurosurgery. Щорічна конференція Української асоціації нейрохірургів з міжнародною участю «Нейрохірургія сучасності — технології та мистецтво». Україна, Львів, 7–

9 вересня 2023 року. Збірка наукових робіт. С. 39 https://rimononline.in.ua/neuro070923

5. Stognii A. Operative treatment of spondylolisthesis of the lumbar spine with minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages. VIII Ukrainian Winter Neurosurgical Meeting (UWNM). Ukraine, Bukovel, March 13–15, 2023. Abstract book. P. 40. https://rimononline.in.ua/uwnm2023

6. Stognii A. Substantiation and development of an own method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis, X Ukrainian Winter Neurosurgical Meeting (UWNM). Ukraine, Bukovel, February 20–22, 2023. Abstract book. P. 77 https://rimononline.in.ua/uwnm2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 20
ВСТУП 23
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ОПЕРАТИВНОГО ЛІКУВАННЯ СПОНДИЛОЛІСТЕЗУ ПОПЕРЕКОВОГО ВІДДІЛУ ХРЕБТА (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ) 34
1.1. Епідеміологія та соціальні проблеми, пов'язані зі спондилолістезом поперекового відділу хребта 34
1.2. Міжтілова фіксація хребців як метод хірургічного лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта: становлення та сучасність 38
1.3. Біомеханіка сегментарної нестабільності та дегенеративні процеси в поперековому відділі хребта 46
1.4. Ускладнення міжтілової фіксації спондилолістезу поперекового відділу хребта 46
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ 63
2.1. Дизайн дослідження 63
2.2. Клінічна характеристика учасників дослідження 67
2.3. Методи дослідження 93
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 63
3.1. Власні спостереження хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом 100
3.1.1. Розміри хребтового каналу до та після хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом 100
3.1.2. Динаміка неврологічних порушень до та після хірургічного 133

лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом .....
3.1.3. Показники функціонального стану хребта до та після хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом 133
3.1.4. Висновки до підрозділу 3.1 148
3.2. Результати оцінювання можливості відновлення показників функціонального стану хребта із використанням дистракційних кейджів 176
3.2.1. Біомеханічна модель функціонального стану хребта 200
3.2.2. Аналіз напружено-деформованого стану у системі «транспедикулярна конструкція – хребтовий руховий сегмент-дистракційний кейдж» 200
3.2.3. Висновки до підрозділу 3.2 200
3.3. Спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів 148
3.3.1. Обґрунтування і розробка власного способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів 149
3.3.2. Результати клінічної апробації власного способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців з використанням дистракційних кейджів у пацієнтів з дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами 158
3.3.3. Висновки до підрозділу 3.3 172
Висновки до розділу 3 173

РОЗДІЛ 4. ОБГОВОРЕННЯ Й УЗАГАЛЬНЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 176
Висновки до розділу 4 200
ВИСНОВКИ 203
ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ 206
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 208
ДОДАТОК А 235
ДОДАТОК Б 237
ДОДАТОК В 242

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

95 % ДІ	— 95-відсотковий довірчий інтервал
БАК	— біохімічні аналізи крові
ЗАК	— загальноклінічний аналіз крові
ЗАС	— загальноклінічний аналіз сечі
ЕНМГ	— електронейроміографія
ЕКГ	— електрокардіографія
КНП ХОР «ОКЛ»	— Комунальне некомерційне підприємство Харківської обласної ради «Обласна клінічна лікарня»
КТ	— комп'ютерна томографія (рентгенівська)
МІЗМТСХ	— малоінвазивна задня міжтілова стабілізація хребців
міс.	— місяць
МРТ	— магнітно-резонансна томографія
МСЕ	— метод скінченних елементів
НДС	— напружено-деформований стан
СРС	— стандартизована різниця середніх
хв.	— хвилина
ALIF	— передній доступ для міжтілового спондилодезу (англ. anterior approach for interbody fusion)
BMI	— індекс маси тіла (англ. body mass index)
Endo-TLIF	— ендоскопічний трансформінальний поперековий міжтіловий спондилодез (англ. endoscopic transforaminal lumbar interbody fusion)
I^2	— рівень гетерогенності
IQR	— міжквартильний розмах (англ. interquartile range)

LLIF — бічний поперековий міжтіловий спондилодез (англ. lateral lumbar interbody fusion)

LQ — нижній квартиль (англ. lower quartile)

Me — медіана (англ. median)

MIS-TLIF — мінімально інвазивний трансфораміальний поперековий міжтіловий спондилодез (англ. minimally invasive surgery transforaminal lumbar interbody fusion)

MIS-PLIF — мінімально інвазивний задній міжтіловий спондилодез поперекового відділу хребта (англ. minimally invasive surgery posterior lumbar interbody fusion)

MRC — шкала Медичної дослідницької ради [Великої Британії] (англ. Medical Research Council)

ODI — індекс неповносправності Освестрі (англ. Oswestry Disability Index)

OLIF — косий поперековий міжтіловий спондилодез (англ. oblique lateral interbody fusion)

p — p-рівень

PEEK — поліефіреферкетон (англ. polyether ether ketone)

PLIF — задній міжтіловий спондилодез поперекового відділу хребта (англ. posterior lumbar interbody fusion)

SVA — сагітальна вертикальна вісь (англ. sagittal vertical axis)

TLIF — трансфораміальний поперековий міжтіловий спондилодез (англ. transforaminal lumbar interbody fusion)

UQ — верхній квартиль (англ. upper quartile)

XLIF — крайній латеральний міжтіловий спондилодез (англ. extreme lateral interbody fusion)

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Неврогенний біль у ногах є частою скаргою серед загальної популяції (поширеність до 43 %) [1, 2].

Цей біль може бути викликаний стисненням або розтягненням нервових корінців чи волокон кінського хвоста (розвивається поперекова радикулопатія або нейрогенна кульгавість відповідно). Грижа поперекового диска та стеноз хребетного каналу є класичними та найпоширенішими причинами. Інша все більш поширена причина неврогенного болю в попереку та ногах — поперековий спондилолістез (частота у зрілому віці близько 6 %) [3]. У разі поперекового спондилолістезу виникає поздовжнє зміщення хребців, що призводить до стиснення або розтягнення нейрогенних структур. Поперековий спондилолістез має переважно дегенеративний або істмічний характер. У разі дегенеративного спондилолістезу внаслідок фасеткового артриту, ремоделювання суглобів та слабкості зв'язкового апарату, можливе фронтальне зміщення хребця.

Якщо консервативне лікування нейрогенного болю в нижніх кінцівках не має ефекту, доцільно розглянути хірургічне лікування. У разі секвестру поперекового диска або стенозу хребетного каналу проводиться декомпресійна операція. У випадку спондилолістезу, одна лише декомпресія не вважається достатньою, і рекомендується додаткова інструментальна фіксація хребта, що є загальноприйнятою практикою в наш час. У США між 1998 і 2008 роками кількість операцій щодо інструментального спинного спондилодезу збільшилася у 7,9 рази [4].

В Україні нейрокомпресійні синдроми через спондилолістез поперекового відділу хребта за розповсюдженістю в загальній популяції поступаються лише гострим респіраторним інфекціям. За останні 10 років спостерігається збільшення кількості пацієнтів із спондилолістезом, що зумовлене також впливом економічних, соціальних, екологічних та інших

чинників. В умовах війни і пов'язаних з нею частих і замежових осьових навантажень на хребет є всі підстави прогнозувати іще більше почастішання випадків поперекового спондилолістезу [5–7].

Спондилолістез — поліетіологічне захворювання і комплексний патофізіологічний процес. Його лікуванням займаються різні фахівці: нейрохірурги, неврологи, ортопеди-травматологи. Зміщення хребців і зміна структури ядра міжхребцевого диска, дегенеративне порушення структури дуговідросткових суглобів спричиняють запуск каскаду патофізіологічних механізмів, що обумовлюють клінічні та неврологічні прояви захворювання [8–11].

На сучасному етапі розвитку нейрохірургії в Україні розширюються показання до оперативного лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта. У більшості випадків використовують задні та задньо-бокові доступи, що відображає традиційний підхід при цьому захворюванні. Досвід виконання доступів за різних ступенів спондилолістезу поперекового відділу хребта має важливе значення для вибору хірургічної тактики в кожному окремому випадку з урахуванням всіх особливостей клінічної ситуації.

Активний розвиток та науково-технологічний прогрес надав можливість використовувати малоінвазивні технології для проведення оперативних втручань. Але все ще є необхідність розробки менш травматичних технологій. Вимогами до них є те, щоб вони мали такі необхідні якості, як коригуючий механізм, який дозволяє перебіг адекватного спондилодезу на відкоригованому сегменті. На теперішній час однією з перспективних технологій є використання міжтілових інтрадискових імплантів з можливістю дистракції in situ. Але, не зважаючи на поширеність, ця технологія ще потребує повноцінного аналізу та доопрацювання, адже у літературі на теперішній час існує доволі небагато наукових робіт щодо ефективності того чи іншого механізму дистракції та їхнього впливу на перебіг патологічного процесу.

Очікується, що попит на інструментальний спондилодез буде лише зростати в найближчі десятиліття за умови старіння населення [12].

Нові данні, що враховують біомеханічні властивості хребта, потребують додаткового уточнення патоморфологічних факторів та шляхів впливу на них. У зв'язку з цим, нагальною є необхідність розвитку малоінвазивних методик хірургічного лікування спондилолістезу, які можливо застосовувати з високою ефективністю за різних ступенів зміщення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження проводилося на клінічній базі кафедри нейрохірургії Харківського національного медичного університету в умовах нейрохірургічного відділення № 2 Комунального некомерційного підприємства Харківської обласної ради «Обласна клінічна лікарня» (КНП ХОР «ОКЛ»).

Дисертаційне дослідження є фрагментом колективної науково-дослідної роботи «Ортопедо-травматологічна допомога населенню в умовах військового стану» (держ. реєстраційний номер 0123U103541) кафедри екстреної та невідкладної медичної допомоги, ортопедії та травматології. Здобувач є співвиконавцем вказаної роботи.

Мета дослідження — підвищити ефективність лікування спондилолістезів шляхом впровадження малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації з можливістю одномоментної дистракції та редукції аксіальної трансляції з використанням передопераційно скомбінованих міжтілових титанових кейджів з можливістю їх дистракції in situ та транспедикулярного металоспондилодезу, для отримання оптимального об'єму корекції та біомеханічних показників сагітального балансу на тлі аналізу передопераційних спондилограм у порівнянні з класичною методикою трансформамінального бічного міжтілового спондилодезу.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі **завдання**:

1. Вивчити розміри хребтового каналу й оцінити динаміку неврологічних порушень до та після хірургічного лікування пацієнтів із

дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом;

2. Визначити величину сегментарного лордозу, параметри хребтового-тазового балансу та сагітального контуру хребта як показники функціонального стану хребта до та після хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом;

3. Дослідити можливості відновлення величини сегментарного лордозу, параметрів хребтового-тазового балансу та сагітального контуру хребта, як показників функціонального стану хребта, із використанням дистракційних кейджів за допомогою біомеханічної моделі;

4. Проаналізувати напружено-деформований стан у системі «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж»;

5. Розробити власний метод малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів;

6. Провести клінічну апробацію на пацієнтах з дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами шляхом застосування малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців з використанням дистракційних кейджів.

Об'єкт дослідження: дегенеративний спондилолістез поперекового відділу хребта 1–3 ступенів з неврологічними проявами.

Предмет дослідження: неврологічні порушення, розміри хребтового каналу, показники функціонального стану хребта (величина сегментарного лордозу, параметри хребтового-тазового балансу та сагітального контуру хребта), біомеханічна модель (та її параметри), спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів тощо.

Методи дослідження: магнітно-резонансна томографія (МРТ) рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ), статистичні тощо.

База наукового дослідження: кафедри нейрохірургії Харківського національного медичного університету, КНП ХОР «ОКЛ».

Термін дослідження: 2017–2026.

Наукова новизна отриманих результатів

Доведено (вперше на підставі клінічних, рентгенометричних, біомеханічних і статистично опрацьованих даних) цілісну наукову концепцію реконструктивно-орієнтованого хірургічного лікування дегенеративного поперекового спондилолістезу з нейрокомпресійними розладами. На відміну від традиційного підходу, за якого основну увагу приділяють декомпресії та стабілізації як таким, показано, що визначальним чинником клінічного результату є відновлення функціональної геометрії хребтового рухового сегмента, зменшення аксіальної трансляції, відновлення міжтілової висоти та поліпшення параметрів сегментарного і загального сагітального профілю.

На підставі проведеного клініко-морфометричного аналізу науково доведено, що тяжкість проявів дегенеративного поперекового спондилолістезу визначається не лише ступенем зміщення хребця, а сукупною дією локального стенозу, зменшенням міжтілової та форамінальної висоти, порушенням сегментарного лордозу, змінами хребтово-тазового балансу та їхнім впливом на невральні структури. У межах єдиного клініко-біомеханічного підходу вперше встановлено взаємозв'язок між неврологічними проявами, морфометричними характеристиками хребтового каналу, рентгенометричними показниками функціонального стану хребта і параметрами напружено-деформованого стану системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — міжтілова опора».

Доведено, що реконструкція міжхребцевого простору з контрольованою дистракцією in situ має не лише технічне, а передусім патогенетично обґрунтоване значення, оскільки забезпечує непряму декомпресію невральних структур, відновлення опороспроможності передньої колони, поліпшення умов для редукції лістезної деформації та оптимізацію розподілу навантаження між міжтіловою опорою і задньою транспедикулярною

фіксацією. Обґрунтовано не лише окремий імплантаційний елемент і технічний прийом, а доказову концепцію реконструктивної малоінвазивної корекції спондилолістезу.

За результатами біомеханічного моделювання вперше показано, що відновлення висоти дискового проміжку, сегментарного лордозу та корекція зміщення супроводжуються сприятливим перерозподілом напружень у системі фіксації. Доведено, що зростання функціональної ролі передньої опорної колони зменшує перевантаження в критичних зонах кістково-гвинтового інтерфейсу і створює кращі передумови для стабільного спондилодезу. Це положення має принципове значення для пояснення переваг реконструктивного підходу з позицій клінічної біомеханіки.

Доведено, що ефективність малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації слід оцінювати не лише за інтраопераційними показниками або фактом імплантації міжтілової опори, а за інтегрованим комплексом критеріїв, який охоплює неврологічний статус, динаміку больового синдрому, морфометрію хребтового каналу, рентгенометричні параметри сегментарного лордозу, показники хребтово-тазового балансу, дані про операційну травматичність і характеристики напружено-деформованого стану. Запропоновано таку багаторівневу модель оцінювання як доказову основу визначення ефективності реконструктивного втручання.

Подальшого розвитку набули уявлення про патогенетичний зв'язок між нейрокомпресійними проявами дегенеративного поперекового спондилолістезу, локальним стенозом, зниженням висоти міжхребцевого диска, порушенням форамінального резерву та дисбалансом сагітального контуру хребта. Розширено підходи до індивідуалізації хірургічної тактики, згідно з якими вибір оперативного втручання має ґрунтуватися не лише на рівні та ступені лістезу, а й на цільовому обсязі сегментарної реконструкції та прогнозованому впливі на параметри сагітального балансу.

Уточнено дані про характер неврологічних порушень за різного ступеня дегенеративного спондилолістезу поперекового відділу хребта з урахуванням

рівня ураження, морфометричних особливостей стенозу та варіантів компресії невральних структур. Отримані результати доповнюють сучасні уявлення про клініко-морфологічні механізми розвитку больового, корінцевого і нейрокомпресійного синдромів у цієї категорії пацієнтів.

Завершене клініко-експериментальне дослідження вперше дало змогу довести можливість трансляції результатів біомеханічного моделювання у практичну хірургічну тактику лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта.

Теоретичне значення одержаних результатів дослідження

Розв'язання поставлених завдань дало змогу поглибити теоретичні уявлення про механізми формування клінічної симптоматики та принципи хірургічної корекції дегенеративного поперекового спондилолістезу. У роботі показано, що клінічна значущість цього патологічного процесу формується внаслідок комплексної взаємодії морфологічних, неврологічних, рентгенометричних і біомеханічних чинників, тому не може бути пояснена лише ступенем зміщення хребця або наявністю стенозу як ізольованого феномена.

Суттєвим теоретичним результатом роботи є розширення уявлень про реконструктивну малоінвазивну хірургію хребта, оскільки науково обґрунтовано положення, відповідно до якого для досягнення оптимального результату при симптомному спондилолістезі недостатньо лише декомпресії невральних структур або самого факту міжтілової стабілізації. Принципове значення має відновлення функціональної геометрії сегмента як основи для непрямої декомпресії, корекції локальної деформації та поліпшення сагітального профілю хребта.

Теоретично обґрунтовано положення про те, що міжтілова опора з реконструктивним потенціалом здатна виконувати роль функціональної передньої колони, перерозподіляючи навантаження в системі фіксації та знижуючи перевантаження задніх опорних елементів. Результати біомеханічного аналізу поглиблюють розуміння закономірностей формування

напружено-деформованого стану під час хірургічної корекції спондилолістезу і можуть бути використані для подальшого розвитку біомеханічно орієнтованих підходів у вертебрології.

Важливим теоретичним підсумком роботи стало розроблення інтегрованої моделі оцінки результатів хірургічного лікування, у якій клінічні шкали, показники неврологічного статусу, рентгенометричні параметри, операційні характеристики та дані біомеханічного моделювання розглядаються як взаємодоповнювальні рівні доказовості. Такий підхід може слугувати методологічною основою для майбутніх клінічних і експериментальних досліджень у галузі хірургії хребта.

Практичне значення одержаних результатів дослідження

Практичне значення дисертаційного дослідження полягає у клінічному обґрунтуванні та підготовці до впровадження реконструктивно-орієнтованого підходу до малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців у пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом і нейрокомпресійними розладами. Одержані результати дають змогу використовувати науково доведені закономірності для підвищення ефективності передопераційного планування, вибору тактики втручання та оцінювання його наслідків.

До практичної діяльності нейрохірургічних і нейровертебрологічних відділень може бути впроваджено алгоритм відбору пацієнтів для реконструктивного малоінвазивного втручання, який враховує клінічну симптоматику, тривалість і неефективність консервативного лікування, рівень та ступінь лістезу, вираженість нейрокомпресійних проявів, локальні стенозуючі зміни, величину сегментарного лордозу, параметри хребтово-тазового балансу, висоту міжхребцевого проміжку і прогнозований обсяг сегментарної реконструкції.

Вагому практичну цінність становлять розроблені положення щодо передопераційного планування цільової реконструкції, які дають можливість орієнтуватися не лише на усунення компресії, а й на досягнення оптимальних параметрів відновлення міжтілової висоти, редукції аксіальної трансляції,

корекції сегментарного лордозу та поліпшення глобального сагітального профілю. Це сприяє стандартизації хірургічної тактики та підвищує відтворюваність результатів у клінічній практиці.

З погляду клінічного застосування отримані результати можуть бути використані для вдосконалення техніки нейрохірургічної декомпресії та стабілізації за рахунок мінімізації операційної травматичності, зменшення втручання в ділянці локальних невральних структур і досягнення достатнього обсягу реконструкції через малоінвазивний доступ. Практичне значення має також запропонована система критеріїв ефективності та безпеки, придатна для клінічного аудиту та порівняльного аналізу результатів лікування пацієнтів зі спондилолістезом поперекового відділу хребта.

Сформовано схему хірургічної тактики при спондилолістезі поперекового відділу хребта I-III ступеня, яка враховує рівень ураження, характер компресії невральних структур, ступінь деформації, параметри функціонального стану хребта та цільові показники реконструкції сегмента. Така схема може бути використана як практичний інструмент вибору оптимального обсягу оперативного втручання.

Результати роботи доцільно впроваджувати у навчальний процес на кафедрах нейрохірургії, ортопедії та травматології, у систему післядипломної освіти лікарів, а також у науково-дослідну роботу, присвячену вдосконаленню реконструктивних технологій у хірургії хребта. Практична значущість одержаних положень підтверджується їх придатністю до клінічного використання та можливістю подальшої валідації у ширших клінічних вибірках.

Особистий внесок здобувача

Здобувачем спільно з науковим керівником обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання та загальну концепцію дослідження. Автор самостійно провів патентно-інформаційний пошук, аналіз наукової літератури, розробив дизайн дослідження, програму клінічного обстеження, облікові карти учасників і систему збору первинних даних.

Безпосередньо автор виконав клінічну частину дослідження, брав участь у передопераційному плануванні, хірургічному лікуванні пацієнтів, аналізі безпосередніх і віддалених результатів, рентгенометричних показників, а також у формуванні масиву даних для біомеханічного та статистичного аналізу. Самостійно здійснено узагальнення отриманих результатів, їх статистичне опрацювання, інтерпретацію та формулювання основних наукових положень, висновків і практичних рекомендацій.

При цьому автором написано всі основні розділи дисертації, підготовлено матеріали до наукових публікацій, доповідей і впровадження результатів дослідження у практику та навчальний процес. Ідеї співавторів, наукові положення та результати, отримані ними самостійно, у дисертації не використано без відповідних посилань.

Фахівцями лабораторії біомеханіки Інституту патології хребта та суглобів ім. проф. М. І. Ситенка та ТОВ «Восток V» виконано моделювання біомеханічної моделі і надано інструментарій для виконання авторського способу оперативного втручання.

Апробація результатів дисертації

Матеріали дисертаційної роботи було доповідано і обговорено на таких наукових форумах:

1. Тези додоповіді до щорічного з'їзду нейрохірургів України з міжнардною участю «Нейрохірургія сучасності – технології та мистетство» 2023р. Engineering and mathematical modeling of stress-strain state in the "transpedicular structure - spinal motor segmentdistraction cage" system in context of degenerative lumbar spondylolisthesis neurosurgery, Artem Stognii, Kharkiv National Medical University, Department of Neurosurgery, ст. 39 https://rimononline.in.ua/neuro070923#rec592865920

2. Тези до 8го зимнього з'їзду нейрохірургів України 2023р. Operative treatment of spondylolisthesis of the lumbar spine with minimally

invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages, Artem Stognii, ст. 40 https://rimononline.in.ua/uwnm2023#rec587473012

3. Тези до 10го зимнього з'їзду нейрохірургів України 2025р. Stognii A. Substantiation and development of an own method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis, ст. 77 https://drive.google.com/file/d/1zn_65v_WurhGsK5gvxYivb7BB-Pwqllh/view

Публікації

За темою дисертаційної роботи опубліковано 3 наукових праці, з них 3 статей у провідних наукових профільних виданнях, рекомендованих для публікації матеріалів дисертаційних досліджень (3 у журналах, індексованих міжнародними наукометричними базами), 3 тез доповідей.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (206 найменувань), та трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 244 сторінок, основна частина викладена на 207 сторінках. Дисертацію ілюстровано 24 таблицями та 15 рисунками.

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ОПЕРАТИВНОГО ЛІКУВАННЯ СПОНДИЛОЛІСТЕЗУ ПОПЕРЕКОВОГО ВІДДІЛУ ХРЕБТА (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

1.1. Епідеміологія та соціальні проблеми, пов'язані зі спондилолістезом поперекового відділу хребта

Тенденція до збільшення середньої тривалості життя населення в розвинених країнах, удосконалення методів діагностики та лікування зумовили збільшення кількості пацієнтів із дегенеративними захворюваннями хребта, які вимагають надання високотехнологічної хірургічної допомоги.

Відомо, що спондилолістез виявляється зміщенням тіла вище розташованого хребця. Причиною спондилолістезу можуть бути як дегенеративні зміни міжхребцевого диска та суглобів хребців (дегенеративний спондилолістез), так і наявність будь-якого дефекту в між хребцевих суглобах. Цей дефект може бути вродженим, спричиненим спондилолізом (істинний та істмічний спондилолістез) або розвинутися внаслідок отриманої травми (післятравматичний спондилолістез) [13]. Однією з найтяжчих форм патології хребта є спондилолістез саме поперекових хребців [14].

Спондилоліз є найпоширенішою «специфічною» патологією підліткової популяції та проявляється болем у попереку [1, 15]. Частота спондилолізу є вищою у спортсменів, які виконують рухи з повторного згинання й розгинання хребта [16, 17].

Дегенеративний спондилолістез здебільшого спричинений дегенеративним артритом або порушеннями дискового простору. У зрілому та похилому віці спондилолістез пов'язаний із дегенерацією фасеткових суглобів, меншим стабілізатором товщини м'язів у стані спокою та під час скорочення, а також надмірним використанням стабілізаційних м'язів [18, 19].

Спондилолістез спричиняє біль, призводить до стенозу хребтового каналу, нейрофорамінального стенозу та нестабільності хребта внаслідок втрати стабілізувального механізму суглобових відростків хребців [20, 21]. Підвищена рухливість хребця, який ковзає, та передньо-нижній тиск на диск можуть спровокувати зменшення міжхребцевого отвору та стискання спинномозкових нервів. У пацієнтів з істмічним і дегенеративним спондилолістезом можуть розвинутися як корінцеві симптоми через стиснення корінців спинномозкових нервів, так і нейрогенна кульгавість через поперековий хребцевий стеноз, спричинений прослизанням (проковзуванням), гіпертрофією жовтої зв'язки та (або) остеофітами [22], хоча ці симптоми не пов'язані з виразністю прослизання [23].

Пацієнти з хронічним болем за спондилолістезу через нестабільність хребетних сегментів страждають на тривожність, демонструють низьку здатність до самообслуговування і підвищений страх перед рухом [24, 25]. Ці проблеми також характерні і для спондилолістезу через страх зміщення хребців та їхнє пошкодження [24]. Посилення болю під час тривалих статичних поз та (або) рухів, у так званій «нейтральній зоні» (згідно з M. Panjabi [26]), проблеми із засинанням, пробудження через біль — усе це призводить до зниження якості життя пацієнтів [27]. Коли спондилолістез пов'язаний зі стисненням нервового корінця, пацієнти можуть повідомляти про парестезію, зниження чутливості та слабкість нижніх кінцівок [28]. У разі стенозу хребта нейрогенна кульгавість визначається пацієнтами водночас із труднощами під час ходьби на невеликі відстані, під час самостійного шопінгу, а також входу і виходу з автомобіля тощо [29–31].

Найпоширенішим типом спондилолістезу є дегенеративний. Ця патологія найчастіше трапляється в сегменті L4–L5 хребців у пацієнтів віком понад 50 років, її спричиняє зміщення тіла хребта та його пластини, що призводить до стенозу в поперековому відділі хребта та нейрогенної кульгавості [22, 32].

Загальновідомі епідеміологічні дані щодо дегенеративного спондилолістезу сильно різняться. Поширеність захворювання загалом, гендерне співвідношення пацієнтів та чинники ризику залишаються спірними.

Так, дослідження популяції китайців похилого віку (65 років і старше), яке включало 4 000 осіб (у рівній кількості жінки та чоловіки, середній вік — 72,5 років) виявило, що загальна поширеність спондилолістезу становила 25,0 % для жінок та 19,1 % для чоловіків, зі співвідношенням 1,3/1 відповідно [33]. У Копенгагенському дослідженні остеоартриту (за участю 1 533-ох чоловіків з середнім віком 62 роки та 2618-ми жінок з середнім віком 65 років) S. Jacobsen et al. [34] повідомили, що поширеність спондилолістезу склала 2,7 % серед чоловіків та 8,4 % серед жінок зі співвідношенням жінок до чоловіків 6,4/1. За інформацією H. F. Farfan [35], поширеність дегенеративного спондилолістезу становила 4,1 %. Вивчивши когорту професійних водіїв таксі в Тайбеї (середній вік — 44,5 ± 8,7 року, переважно чоловіки), J. C. Chen et al. [36] повідомили, що поширеність спондилолістезу склала 3,2 %. L. Kalichman et al. [37] виявили, що поширеність дегенеративного спондилолістезу становила 7,7 % серед чоловіків та 21,3 % серед жінок зі співвідношенням жінок до чоловіків 3/1. Група вчених з Японії, дослідивши популяцію з 2000 осіб методом багатозрізового комп'ютерного томографічного сканування, повідомила, що поперековий спондилоліз було виявлено у 5,9 % учасників, а співвідношення жінок до чоловіків становило 1/2 [38]. Вони також зазначили, що спондилолістез було виявлено у 74,5 % учасників з двобічним та у 7,7 % — з однобічним спондилолізом. В іншому дослідженні автори вказали на більшу швидкість розвитку спондилолізу (11 %) за даними комп'ютерної томографії, ніж рентгенографії [39]. Проте, це не було підтверджено іншими дослідженнями, які базувалися на даних КТ [40].

Деякі етнічні групи можуть мати вищий рівень поширеності, і це ймовірно пов'язано із генетичними чинниками [41, 42]. Так, існують дані про

вищу поширеність спондилолістезу серед чорношкірих американських жінок [43, 44].

Суперечливість поданих даних пояснюється, зокрема, неоднорідністю методів візуалізації та радіографічних орієнтирів, які використовують для вимірювань і діагностики.

Показано, що частота спондилолістезу підвищена у осіб з ревматоїдним артритом — 36,7 % [17, 45]. Також це захворювання поширене у пацієнтів зі сколіозом, серед яких та його частота становить 15–48 % [46, 47].

Серед пацієнтів з болем у спині патологічне зміщення тіл хребців виявили на рівні L3–L4 у 10 % випадків, на рівні L4–L5 — у 16 %, на рівні L5–S1 — у 7 % [48].

Нашу увагу привернуло дослідження V. M. Ravindra et al. [49], у якому кількісно оцінено захворюваність на дегенеративні захворювання хребта для виявлення глобального тягаря цієї патології. Дегенеративні захворювання поперекового відділу хребта є значною причиною інвалідності у світі; вони охоплюють такі стани, як спондилолістез, дегенерація диска та поперековий стеноз хребта. Загалом у світі дегенеративні захворювання хребта діагностують щорічно у 266 млн осіб (3,6 %), а захворюваність на спондилолістез з болем у поперековому відділі хребта найвищою є в Європі (832 на 100 тис. населення), за частоти спондилолістезу у всьому світі 0,20 %. Найвища захворюваність на стеноз хребта спостерігалася у Європі (2 191 на 100 тис. населення), а найнижча — в Африці (935 на 100 тис. населення). Симптоматичний дегенеративний поперековий стеноз хребта з клінічною нейрогенною кульгавістю є частою причиною звернення за консультацією до нейрохірурга, що найчастіше трапляється у пацієнтів віком старше 50 років. Лише в Сполучених Штатах Америки у 2021 році понад 2,4 млн людей страждали від симптоматичного поперекового стенозу хребта [50].

Дегенеративний спондилолістез рідко трапляється у віком до 40 років у чоловіків і до 50 років у жінок [37]. Описано кілька чинників ризику розвитку спондилолістезу, а саме: індекс маси тіла, вік та кут лордозу, які у жінок в

значній мірі були пов'язані з дегенеративним спондилолістезом; вплив віку був виявлений у чоловіків [34, 51]. Ймовірно, що розвитку цієї патології сприяє стоячий або сидячий способи життя. Проте проведені дослідження ризиків виникнення дегенеративного спондилолістезу в осіб похилого віку не виявили цього зв'язку [3, 52].

Швидкість прогресування дегенеративного поперекового спондилолістезу залишається неясною, як і незалежні чинники ризику його прогресування. У дослідженні 40 японських пацієнтів віком 34–79 років з дегенеративним спондилолістезом прогресування зміщення понад 5 % спостерігалося у 30 % випадків [53]. У решти 70 % пацієнтів прогресування захворювання виявлено не було.

S. Matsunaga et al. [54] вказують на прогресування захворювання після консервативного лікування у 34 % пацієнтів. У групі чоловіків, середній вік яких становив 74 роки, поширеність дегенеративного спондилолістезу становила 30 %, з яких лише у 12 % спостерігалося його прогресування. Проведене 15-річне спостереження виявило, що прогресування дегенеративного процесу найчастіше виникає у сегменті L4–L5, а ризик прогресування був найбільшим серед осіб віком від 40 до 60 років (порівняно з людьми, старшими за 60 років) [55].

Таким чином, поширеність дегенеративних захворювань поперекового відділу хребта залишається високою зі значним ризиком їхнього прогресування, особливо у людей вікової категорії старше 50 років. Тому питання їхнього виявлення, спостереження, лікування та профілактики є актуальними та такими, які потребують подальшого вивчення.

1.2. Міжтілова фіксація хребців як метод хірургічного лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта: становлення та сучасність

Наразі існують різні думки про оптимальну лікувальну стратегію щодо пацієнтів зі спондилолістезом поперекового відділу хребта [56]. До початку

XX століття лікування таких пацієнтів було виключно консервативним, обумовленим тодішнім рівнем медичної науки як такої взагалі. Основою лікування спондилолістезу є консервативне лікування, яке може полегшити симптоми захворювання [57]. Неефективність використання корсетних технологій для запобігання зміщення хребетного стовпа внаслідок спондилолізного дефекту, який розвинувся, призвела до ідеї фіксації хребця, який зміщується, до суміжних відділів хребта [58]. Класичним показанням до операції є неефективність комплексного консервативного лікування понад 6 місяців і персистуючий прогресуючий біль у спині [59].

Внутрішня фіксація та спондилодез поперекового відділу хребта — основні хірургічні методи лікування дегенеративних захворювань нижнього відділу попереку, ускладнених нестабільністю. Вони спрямовані на виправлення деформації та стабілізацію хребта, досягнення стійкого спондилодезу та ранню реабілітацію пацієнта [60, 61].

Для хірургічного лікування дегенеративного спондилолістезу впродовж тривалого часу використовували різні хірургічні методи, кінцевою метою яких є стабілізація сегмента хребта та декомпресія нервових структур [62]. Перші операції з приводу спондилолістезу було проведено з заднього доступу та спрямовано на формування заднього (задньобічного) кісткового блоку. Однак етіологія захворювання (роз'єднаність передніх і задніх відділів хребта), високий рівень неврологічних розладів, прогресування зміщення хребетного стовпа в різні терміни після операції, а також недосконалий спінальний інструментарій на той час не дали змогу отримувати стійкі позитивні результати лікування [63].

Задній міжтіловий спондилодез поперекового відділу хребта (англ. posterior lumbar interbody fusion — PLIF) зазнав величезних змін з того часу, як R. B. Cloward вперше описав цю процедуру в 1952 році [10]. Операція PLIF є традиційною технікою, яку здійснюють проведенням фенестрації пластинок і частковою резекцією фасеткових суглобів з подальшою ретракцією дурального мішка та нервових корінців для доступу до

інтерсоматичного простору [64]. У 1982 р. J. Harms і H. Rolinger уперше провели відкритий трансфорамінальний поперековий міжтіловий спондилодез (англ. transforaminal lumbar interbody fusion — TLIF) [65, 66], який з того часу став однією з найпопулярніших хірургічних технік [67]. Порівняно з PLIF техніка TLIF зменшує тракцію твердої мозкової оболонки та нервових корінців, зменшує вірогідність ятрогенних ускладнень, пов'язаних з нервами, та зберігає структурну цілісність задньої опорної колони [68]. Пізніше, у 1988 році, A. D. Steffee та D. J. Sitowski поєднали задній артродез із задньою фіксацією [11]. Перевага такого підходу полягає в тому, що задній доступ є найбільш поширеним та знайомим для нейрохірургів, а процедури декомпресії та спондилодезу можуть виконуватися за допомогою одного й того самого доступу. У 2008 році D. L. Yan et al. [69] порівняли PLIF та TLIF для однорівневого спондилодезу за дегенеративного спондилолістезу I–II ступеня, виконавши міжтіловий спондилодез із задньою транспедикулярною фіксацією. Дослідники не виявили випадків міграції, в усіх пацієнтів було досягнуто спондилодез, а профілі виявлених ускладнень (радикуліт, розхитування гвинтів тощо) були однаковими між групами. Проте J. Liu et al. [70] за PLIF порівняно з TLIF повідомили про значно більшу частоту розривів твердої мозкової оболонки (12 % проти 3,9 % відповідно, $p = 0,03$), післяопераційну дисфункцію нервових корінців (9,6 % проти 1,9 % відповідно, $p = 0,02$) та повторні операції (10,4 % проти 1,9 % відповідно, $p = 0,02$).

Регрес клінічної картини показав, що обидві методики мають добру або відмінну оцінку функції за середнього зменшення болю на чотири бали [69, 70]. Відсоток зміщення значно покращився за даними доопераційних та початкових післяопераційних рентгенограмам в обох групах у середньому на 30,1–31,4 %. J. Liu et al. [69] повідомили, що у пацієнтів, яким було виконано PLIF, був значно триваліший у хвилинах (хв.) час операції (242 ± 67 хв. проти 188 ± 46 хв. відповідно, $p = 0,037$), вища інтраопераційна крововтрата (483 ± 403 мл проти 308 ± 385 мл відповідно, $p = 0,035$) та більша частота

переливання крові (19,2 % проти 4,9 % відповідно, p = 0,001). Проте, обидві техніки спондилодезу виявилися ефективними щодо значного збільшення міжхребцевого простору та форамінальної висоти. Зокрема, не було жодних суттєвих відмінностей між рентгенографічними даними обох груп.

У доступній літературі описано різні варіанти оперативного лікування спондилолістезу, мета яких полягає у визначенні хірургічних технологій, які забезпечують кращі клінічні результати та меншу частоту ускладнень й повторних операцій. Так, передній доступ для міжтілового спондилодезу (англ. anterior approach for interbody fusion — ALIF) забезпечує найкращу швидкість спондилодезу через широку кісткову поверхню хребця платформи порівняно з платформами, які забезпечуються задніми хірургічними техніками [71]. Непряму компресію досягають завдяки ефекту лігаментотаксису, який утворюється міжтіловим кейджем. М'язові ушкодження за цієї методики мінімальні, можливі ускладнення можуть бути у вигляді ушкодження сечоводів і кишківника, великих судин, порушення еякуляції у чоловіків [64].

Бічний поперековий міжтіловий спондилодез (англ. lateral lumbar interbody fusion — LLIF) визнаний менш інвазивним хірургічним методом, який виконують через передньобічний черезпоперековий доступ [72]. Операція LLIF є альтернативою традиційним переднім доступам і може використовуватися від сегмента L1–L2 до L4–L5. Відомі підваріанти цієї методики — крайній латеральний (англ. extreme lateral interbody fusion — XLIF) і косий (англ. oblique lateral interbody fusion — OLIF) міжтіловий спондилодез, за яких місце введення міжтілового кейджа варіюється в бічне положення та положення навкіс відповідно. За цих методів відмічають меншу кровотечу й тривалість операції, коротший термін перебування в стаціонарі та менш виражений післяопераційний біль порівняно з задніми доступами. Серед виявлених ускладнень спостерігалися біль під час згинання та розгинання стегон через маніпуляції з клубовим поперековим м'язом, парестезії та рухові порушення внаслідок пошкодження клубово-пахвинного, клубового-

підчеревного, латерального-стегнового шкірного та стегново-статевого нерва, інколи трапляються травми великих судин і післяопераційні грижі [64].

Дослідники A. Y. Pawar et al. [73] порівняли PLIF і LLIF у лікуванні дегенеративного спондилолістезу. Вони виявили однакову тривалість операції, але середня крововтрата була значно нижчою в разі LLIF, ніж у групі PLIF (438 хв. проти 750 хв. відповідно, $p < 0,01$), частота розривів твердої мозкової оболонки була нижчою в разі LLIF (0 проти 5, $p = 0,01$). У групі LLIF було відновлено форамінальну висоту, висоту міжхребцевого проміжку та поперековий лордоз. У жодній з груп не було зареєстровано стійкий ятрогенний неврологічний дефіцит. У групі LLIF значно знизилася інвалідність за індексом Oswestry, але без суттєвих відмінностей в інших показниках клінічних результатів між групами.

Дослідники R. P. Norton et al. [74] повідомили, що пацієнти, яким було виконано міжтіловий спондилодез через передній або латеральний доступи, мали значно меншу ймовірність розвитку інтраопераційної анемії з крововтратою, але вищий ризик пошкодження внутрішніх органів порівняно з групою PLIF, TLIF.

Порівняння LLIF та мінімально інвазивним TLIF під час лікування дегенеративного спондилолістезу I–II ступенів показало меншу крововтрату у пацієнтів групи LLIF відносно групи TLIF, а середній час операції та тривалість перебування в стаціонарі не відрізнялися між групами. Відзначено ускладнення у вигляді слабкості під час згинання стегна, яка спостерігалася в групі LLIF у 31 % пацієнтів та минала протягом 6 місяців в усіх випадках. Сенсорний або дистальний руховий дефіцит, який мав місце, був минущим, і між групами не було виявлено суттєвих відмінностей. Частота зрощення після LLIF склала 100 %, а після TLIF — 96 % (в одному випадку була потреба у повторній операції). Показники болю, інвалідності та якості життя в обох групах значно покращилися порівняно з початковими [75].

Нині завдяки інноваціям концепцій, розвитку хірургічних інструментів та оптичного обладнання, мінімально інвазивна хірургія хребта стала

загальною тенденцією [9]. У 2002 р. K. T. Foley вперше повідомив про мінімально інвазивну методику TLIF (англ. minimally invasive surgery transforaminal lumbar interbody fusion — MIS-TLIF) [76]. Операція MIS-TLIF стає найпопулярнішою методикою лікування в сучасній вертебрології [77]. Це пов'язано з низьким ятрогенним пошкодженням м'язів, зв'язок і кісткової тканини в процесі здійснення всіх етапів оперативного втручання [78, 79]. Водночас із цими перевагами зазначають і такі недоліки, як обмежений робочий простір, значуще інтраопераційне променеве навантаження та висока кількість ускладнень, пов'язана з тривалістю навчання, що є суттєвими стримувальними чинниками для широкого застосування цієї технології більшістю спінальних хірургів [78, 80]. З іншого боку, накопичення досвіду виконання мінімально інвазивних хірургічних втручань створює передумови скорочення часу операції та попередження ризиків розвитку періопераційних несприятливих наслідків.

У зв'язку з цим, аналіз результатів сучасних клінічних досліджень є особливо актуальним. Наразі інформація щодо порівняння клінічної ефективності методик MIS-TLIF і відкритої TLIF є суперечливою, що насамперед пов'язано зі значною часткою суб'єктивізму в процесі інтерпретації даних рівня больового синдрому та функціонального статусу [81, 82]. Для цього важливим є об'єктивне оцінювання мінімально інвазивних і традиційних хірургічних методик для вірогідного порівняння їхніх результатів.

Проведене H. N. Modi та U. Shrestha [83] дослідження MIS-TLIF та відкритого TLIF за параметрами сагітального балансу показало, що MIS-TLIF та відкритий TLIF однаково ефективні для корекції поперекового й фокального лордозу.

Інші дослідники, порівнюючи рентгенологічні дані, зазначають більшу клінічну ефективність MIS-TLIF порівняно з відкритою TLIF для формування повноцінного кісткового блоку [84, 85]. Проте, вони вказують на підвищене променеве навантаження під час виконання черезшкірних маніпуляцій

унаслідок відсутності прямої візуалізації сегмента, який оперують [86, 87]. Це сприяє підвищенню інтересу до вивчення радіаційного навантаження на медичний персонал і пацієнта під час здійснення оперативного втручання за методикою MIS-TLIF.

Виконано кілька систематичних оглядів з мета-аналізами, у яких оцінено ефективність використання MIS-TLIF та відкритої TLIF після хірургічного лікування пацієнтів з дегенеративними захворюваннями поперекового відділу хребта.

Щодо інтраопераційної кровотечі та часу перебування в лікарні доведено переваги MIS-TLIF, проте немає одностайної думки щодо тривалості операції. Так, A. Hammad et al. [88] продемонстрували відсутність різниці тривалості операції між групами MIS-TLIF і відкритої TLIF. Проте Q. Xie et al. [89] вказують на меншу тривалість операції в групі MIS-TLIF порівняно з групою відкритої TLIF. Але деякі вчені вважають, що MIS-TLIF пов'язаний з тривалішим оперативним втручанням [90]. R. Qin et al. вказують на більшу тривалість проведення MIS-TLIF [56]. Напроти, В. О. Бивальцев та співавт. (2019) зазначають, що статистично значуще меншу тривалість оперативного втручання зареєстровано у групі MIS-TLIF порівняно з групою відкритої TLIF. Тобто, відбувається накопичення досвіду виконання мінімально інвазивних втручань, а як критерії порівняння беруть до уваги тривалість хірургічного доступу та час, який необхідно витратити на ушивання операційної рани, тощо.

Дослідники A. Li et al. [91] зазначають меншу інтраопераційну крововтрату зі зниженням необхідності післяопераційного дренування в пацієнтів після проведення MIS-TLIF порівняно з відкритою TLIF. Виявлено статистично значуще менший об'єм крововтрати у пацієнтів після виконання мінімально інвазивного спондилодезу, що вказує на зниження ризику пошкодження шкіри, паравертебральних м'язів і кісткових структур унаслідок використання тубулярних ретракторних систем, спеціалізованого інструментарію та специфічної форми стабілізувальних конструкцій [92]. Це

сприяє проведенню хірургічних маніпуляцій у вузькому анатомічному коридорі з невеликого шкірного розтину та з меншою атрофією паравертебральних м'язів [56].

Основним недоліком MIS-TLIF, за даними C. Kim et al. [87], є високі тривалість, а отже, і доза інтраопераційного опромінення хірурга та пацієнта, що створює ризики розвитку злоякісних новоутворень і спадкової патології тощо. Так, тривалість опромінення склала 94,2 с у групі MIS-TLIF проти 39,42 с у групі відкритої TLIF. Встановлено, що теоретичний ризик розвитку онкопатології після односегментарного ригідного спондилодезу збільшується на $36{,}4\times10^{-6}$ і на $87{,}0\times10^{-6}$ після відкритої TLIF і MIS-TLIF відповідно [93]. Ризики формування спадкових захворювань становлять 0,0001 % після відкритої TLIF та 0,0003 % після MIS-TLIF [94]. У зв'язку з цим, актуальним нині є пошук шляхів зниження променевого навантаження на медичний персонал і пацієнта шляхом використання комп'ютерної навігації [95, 96] та симультанних прийомів, які б давали змогу протягом одного променевого дослідження здійснити маніпуляції на різних сегментах хребта [97].

За даними C. H. Kim et al. [86] встановлено статистично значущо меншу тривалість перебування пацієнта в стаціонарі після операції MIS-TLIF порівняно з відкритою TLIF. Це підтверджує малотравматичний характер втручання в групі MIS-TLIF, менший локальний больовий синдром і сприяє безпечній маршрутизації пацієнта на амбулаторний етап без необхідності подовження термінів стаціонарного лікування.

Актуальним є вивчення можливості оптимізації хірургічної техніки під час проведення MIS-TLIF. Останнім часом розробляють ендоскопічний трансфораміальний міжтіловий спондилодез поперекового відділу хребта (англ. endoscopic transforaminal lumbar interbody fusion — Endo-TLIF. Цей підхід використовує комбінацію застосування ендоскопічної візуалізації, дискектомії, кейджів, черезшкірної фіксації та остеобіологічних препаратів [98]. Деякі дослідники вважають, що розміщення міжтілового кейджа під ендоскопічним контролем створює можливість застосування

меншого за розміром кейджа через те, що звичайний кейдж занадто великий для проходження через робочу трубку. Це може призвести до підвищеного ризику незрощення, уповільненого опускання кейджа або його міграції, особливо у пацієнтів із тяжким остеопорозом [99–101]. Тому вирішальне значення в хірургічній техніці мають нові методи розширення міжхребцевого отвору, плавного та безпечного розміщення ендоскопічної трубки в міжхребцевому просторі та імплантації звичайного кейджа. Дослідники Y. Lv et al. [102] представили нову С-подібну систему робочих канюль, призначену для безпечного та швидкого розміщення кейджа в міжхребцевому просторі, яка здатна забезпечити мінімально інвазивну ендоскопічну декомпресію й захистити нерви.

Таким чином, використання ендоскопічних технологій для поперекового міжтілового спондилодезу під час лікування дегенеративних захворювань поперекового відділу хребта зводить до мінімуму інтраопераційну травму, можливі ускладнення, зменшує післяопераційний біль і покращує результати лікування. Проте хірургічну технологію поперекового спондилодезу щодо лікування дегенеративного спондилолістезу має бути індивідуалізовано відповідно до клінічних і візуальних характеристик кожного пацієнта.

1.3. Біомеханіка сегментарної нестабільності та дегенеративні процеси в поперековому відділі хребта

Поперековий хребець як стресове з’єднання верхнього грудного хребця й нижнього крижового хребця є не тільки місцем найбільшої біомеханічного напруження, але й місцем, яке найраніше зазнає процесів дегенерації в клінічному аспекті [39]. Хребетно-руховий сегмент складається з двох суміжних хребців із їхніми фасетковими суглобами, міжхребцевим диском і прилеглими м’язово-зв’язковими структурами. У звичайних умовах повсякденного життя хребетно-рухові сегменти мають відповідати основним

функціональним вимогам, таким як міцність, мобільність і стабільність [3]. Дегенерація поперекового міжхребцевого диска пов'язана з віком, стресом, генетичними чинниками тощо [103]. Одним з основних проявів дегенеративних захворювань поперекового відділу хребта є нестабільність його нижнього відділу [104].

Нині широко обговорюються клінічні прояви нестабільності в хребетно-руховому сегменті [105–108], а нестабільність хребетно-рухового сегмента в поперековому відділі хребта залишається до кінця не вивченою проблемою. Клінічна картина нестабільності не є специфічною, а зв'язок між скаргами, симптомами та даними інструментальних методів обстеження видається спірним [109–111].

Нині нестабільність визначається як патологічний процес, який базується на механічному зміщенні хребців один відносно одного, що супроводжується болем у хребетно-рухових сегментах [3]. Розширення обсягу рухів у хребетно-руховому сегменті без патологічного зсуву також розглядають як вияв нестабільності. У практичній діяльності термін «нестабільність» — це свого роду «збиральний образ». Так, M. M. Panjabi [112] визначив нестабільність як втрату здатності зберігати індивідуальний обсяг і патерн рухів під час впливу фізіологічних навантажень, у яких не розвиваються структурні зміни, немає ознак анатомічного ушкодження структур і (або) ознак компресії невральних структур.

Американською асоціацією нейрохірургів було запропоновано таке визначення: нестабільність хребетно-рухового сегмента — це розвиток рухів у хребетно-руховому сегменті, які перевищують нормальні значення, за будь-якого навантаження на поперековий відділ хребта [113]. У світлі своєї теорії M. M. Panjabi визначає нестабільність як суттєве зниження потенціалу стабілізуючої системи поперекового відділу хребта для підтримання міжхребцевих нейтральних зон у фізіологічних межах (у яких не розвиваються неврологічний дефіцит, деформація хребта чи больовий синдром). Дослідник

розрізняє 2 типи нестабільності: сегментарну та клінічну, в обох випадках яких відбувається патологічне розширення нейтральної зони [112].

Сегментарна нестабільність виявляється патологічною рухливістю й зсувом хребців один відносно одного (порушення пасивної системи). Клінічна нестабільність не виявляється патологічною рухливістю в хребетно-руховому сегменті та зміщенням хребців один відносно одного (натомість, відбувається порушення активної системи або порушенням нейронального контролю) [79].

Дослідники W. H. Kirkaldy-Willis та H. F. Farfan визначили нестабільність як положення, за якого клінічний стан пацієнта погіршується внаслідок дії мінімальних рухів, що провокують посилення клінічної симптоматики [114]. Вони наголосили на клінічній складовій синдрому. А. В. Крутько та співавт. запропонували включити останні стадії дегенеративно-дистрофічного ураження з обмеженням рухливості хребетно-рухового сегмента до категорії нестабільного стану. Якщо розглядати поняття «нестабільність» з погляду технічного визначення, то така пропозиція не коректна, оскільки за обмеження рухливості системи вона не може стати нестабільною.

G. Schneider et al. [115] на прикладі оцінювання рухів в осіб зі спондилолістезом довели, що нестабільність не завжди пов'язана зі збільшенням амплітуди руху в хребетно-руховому сегменті, а може виявлятися патологічним напрямком руху в сагітальній площині або зміщенням центру ротації.

J. Beazell et al. [116] пропонують виділяти механічну нестабільність і функціональну. На їхню думку, механічна нестабільність виявляється зміщенням, яке виявляється за допомогою функціональних проб і пов'язане зі структурним ушкодженням хребетно-рухового сегмента. Механічна нестабільність може бути симптомною й асимптомною. Функціональна нестабільність пов'язана з порушенням нейром'язового контролю хребетно-рухового сегмента. Вчені висловили припущення, що пацієнтів із симптомною механічною нестабільністю треба розглядати як кандидатів на спондилодез, а

осіб з функціональною нестабільністю необхідно лікувати вправами лікувальної фізкультури та зміцненням м'язового корсета поперекового відділу хребта.

З огляду на викладене, можна стверджувати, що нестабільність хребетно-рухового сегмента — це патологічний стан, який виникає з різних причин, його провідною ознакою є недостатність опорної спроможності поперекового відділу хребта, яка виявляється під впливом навантажень патологічними переміщеннями та болем [117].

Прямоходіння й осьове навантаження ваги людини є причиною надмірного перенапруження, яке досягає максимуму на рівні попереково-крижового переходу та вищих сегментів. Це призводить до тяжких вікових змін у хребетно-рухових сегментах [118]. Дегенеративні процеси в поперековому відділі хребта зазвичай виникають у міжхребцевому диску, прогресивно ініціюють біомеханічні та структуральні зміни на відповідному рівні, що призводять до модифікації фізичних можливостей еластичності та механічного опору. Дегенеративні процеси в міжхребцевому диску призводять до поступового розпаду колагенових волокон та зменшення вмісту протеогліканів, поступової втрати води й еластичності диска [119]. Після 40-річного віку диск фіброзується та дезорганізується внаслідок старіння й дегенерації; на кінцевій стадії виявляються ділянки утворення фіброзного хряща з переважанням аморфної речовини [120]. У якийсь проміжок часу цей процес спричинить передньо-заднє звуження й остаточне руйнування міжхребцевого диска [121].

Отже, набута руйнація міжхребцевого диска складається з трьох клінічно важливих етапів: а) патологічні зміни в тілах хребців, утворення остеофітів; б) переднє випинання жовтих зв'язок і заднє випинання задньої поздовжньої зв'язки з послідовним звуженням хребетного каналу; в) заднє випинання надмірної поверхні диска зі звуженням хребетного каналу та нижніх кишень міжхребцевих отворів. До того ж дегенерація міжхребцевого диска та його руйнування передбачає переднє або заднє взаємне зміщення

суміжних хребців. Це призводить до ослаблення зв'язкового апарату, який утримує хребці, та до краніо-каудальної часткової сублюксації фасеткових суглобів, які можуть бути асиметричними з різних боків. Постійні навантаження на фасеткові суглоби згодом спричиняють спондилоартроз, утворення остеофітів, які, зі свого боку, призводять до звуження латеральних кишень хребетного каналу та міжхребцевих отворів. Надалі часткова сублюксація фасеткових суглобів призводить до стикання верхівки верхнього суглобового відростка з вищою міжсуглобовою частиною й ніжкою. Безперервне стикання цих структур призводить до утворення остеофітів та поступового звуження хребетного каналу й міжхребцевих отворів [122].

Проте T. Lewin [123] у своєму дослідженні виявив, що спондилоартроз фасеткових суглобів може виникати незалежно від ураження диска та відзначається потовщенням суглобового хряща, субхондральним склерозом, утворенням остеофітів, запаленням синовіальної оболонки й ослабленням капсули. Під час прогресії змін можливий розвиток гіпермобільності фасеткових суглобів, що може призвести до спондилолістезу. Цей термін відбиває переднє зміщення хребця щодо нижнього в сагітальній площині.

Взаємозв'язок між нестабільністю на поперековому рівні та дегенеративним спондилолістезом був припущений W. H. Kirkaldy-Willis та H. F. Farfan [114], які у функціональному плані запропонували три клінічні та біомеханічні стадії дегенеративних змін поперекового відділу хребта: тимчасової дисфункції, нестабільної фази та стабілізації. Дегенеративні зміни хребта охоплюють дегенерацію диска, спондилоартроз, дегенерацію зв'язок і зміни в м'язах. Їхня модель передбачає, що динамічна нестабільність і подальша рестабілізація дегенеративного сегмента поперекового відділу хребта відбуваються в певні фази та можуть бути тісно пов'язані з висотою диска, а також з його дегенерацією. Кілька досліджень пов'язують зі ступенем спондилолістезу як висоту диска, так і ступінь його дегенерації [124, 125].

W. S. Iii et al. [125] показали, що велика висота диска корелює з підвищеною динамічною нестабільністю. Аналіз *in silico* у непатологічних

умовах показав, що збільшення висоти диска пов'язане з великим діапазоном рухів у цьому сегменті, припускаючи, що збереження висоти диска є життєво важливим для руху на цьому рівні [126]. T. Iguchi et al. [127] у патологічних умовах вивчили вплив віку та висоти диска за результатами сегментарних зображень на рентгенограмах і виявили, що висота диска була найбільш значущим чинником, пов'язаним з ознаками нестабільності. У дослідженнях показано, що збільшена висота диска, ймовірно, сприяє патологічній нестабільності, особливо в умовах дегенеративного спондилолістезу [125, 127].

A. J. Rahyussalim et al. [128] виявили, що рівні дегенерації диска обернено пропорційні динамічній нестабільності. Однак під час МРТ-досліджень пацієнтів із дегенеративними захворюваннями поперекового відділу хребта A. Fujiwara et al. [129] виявили, що збільшення рівня дегенерації диска відповідає збільшенню передньої трансляційної нестабільності. У когорті із 637 пацієнтів T. Iguchi et al. [127] виявили, що прогресування спондилолістезу було пов'язане зі ступенем дегенерації диска. Згідно їхнім даним, за 3-го ступеню спондилолістез може швидко прогресувати, призводячи до подальших дегенеративних змін [127]. Загалом результати зазначених досліджень підтверджують думку про те, що динамічна нестабільність знижується у пацієнтів з тяжкими дегенеративними змінами через такі механізми рестабілізації, як спондильоз.

Спондилодез має різні способи реалізації, такі як фіксація поперекових відростків [130], фіксація задньої пластинки [131], задньобічна фіксація [132] та міжтілова фіксація [64]. Експериментально і клінічними випробуваннями доведено, що міжтіловий спондилодез є найбільш біомеханічно виправданим та має задовільний клінічний ефект [133].

Міжтілові спондилодези з використанням міжхребцевих кейджів стають усе більш поширеними в хірургії хребта [133]. Використання кейджів є життєво важливим для відновлення висоти диска, правильного коронарного та сагітального вирівнювання та досягнення непрямої декомпресії [134].

Кейдж — це замінник диска, який виготовляється зі спеціалізованого пластику. Пружність його максимально наближена до відповідних показників кістки. Він усередині порожній та заповнюється кістковими фрагментами, видаленими раніше, або штучною кісткою [135]. Виділяють кілька основних переваг кейджів. По-перше, вони забезпечують додаткове підтримання передньої колони, що призводить до більш високої жорсткості міжтілового спондилодезу проти заднього спондилодезу лише за біомеханічних випробувань [136]. По-друге, залежно від типу кейджа досягаються велика площа поверхні для спондилодезу та непряма декомпресія нейрофорамену [137]. Нарешті, хірург має можливість відновити баланс хребта або шляхом сагітального вирівнювання з використанням клиноподібного (лордотичного) кейджа через геометрію, або сегментарного коронарного вирівнювання, адаптуючи задню компресію стрижня до деформації [138]. Тому імплантація кейджа є обов'язковою для багатьох хірургів-вертебрологів під час виконання дорсального поперекового спондилодезу.

Розміщення міжтілових кейджів через задній доступ може зменшити діапазон рухів і покращити стабільність після операції. До того ж міжтіловий кейдж, який використовується в PLIF, покращує здатність навантаження поперекового відділу хребта [139]. Зазвичай у разі PLIF використовується задня додаткова фіксація для покращення багатоплощинної стабільності та розподілу навантаження [140].

Традиційні кейджі з поліефіреф іркетону (англ. polyether ether ketone, PEEK) або титану широко використовуються в разі поперекового спондилодезу завдяки їхнім хорошим механічним властивостям, близьким до властивостей кортикальної кістки [141–143].

Кейджі з титану також багато років застосовуються для міжтілового спондилодезу. Попри високу жорсткість сплаву за використання титанового кейджа, повідомлялося про високий ризик його просідання [141, 144]. Матеріал PEEK, навпаки, має жорсткість, близьку до жорсткості кортикальної кістки, і широко використовується для виготовлення кейджів [145]. Крім того,

використання кейджів з PEEK для міжтілового спондилодезу сприяє номінальному безпосередньому розподілу навантаження на передні відділи та відновленню висоти колапсу міжхребцевого простору, спричиненому дегенерацією дисків [146]. Швидкість осідання за міжтілового спондилодезу з використанням кейджів з PEEK була нижчою, ніж за використання титанових кейджів [147]. Проте швидкість спондилодезу була нижчою за використання кейджів з PEEK через їхні остеокондуктивні та остеоіндуктивні недоліки [148].

Додавання аутологічного кісткового трансплантата з гребеня здухвинної кістки вважають «золотим стандартом» хірургічної технології використання кейджів. Висока швидкість зрощення досягається через наявність клітинних чинників, сприятливих для загоєння кістки, та властивостей остеокондукції й остеоіндукції [149]. Проте не варто ігнорувати такі ускладнення й захворювання, як інфекція, кровотеча, біль у донорській ділянці та переломи здухвинної кістки [150, 151]. Зазвичай під час PLIF розсікають остистий відросток і пластинки, тому використання аутотрансплантату з остистого відростка та пластинок дає змогу уникнути ускладнень і захворювань, які виникають під час використання кісткового трансплантату з гребеня здухвинної кістки [152, 153].

Для запобігання ускладненням під час використання аутологічного кісткового трансплантата, отриманого з гребеня здухвинної кістки, та подолання недоліків титанових або PEEK кейджів, було розроблено кейдж з аутологічної кістки [144]. Дослідження показали високу швидкість спондилодезу після PLIF з використанням кейджів, виготовлених з аутологічного кісткового трансплантату з остистих відростків і пластинок [152]. Нещодавно було проведено дослідження клінічні та in vitro для вивчення біомеханічних характеристик, яке показало, що біомеханічну стабільність, швидкість злиття та безпеку PLIF можна підтримувати за допомогою аутологічних кісткових кейджів [153, 154].

Отже, наявність динамічної нестабільності на тлі дегенеративного спондилолістезу має істотне значення не тільки у його патогенезі, а й у виборі методу лікування. Міжтіловий спондилодез із використанням міжхребцевих кейджів дає змогу ліквідувати патологічну нестабільність хребцевого сегмента. Хребці відразу після операції надійно фіксуються, що створює можливість ранньої активізації, а кісткове зрощення хребців відбувається впродовж 4–6 місяців.

1.4. Ускладнення міжтілової фіксації спондилолістезу поперекового відділу хребта

Вивчення спеціалізованої літератури показало, що дані щодо вірогідного розвитку ускладнень залежно від типу міжтілової фіксації нечисленні. У багатьох дослідженнях повідомлялося про шкідливі ефекти традиційної відкритої методики TLIF, такі, як надмірна дисекція паравертебральних м'язів та інтраопераційна кровотеча [84, 155]. У літературі є повідомлення про те, що надмірна дисекція параспінальних м'язів може спричинити м'язову денервацію, ішемічний некроз і порушення ремоделювання, що призводять до атрофії м'язів та утворення рубців [156].

K. Phan et al. [155] описали меншу кількість інфекційних ускладнень у групі MIS-TLIF проти відкритої TLIF та зіставну кількість пошкоджень твердої мозкової оболонки: стандартизована різниця середніх (СРС) = 0,27; 95-відсотковий довірчий інтервал (95 % ДІ) 0,14–0,53; p-рівень 0,0001; рівень гетерогенності (I^2) 0 % проти СРС = 0,59; 95 % ДІ 0,28–1,22; p = 0,15; I2 = 32 %, відповідно). Дослідження N. Tian et al. [157] не виявили значних відмінностей щодо частоти мальпозиції металоконструкцій, випадків інфекції ділянки хірургічного втручання, травми невральних структур і псевдоартрозу між MIS-TLIF та відкритою TLIF.

Існує неоднорідність зареєстрованих ускладнень після MIS-TLIF та відкритої TLIF. W. Hu et al. [158] показали меншу кількість несприятливих

наслідків у групі мінімально інвазивних декомпресивно-стабілізуючих втручань. Проте, у метааналізі K. Phan et al. [155] вказують на рівну кількість ускладнень після MIS-TLIF і відкритої TLIF. Для обох хірургічних методик характерними ускладненнями є мальпозиція використаних конструкцій, неповноцінний спондилодез, пошкодження невральних структур та інфекція в зоні хірургічного втручання (Бивальцев В. В., Калінін А. А., 2018). N. Tian et al. [157] встановили вищий рівень неправильного положення імплантату та формування псевдоартрозу в групі MIS-TLIF, високі рівні пошкодження твердої мозкової оболонки та інфекційних ускладнень у групі відкритої TLIF. Однак за таких умов жодна з відмінностей не була статично значущою, статистичні докази гетерогенності також були відсутні. W. Hu et al. [158] у своєму дослідженні також акцентували увагу на найчастіше реєстрованих несприятливих наслідках — інфекціях ділянки хірургічного втручання, венозних тромбоемболічних ускладненнях, пошкодженні твердої мозкової оболонки та мальпозиції конструкцій у 11,87 % пацієнтів у групі MIS-TLIF та 14,35 % — у групі відкритої TLIF.

Попри вищу загальну частоту ускладнень за використання відкритої TLIF, обидві методики мають прийнятні профілі ускладнень [159]. Розвиток же мінімально інвазивної хірургії у практиці нейрохірургічної допомоги за патології хребта сприяє мінімізації хірургічної агресії для швидкого функціонального відновлення та повноцінної соціально-побутової реабілітації пацієнтів.

Поперековий міжтіловий спондилодез із кейджем може забезпечити міцне з'єднання та відновити висоту диска з нормальним сагітальним і коронарним вирівнюванням. Процедури поперекового міжтілового спондилодезу демонструють задовільні клінічні результати, пері- та післяопераційні ускладнення, пов'язані із застосуванням кейджа. В своєму дослідженні D. Y. Lee et al. [160] показали, що на зміщення кейджа ззаду після поперекового міжтілового спондилодезу впливає низький індекс маси тіла пацієнта, розхитування заднього інструментарію та грушоподібний дисковий

простір. На думку авторів, запобігти цьому типу ускладнень може стабільна фіксація міжтілового спондилодезу.

Подолання ускладнень, пов'язаних з міграцією кейджа безпосередньо пов'язане з удосконаленням його конструкції, оскільки відповідний міжтіловий спейсер або кейдж відіграє ключову роль в успішному зрощені кістки як за TLIF, так і за PLIF. Різні імплантати можуть призвести до різних кінематичних і механічних змін та вплинути на результати спондилодезу. Різні положення та форми кейджів можуть не тільки помітно впливати на сегментарний лордоз, але також змінювати обсяг і площу нейрофораміального простору [161, 162]. Попри різноманітність конструкцій та матеріалів міжтілового спондилодезу, єдиної думки щодо їхнього оптимального вибору немає. Кейдж у формі кулі може забезпечити легке введення та безпечну навігацію навколо нервових тканин, двоопуклий кейдж може відповідати увігнутій формі між верхньою та нижньою кінцевими пластинами, а кейдж із зазубреною поверхнею може стабілізувати положення інтертіла та запобігти його міграції [163]. Відповідний міжтіловий кейдж може забезпечити задовільне осьове підтримання, щоб запобігти просіданню трансплантата й обмежити рухливість післяопераційного сегмента та полегшити зрощення трансплантата [164].

В останні роки внаслідок розвитку малоінвазивних хірургічних методів стали популярними розширювані міжтілові кейджі, які забезпечують підтримання передньої колони, пристосовані до конкретного міжтілового простору й забезпечують необхідний хірургічний доступ завдяки вбудованому механізму, який дає змогу регулювати висоту, тобто одноплощинне розширення [165–167]. Також віднедавна почали застосовувати поперекові кейджі зі змінним напрямом. Вони мають форму нирки, за їхнього використання відсутня ретракція твердої мозкової оболонки [168, 169]. Такі кейджі можуть створювати й підтримувати сагітальний лордоз, запобігаючи просіданню та неврологічним проблемам за розміщення структурного алотрансплантата за допомогою мікроскопічної техніки [170].

В вітчизняном сегменті фахової літератури останнього десятиліття питання хірургічного лікування поперекового спондилолістезу висвітлене нерівномірно: кількість робіт, безпосередньо присвячених дегенеративному спондилолістезу, є відносно невеликою, натомість накопичено масив публікацій, який стосується суміжних за патогенезом і хірургічною тактикою станів — нестабільного поперекового стенозу, дегенеративних уражень поперекового відділу хребта, міжтілового спондилодезу, біомеханіки транспедикулярної фіксації та відновлення сагітального профілю. З такого стану джерельної доказової бази можна зробити висновок, що, з одного боку, доцільним є розкриття теми і у вітчизняних роботах, з іншого — аналіз українських публікацій доцільно будувати не лише навколо самого факту лістезу, а й навколо ключових хірургічних цілей (декомпресії, стабілізації, відновлення міжтілової висоти, редукції аксіальної трансляції, покращення хребтово-тазового балансу та зниження частоти ускладнень).

Одним із найпослідовніше опрацьованих в Україні напрямів є порівняння відкритих і малоінвазивних декомпресивно-стабілізуючих втручань за дегенеративно-стенотичних уражень поперекового відділу хребта. У роботі К. І. Горбатюка та співавт. [171] показано, що малоінвазивна декомпресія та стабілізація за нестабільного поперекового стенозу забезпечує меншу інтраопераційну крововтрату і коротший ліжко-день порівняно з відкритою технікою, хоча супроводжується більшою тривалістю операції та вищим променевим навантаженням. Ці дані мають безпосередню проєкцію на хірургію спондилолістезу, оскільки йдеться про той самий конфлікт між інвазивністю доступу і повнотою декомпресії та стабілізації. Подібний висновок містить і досвід І. О. Капшука та Ю. Є. Педаченка [172], які, аналізуючи хірургічне лікування дегенеративних стенотичних уражень поперекового відділу хребта, відзначили статистично значуще скорочення термінів госпіталізації за малоінвазивної декомпресії, особливо у поєднанні з протоколом ERAS. Отже, вітчизняні роботи узгоджено демонструють, що

мінімізація доступу має не лише технічне, а й клінічне значення, однак сама по собі не знімає питання про достатність сегментарної реконструкції.

Окреме місце в українській літературі займає публікації результатів застосування ендоскопічних технологій. Підкреслено переваги ендоскопічних методик щодо зменшення ушкодження заднього зв'язкового апарату та м'яких тканин, забезпечення повноцінної декомпресії та потенційно меншого ризику інфекційних ускладнень [173, 174]. Для проблеми спондилолістезу ці роботи демонструють актуальність тканинно-ощадних доступів у сучасній українській вертебрології. Водночас самі автори фактично підводять до висновку, що декомпресія без належного оцінювання ризику сегментарної нестабільності не може розглядатися як універсальне рішення. Таким чином, розвиток ендоскопічних технологій в українських клініках слід розцінювати не як альтернативу стабілізації, а як етап еволюції хірургічного доступу, який має бути інтегрований з реконструктивним компонентом при наявності лістезу й порушення сагітальної геометрії сегмента.

Ще одним принципово важливим напрямом сучасних українських досліджень є аналіз чинників, які визначають надійність фіксації та ризик імплант-асоційованих ускладнень. Результати дослідження О. С. Нехлопочина та співавт. [175] показали, що у пацієнтів, які перенесли стабілізуючі операції на хребті, дефіцит вітаміну D і знижена мінеральна щільність кісткової тканини асоціюються з більшою частотою розхитування гвинтів і міграції міжтілових імплантатів, тоді як післяопераційна корекція дефіциту D3/K2 супроводжується зменшенням частоти таких подій. Хоча дослідження не було зосереджене виключно на спондилолістезі, його результати мають безпосередню цінність для цієї категорії пацієнтів. Особи з дегенеративним поперековим спондилолістезом належать переважно до старших вікових груп, часто мають остеопенічні, остеопоротичні зміни, а отже, питання якості кісткової тканини стає не менш важливим, ніж вибір самого імплантату. Це означає, що сучасне передопераційне планування має

охоплювати не лише морфометрію хребтово-тазового балансу, а й метаболічний стан кістки.

Праці вітчизняних дослідників, присвячені сагітальному та хребтово-тазовому балансу, підкреслюють, що успішність операції на хребті не може оцінюватися лише за фактом декомпресії чи досягнення зрощення. У дослідженні А. О. Мезенцева, Д. Є. Петренка та Д. О. Демченка [176] показано, що навіть при високоградусному спондилолістезі інтраопераційна тракція і транспедикулярна редукція дають змогу поліпшити положення сагітальної вертикальної осі та наблизити показники хребтово-тазового балансу до нормативних значень. Хоча йдеться про істмічний, а не дегенеративний варіант патології, сама логіка роботи є важливою: якість хірургічного результату визначається тим, наскільки операція відновлює опорну функцію сегмента і глобальну біомеханіку хребта. Отже, для пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом доцільно розглядати міжтілову стабілізацію не просто як «антибольову» операцію, а як метод корекції порушеного сагітального профілю, особливо за наявності підвищеного pelvic tilt, зниження sacral slope та збільшення SVA.

Не менш важливим для обґрунтування малоінвазивних підходів є м’язовий компонент дегенеративної патології поперекового відділу хребта. За даними В. О. Радченка та А. Г. Скіданова [177], у пацієнтів зі спондилолістезом, стенозом хребтового каналу та іншими дегенеративними ураженнями поперекового відділу хребта виявляються виражені зміни паравертебральних м’язів — насамперед підвищення частки жирової тканини та зменшення об’єму власне м’язової тканини, особливо в m. multifidus і m. erector spinae. Для хірургії спондилолістезу це має подвійне значення. По-перше, стан паравертебральних м’язів є маркером тривалості і тяжкості дегенеративного процесу. По-друге, додаткова інтраопераційна травматизація вже структурно зміненого м’язового апарату може погіршувати післяопераційне відновлення та функціональний результат. Саме тому переваги малоінвазивних доступів слід оцінювати не лише через обсяг

крововтрати чи косметичний ефект, а й через потенціал збереження залишкової функції паравертебральної мускулатури.

Узагальнюючи дані публікацій українських авторів останнього десятиліття, можна стверджувати, що вітчизняна вертебрологія поступово переходить від моделі «декомпресія плюс фіксація» до моделі багатокомпонентної реконструкції хребтового рухового сегмента. У межах цієї моделі дедалі більшого значення набувають: мінімізація хірургічної травми доступу; відновлення міжтілової висоти та форамінального резерву; зниження навантаження на транспедикулярну систему; оцінювання й корекція сагітального дисбалансу; урахування стану паравертебральних м'язів і метаболічної повноцінності кісткової тканини [171–177]. Разом із тим слід визнати, що українська доказова база щодо саме дегенеративного поперекового спондилолістезу все ще залишається обмеженою малими одноцентровими серіями та недостатньою кількістю робіт із довгостроковим рентгенометричним і функціональним контролем. Саме ця обставина і визначає актуальність подальших досліджень, спрямованих на клінічну верифікацію малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації з дистракційними кейджами як способу, що поєднує декомпресію, редукцію лістезу, реконструкцію сегмента та покращення біомеханічних параметрів сагітального балансу.

Отже, завдяки своїм конструктивним особливостям, які постійно вдосконалюються, кейджі в комбінації з транспедикулярною фіксацією забезпечують динамічну стабілізацію поперекового відділу хребта, що покращує процес зрощення після міжтілового спондилодезу та мінімізує відсоток ускладнень.

Таким чином, у відповідь на збільшення кількості пацієнтів із дегенеративними захворюваннями хребта в практику впроваджуються нові технології, які дають змогу прискорити процес реабілітації пацієнтів, відновлення їхньої працездатності, а отже, найшвидше повернення до звичного способу життя. Спондилодез є перевіреним часом методом

хірургічного лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта для забезпечення його стабілізації, зменшення хронічного болю та подолання неврологічних проявів. Попри те, що традиційні операції заднього відкритого спондилодезу можуть забезпечити широку декомпресію нервових структур і забезпечити стабілізацію сегментів, можуть виникнути деструкції задніх анатомічних структур, що вимагає тривалого періоду відновлення. Водночас треба брати до уваги психологічні, економічні та соціальні витрати післяопераційного періоду.

На сучасному етапі розвитку хірургії хребта, не дивлячись на значне вдосконалення різних методів хірургічного лікування спондилолістезу, відсутня єдина думка щодо обсягу та етапності хірургічного лікування зазначеної патології. Різний підхід до оперативної тактики спондилолістезу призводить до вимушеного виконання повторних операцій, збільшення термінів лікування та досить високого відсотка незадовільних результатів. Тому у процесі визначення найбільш оптимального та безпечного хірургічного доступу, розрахунку рівня та траєкторії корекції хребця, який змістився, з огляду на біомеханіку ураженого хребетно-рухового сегмента, насамперед необхідно виходити з клінічних і біомеханічних особливостей конкретного пацієнта.

Мінімально інвазивні методики зайняли істотне місце в хірургії хребта, особливо під час лікування дегенеративних захворювань поперекового відділу. Нині найкращою методикою визнано мінімально інвазивний трансформамінальний міжтіловий спондилодез із транскутанною транспедикулярною фіксацією. За таких умов застосування кейджів забезпечується надійна стабілізація тіл хребців, гарантується збереження нормальної висоти міжхребцевих дисків, що дає змогу уникнути компресії нервів.

Попри те, що технічно процедура мінімально інвазивного трансформамінального міжтілового спондилодезу більш складна, потребує навчання та наявності спеціалізованого обладнання, продемонстровано її

високу клінічну ефективність, зниження економічних витрат, що робить її наразі перспективним напрямом.

Різноманітність методів та виробів для виконання спондилодезу поперекового відділу хребта свідчить про брак їхньої досконалості та вказує на актуальність розв'язання цього питання.

РОЗДІЛ 2
МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Дизайн дослідження

Дослідження за дизайном клінічне проспективне порівняльне (контрольоване) одноцентрове зрізове інтервенційне з подальшим обсерваційним етапом (рис. 2.1).

В клінічну частину дослідження увійшли пацієнти з дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами, які знаходилися на стаціонарному лікуванні в нейрохірургічному відділенні № 2 та подальшому амбулаторному супроводі у поліклініці КНП ХОР «ОКЛ» у 2017–2024 рр.

Критерії включення:

- діагностований дегенеративний спондилолістез поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами у вигляді синдрому нейрогенної переміжної кульгавості, парезу нижньої кінцівки (3–4 бали), порушення чутливості за сегментарним типом (L4–L5, L5–S1);
- вік (31–66 років);
- оперативне лікування —
  - для *групи основної* — авторська методика малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців з використанням титанових дистракційних кейджів;
  - для *групи порівняння* — традиційна методика малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців;
  - для *групи контролю* — інші способи міжтілового спондилодезу поперекового відділу хребта.

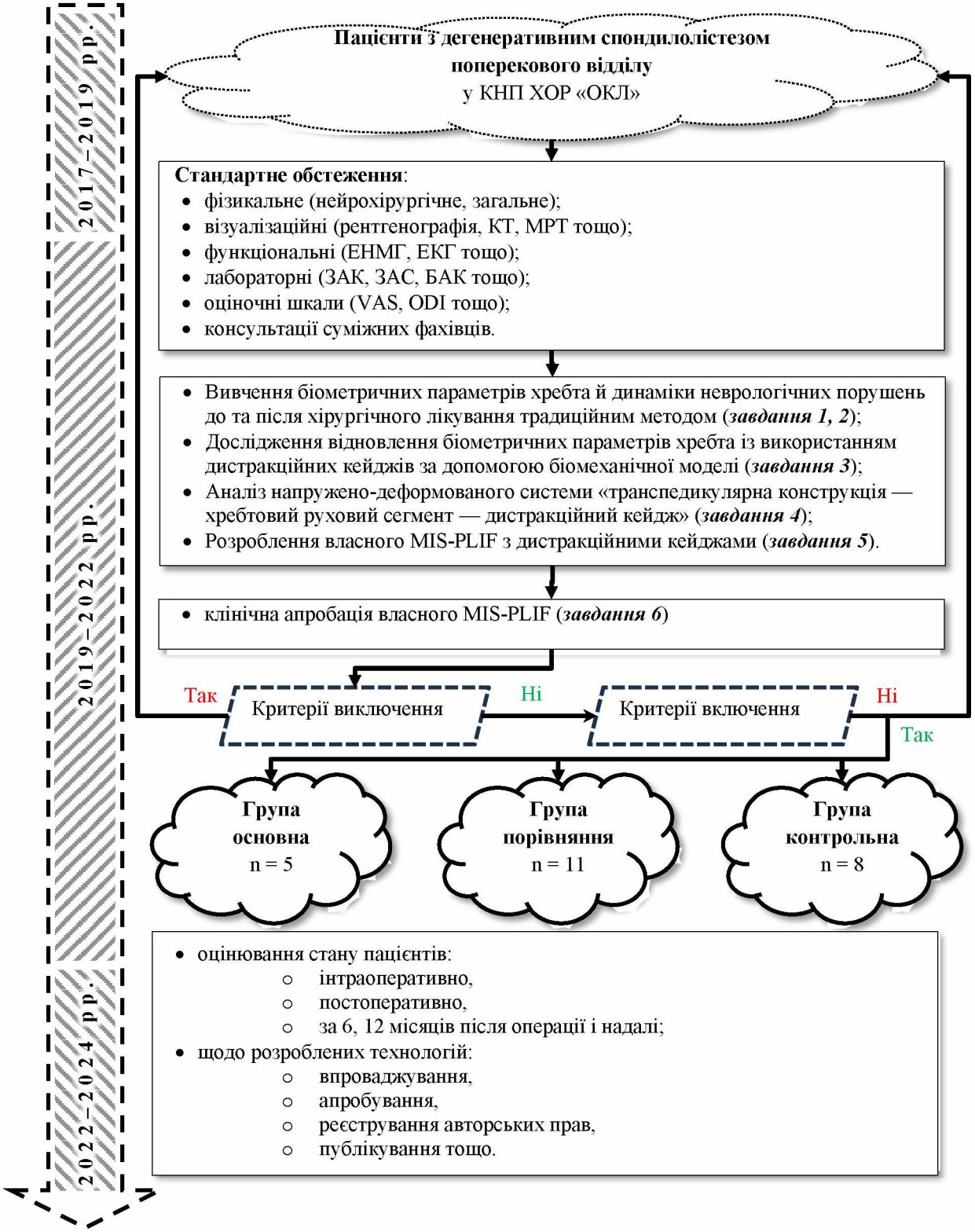


Рис. 2.1. Дизайн дослідження

Примітка. КНП ХОР «ОКЛ» — Комунальне некомерційне підприємство Харківської обласної ради «Обласна клінічна лікарня»; КТ — комп'ютерна томографія (рентгенівська); МРТ — магнітно-резонансна томографія; ЕНМГ — електронейроміографія; ЕКГ — електрокардіографія; ЗАК — загальноклінічний аналіз крові; БАК — біохімічні аналізи

крові; VAS — візуальна аналогова шкала (англ. visual analog scale); ODI — індекс неповносправності Освестрі (англ. Oswestry Disability Index); MIS-PLIF — мінімально інвазивний задній міжтіловий спондилодез поперекового відділу хребта (англ. minimally invasive surgery posterior lumbar interbody fusion).

Критерії виключення:

- вік старше 75 років;
- відсутність неврологічної симптоматики або нейрокомпресійні розлади у вигляді парезу нижньої кінцівки (1–2 бали) або плегії кінцівки;
- виражена соматична та супутня неврологічна патологія, судинна патологія нижніх кінцівок тощо;
- небажання брати участь у дослідженні.

Усі учасники, згодні брати участь у дослідженнях, яким було встановлено діагноз на підставі проведеного рентгенографічного та МР-досліджень поперекового відділу хребта.

Пацієнтам із встановленим на догоспітальному етапі згідно з існуючими протоколами діагнозом дегенеративного спондилолістезу 1–2 ст. проведено - обстеження рентгенологічне та МРТ за стандартними протоколами. Встановлено тип лістезу та його стадію, розраховано об'єм порушення сагітального балансу та супроводжуючі його нейрокомпресійні порушення й біомеханічні порушення. Це в свою чергу дало можливість розрахувати необхідний об'єм інтраопераційної корекції лордозу з метою досягнення оптимальної компенсації біомеханічних порушень.

Після передопераційної підготовки із розрахунком основних біомеханічних показників та об'єму необхідного рівня корекції проведено малоінвазивне оперативне втручання за стандартною методикою з використанням підготовленого інструментарію та міжтілового дистракційного кейджу. На 1-шу добу у післяопераційний період, якщо немає

протипоказань, пацієнтам було проведено контрольний рентгенологічний контроль з метою оцінки об'єму корекції та розрахунку основних біомеханічних показників та об'єму корекції (кута лордозу, ухилу крижі, коливання нахилу тазу, схилу тазу за сагітальною вертикальною віссю).

Проведено неврологічний огляд пацієнта з оцінюванням післяопераційних змін у неврологічному статусі та больового синдрому за шкалою VAS і функціонального стану за шкалою ODI.

На 30-ту добу, за відсутності протипоказань, пацієнтам проведено контрольний МРТ-контроль з метою оцінки формування первинного кісткового дезу та контрольний клініко-неврологічний огляд, оцінювання больового синдрому за VAS та функціонального стану за шкалою ODI.

Систематизацію даних та логіко-статистичний аналіз здійснено за стандартними методиками за критичного рівня p 0,05.

Під час виконання дисертаційного дослідження дотримано принципи біоетики та біомедицини (протокол комісії з етики та біоетики ХНМУ №7 від 10 жовтня 2017).

Вагітні жінки не були об'єктами клінічного дослідження. Не існувало наукових, медичних, етичних та інших причин, щоб не включати учасників за ознакою статі, раси, нацменшин. Представників незахищених груп населення не було залучено до проекту. Не включалися у дослідження люди, які не знають української (російської) мови у зв'язку з уникненням надмірних витрат дослідника. Представники незахищених груп населення не залучалися. Гроші за участь не виплачувалися і не вимагалися. Усі учасники дослідження надали інформовану згоду на участь у ньому письмово. У дослідженні не використовувалися експериментальні лікарські засоби та біологічні матеріали, експериментальні пристрої чи медичні засоби. Ризик від участі в проекті не відрізнявся від ризику при стандартному лікуванні пацієнтів з цією патологією.

Потенційними вигодами від участі в дослідженні стали розробка більш ефективної методики передопераційного планування та інтраопераційної

корекції лістезу, що дозволить досягнути зменшення розвитку періопераційних ускладнень, які можуть розвинутися у пацієнтів (гіпертракції невральних структур, надмірного залучення структур хребтового каналу, недостатньої корекції тощо). Конфіденційність даних забезпечувалася загальноприйнятими деонтологічними нормами і правилами поведінки лікаря та кодуванням даних, які можуть вказати на особу пацієнта. Дані зберігатимуться відповідно термінам збереження медичної документації та терміну виконання науково-дослідної роботи.

2.2. Клінічна характеристика учасників дослідження

Для розв'язання поставлених завдань дисертаційного дослідження було проаналізовано власний клінічний матеріал пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта, який супроводжувався нейрокомпресійними розладами та потребував оперативного лікування.

Клінічна характеристика когорти розглядалася як вихідний аналітичний блок, від якого залежить коректність подальшої інтерпретації результатів оперативного лікування, біомеханічного моделювання та оцінювання ефективності авторської малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів. Здійснено аналіз демографічних, антропометричних, клініко-анамнестичних, неврологічних, функціональних та променево-біомеханічних характеристик учасників дослідження до оперативного втручання.

Усіх пацієнтів було прооперовано з приводу симптомного поперекового спондилолістезу дегенеративного генезу з ознаками радикулопатії, нейрогенної переміжної кульгавості, чутливих порушень та/або моторного дефіциту. У клінічній практиці це означало наявність не лише морфологічного зміщення хребця, але й такого ступеня функціональної дестабілізації рухового сегмента, який визначав потребу в декомпресії та стабілізації. Сама по собі неоднорідність когорти за вираженістю больового синдрому, ступенем

неврологічних порушень та параметрами сагітального профілю була клінічно очікуваною, оскільки відображала реальну практику відбору пацієнтів до різних варіантів міжтілового спондилодезу.

Оцінено демографічні та антропометричні характеристики когорти учасників дослідження на момент включення в нього (табл. *2.2.1*).

Таблиця 2.2.1

Демографічна, антропометрична та клініко-анамнестична характеристика пацієнтів

Показник	Основна, n=5	Порівняння, n=11	Контроль, n=8	Усього, n=24	p
Вік, років	50 [45; 53]	58 [52; 63]	58 [52; 62]	56 [50; 61]	0,05
Індекс маси тіла, кг/м²	31.8 [29.5; 33.1]	32.7 [31.1; 34.0]	31.8 [30.4; 33.5]	32.0 [30.4; 33.8]	0,05
Тривалість клінічних симптомів, міс	24 [18; 30]	24 [19; 33]	27 [20; 38]	24 [18; 36]	0,05
Тривалість консервативного лікування, міс	12 [12; 12]	12 [10; 18]	15 [12; 18]	12 [12; 18]	0,05
VAS до операції, бали	8 [7; 8]	8 [8; 8]	8 [8; 9]	8 [8; 9]	0,05
ODI до операції, бали	46 [44; 50]	48 [45; 50]	49 [46; 50]	48 [44;50]	0,05
Чоловіки, n (%)	1 (20,0%)	3 (27,3%)	2 (25,0%)	6 (25,0%)	0,05

Показник	Основна, n=5	Порівняння, n=11	Контроль, n=8	Усього, n=24	p
Жінки, n (%)	4 (80,0%)	8 (72,7%)	6 (75,0%)	18 (75,0%)	0,05

Примітка. Для неперервних показників наведено Me [LQ; UQ]. Значущих міжгрупових відмінностей за віком, індексом маси тіла, тривалістю симптомів, тривалістю консервативного лікування, а також вихідними значеннями VAS і ODI не встановлено (p>0,05).

Як видно з табл. *2.2.1*, досліджувана когорта характеризувалася типовим для дегенеративного поперекового спондилолістезу демографічним профілем: переважали жінки (75,0 %), а медіана віку всієї вибірки становила 56 років. Поєднання середнього та старшого працездатного віку з виразною жіночою перевагою відображає накопичувальний характер дегенеративного процесу та узгоджується з тим клінічним фактом, що нестабільність на фоні фасетково-дискової дегенерації частіше маніфестує у пацієнтів із уже сформованими змінами хребтово-тазового балансу. Водночас відсутність статистично значущих міжгрупових відмінностей за віком і статтю свідчила, що демографічна основа для порівняння хірургічних технологій була задовільно збалансованою.

Антропометричний профіль також заслуговував на окрему увагу. Медіана BMI в усій когорті становила близько 32 кг/м², що відповідає ожирінню I класу та вказує на додаткове осьове навантаження на попереково-крижовий перехід. Для пацієнтів зі спондилолістезом цей чинник має двоїсте значення. З одного боку, надлишкова маса тіла посилює хронічний больовий синдром, збільшує зсувні сили на рівні ураженого сегмента та може погіршувати компенсаційні можливості м’язово-зв’язкового апарату. З іншого боку, саме в такій когорті особливо цінними стають методики, здатні забезпечити стабільний міжтіловий контакт за мінімальної хірургічної травматизації. Відсутність міжгрупових відмінностей за BMI знижує ризик

того, що післяопераційні розбіжності у розділі 3 будуть зумовлені суто антропометричним чинником.

Тривалість клінічних симптомів була достатньо великою в усіх групах: медіанно 24 місяці, при цьому інтерквартильний інтервал охоплював хворих як з відносно швидким прогресуванням клініки, так і з багаторічним хронічним перебігом. Тривалість консервативного лікування становила 12 [12; 18] місяців, тобто рішення про операцію у більшості випадків приймали не на ранньому етапі, а після достатньо тривалого періоду спостереження, медикаментозної терапії, реабілітації та оцінки стабільності симптомів. Це важливо з методологічної точки зору: когорта не містила випадкових «ранніх» операцій, а формувалася з пацієнтів, у яких хірургічне втручання було клінічно вмотивованим.

Вихідні значення за шкалами VAS і ODI не відрізнялися статистично між групами. Медіана VAS до операції дорівнювала 8 балам, а ODI — 48 балам, що свідчило про поєднання виразного больового синдрому з помірно тяжким або тяжким функціональним обмеженням. У практичному плані це означало, що всі три групи на момент операції перебували в порівнювано несприятливому функціональному стані. Відтак подальший аналіз регресу болю та інвалідизації мав проводитися на тлі подібного вихідного тягаря хвороби, що підвищувало валідність міжгрупових висновків.

У загальній когорті домінував рівень L4–L5 (66,7 %), тоді як ураження L5–S1 становило 33,3 %. Серед жінок L4–L5 траплявся частіше, тоді як серед чоловіків співвідношення між рівнями було менш контрастним (табл. 2.2).

Демографічна, антропометрична та клініко-анамнестична характеристика пацієнтів

Показник	Основна, n=5	Порівняння, n=11	Контроль, n=8	Усього, n=24	p
Вік, років	50 [45; 53]	58 [52; 63]	58 [52; 62]	56 [50; 61]	0,05
Індекс маси тіла, кг/м²	31.8 [29.5; 33.1]	32.7 [31.1; 34.0]	31.8 [30.4; 33.5]	32.0 [30.4; 33.8]	0,05
Тривалість клінічних симптомів, міс	24 [18; 30]	24 [19; 33]	27 [20; 38]	24 [18; 36]	0,05
Тривалість консервативного лікування, міс	12 [12; 12]	12 [10; 18]	15 [12; 18]	12 [12; 18]	0,05
VAS до операції, бали	8 [7; 8]	8 [8; 8]	8 [8; 9]	8 [8; 9]	0,05
ODI до операції, бали	46 [44; 50]	48 [45; 50]	49 [46; 50]	48 [44;50]	0,05
Чоловіки, n (%)	1 (20,0%)	3 (27,3%)	2 (25,0%)	6 (25,0%)	0,05
Жінки, n (%)	4 (80,0%)	8 (72,7%)	6 (75,0%)	18 (75,0%)	0,05

Примітка. Для неперервних показників наведено Me [LQ; UQ]. Значущих міжгрупових відмінностей за віком, індексом маси тіла, тривалістю симптомів, тривалістю консервативного лікування, а також вихідними значеннями VAS і ODI не встановлено ($p>0,05$).

У дослідженні переважали I та II ступені спондилолістезу. III ступінь

зареєстровано лише у двох пацієнтів, обидва випадки локалізувалися на рівні L5–S1, що відображало тяжчий варіант осьово-зсувної деформації цього сегмента (табл. *2.2.2*).

Таблиця 2.2.2

Розподіл пацієнтів за ступенем Meyerding та рівнем ураження

Ступінь лістезу	L4–L5	L5–S1	Усього, абс. (%)
1 ступінь	13	0	13 (54,2%)
2 ступінь	3	6	9 (37,5%)
3 ступінь	0	2	2 (8,3%)
Усього	16	8	24 (100,0%)

Примітка. Наведено описовий розподіл абсолютних і відносних частот без інферентної перевірки. Найчастіше спондилолістез локалізувався на рівні L4–L5 і відповідав I ступеню за Meyerding

Топографічна структура когорти показала очікуване домінування рівня L4–L5. Саме цей сегмент у більшості клінічних серій розглядають як «типову локалізацію» дегенеративного спондилолістезу, оскільки він поєднує значний обсяг рухів, високе навантаження та схильність фасеткових суглобів до поступової сагіталізації. У нашому матеріалі L4–L5 був ураженим у 16 із 24 пацієнтів (66,7 %), тоді як L5–S1 — у 8 (33,3 %). Таке співвідношення має не тільки описове, а й методологічне значення: воно вказує, що одержані в подальшому результати значною мірою відображають ефективність лікування найбільш поширеного варіанта дегенеративного лістезу.

Цікавим був і статево-рівневий розподіл. У жінок перевага L4–L5 була виразною, тоді як у чоловіків частка L5–S1 була відносно більшою. Незважаючи на невелику чисельність чоловіків у вибірці, така тенденція заслуговує на увагу, оскільки може відображати різні механічні сценарії формування захворювання: у жінок — переважно дегенеративно-фасетковий,

а у частини чоловіків — комбінацію дегенеративних і хронічно навантажувальних чинників на попереково-крижовому переході. Для клінічної практики це важливо, бо рівень ураження визначає не лише анатомічний доступ, а й характер корекції сегментарного лордозу, вектор декомпресії та вимоги до міжтілового імплантату.

Переважання I та II ступенів Meyerding відповідало загальній логіці дослідження, спрямованого передусім на пацієнтів із клінічно значущими, але технічно коригованими формами дегенеративного спондилолістезу. Перший ступінь становив 54,2 %, другий — 37,5 %, третій — 8,3 %. Той факт, що III ступінь траплявся лише на рівні L5–S1, узгоджується з вищими зсувними навантаженнями цього переходу та з відносно менш сприятливими стартовими умовами для стабілізації. У практичному вимірі це означало, що контрольна група, де концентрація тяжчих топографо-ступеневих комбінацій була дещо більшою, могла мати вищий ризик вихідного дисбалансу та складнішої інтраопераційної корекції.

Таким чином, уже на етапі базової топографічної характеристики вимальовувався важливий висновок: досліджувана когорта не була штучно «ідеалізованою», а репрезентувала клінічно реальний спектр пацієнтів, у яких хірургічне лікування потребувало як декомпресійного, так і стабілізувально-коригувального компонента. Це надалі дозволило розглядати результати авторської методики не як ефект на вибірці з мінімальною складністю, а як результат її застосування в умовах звичайної нейрохірургічної практики.

Щодо вихідного клініко-неврологічного профілю, усі пацієнти мали больовий синдром, який клінічно відповідав поперековому спондилолістезу з нейрокомпресійним компонентом (табл. 2.2.3).

Таблиця 2.2.3

Основні клінічні та неврологічні прояви спондилолістезу до оперативного лікування

Показник	Основна, n=5	Порівняння, n=11	Контроль, n=8	Усього, n=24	p
Нейрогенна переміжна кульгавість, n (%)	4 (80,0%)	10 (90,9%)	7 (87,5%)	21 (87,5%)	1,000
Радикулярний больовий синдром, n (%)	5 (100,0%)	11 (100,0%)	8 (100,0%)	24 (100,0%)	1,000
Сегментарний чутливий дефіцит, n (%)	4 (80,0%)	10 (90,9%)	7 (87,5%)	21 (87,5%)	1,000
Периферичний парез (MRC 3–4), n (%)	3 (60,0%)	4 (36,4%)	4 (50,0%)	11 (45,8%)	0,664

Примітка. Для частини симптомів p=1,000 відображає не відсутність клінічної значущості, а подібність їх частотного профілю в невеликій вибірці.

Вихідний клініко-неврологічний профіль когорти відображав характерний для симптомного дегенеративного спондилолістезу синдромокомплекс. У всіх хворих відзначено больовий синдром у попереково-крижовій ділянці, при цьому в 100 % випадків він поєднувався з тим чи іншим варіантом корінцевої іритації або компресії. Радикулярний компонент був клінічно провідним, оскільки саме він разом із прогресуючим функціональним обмеженням найчастіше спонукав пацієнтів погоджуватися на оперативне лікування після виснаження можливостей консервативної терапії. Така

структура симптомів добре узгоджується з патофізіологією захворювання: поєднання лістезу, стенозу латеральних рецесусів, деформації міжхребцевих отворів і гіпертрофії фасетково-зв'язкового комплексу неминуче формує змішаний механізм болю.

Нейрогенна переміжна кульгавість спостерігалася у 87,5 % усієї когорти. Це надзвичайно важливий клінічний маркер, оскільки він свідчить не лише про наявність стенозу, а й про його функціональну значущість, тобто про погіршення толерантності до вертикального навантаження та ходьби. У пацієнтів з таким синдромом рівень повсякденної активності зазвичай знижується диспропорційно сильніше, ніж можна було б очікувати лише на підставі рентгенологічної картини. Саме тому для оцінки ефективності операції в цій когорті було принципово важливо аналізувати не тільки технічні параметри редукції, але й динаміку функціональних шкал.

Сегментарний чутливий дефіцит був наявний у 87,5 % пацієнтів, а периферичний парез за шкалою MRC 3–4 — у 45,8 %. Такий розподіл клінічно логічний: сенсорні порушення, як правило, з'являються раніше та трапляються частіше, тоді як руховий дефіцит свідчить про більш тривалу або інтенсивну компресію нервового корінця. Включення до дослідження пацієнтів саме з MRC 3–4, а не з плегією, дозволило зосередитися на хворих, у яких зберігався реалістичний потенціал післяопераційного відновлення та була можливість оцінити, наскільки різні методи стабілізації впливають на регрес неврологічного дефіциту.

Міжгрупових статистично значущих відмінностей за частотою нейрогенної кульгавості, радикулопатії, чутливого дефіциту та парезу не виявлено. Це свідчило, що за безпосередньо клінічним профілем нейрокомпресійних розладів групи були зіставними. Отже, при аналізі післяопераційних неврологічних результатів у наступних розділах було підставно виходити з того, що стартова клінічна тяжкість не створювала очевидного системного перекосу на користь жодної з груп.

Функціональний стан пацієнтів оцінювали за двома

взаємодоповнювальними інструментами: візуально-аналоговою шкалою болю (VAS) та індексом неповносправності Освестрі (ODI). Використання саме цієї комбінації шкал є методологічно виправданим, оскільки VAS відображає інтенсивність суб'єктивного больового переживання, тоді як ODI інтегрує больовий компонент із впливом захворювання на самообслуговування, ходьбу, сидіння, стояння, сон, соціальну активність і професійне функціонування. Для пацієнтів зі спондилолістезом це принципово важливо: однаковий рівень болю може супроводжуватися різною мірою інвалідизації залежно від ступеня стенозу, нестабільності сегмента та здатності хворого адаптуватися до обмежень.

Медіанний рівень болю перед операцією дорівнював 8 балам. Це дозволяє розцінювати больовий синдром у більшості пацієнтів як виразний або тяжкий. Медіана ODI становила 48 балів, тобто функціональні обмеження досягали щонайменше помірно тяжкого ступеня та наближалися до тяжкої неповносправності. Особливістю цієї когорти було те, що висока інтенсивність болю поєднувалася з тривалим анамнезом симптомів, а отже, не була епізодичною. Це підкреслює хронічний характер захворювання та підтверджує, що хірургія виконувалася не з приводу гострої самообмежувальної ситуації, а з приводу стійкого патологічного стану, який суттєво порушував якість життя.

Відсутність статистично значущих міжгрупових розбіжностей за VAS і ODI є одним із найбільш вагомих аргументів на користь коректності подальшого порівняння результатів лікування. Навіть якщо окремі променеві параметри між групами відрізнялися, пацієнти сприймали свою хворобу як приблизно однаково тяжку, а повсякденне функціонування в усіх групах було істотно знижене. Для дослідницької логіки це означає, що аналіз ефективності авторського способу може ґрунтуватися не лише на рентгенологічних критеріях, а й на реально порівнюваному функціональному тягарі захворювання.

Аналіз вихідних променево-біомеханічних показників дозволив перейти

від загальноклінічного опису до розуміння механічної сутності захворювання в кожній групі (табл. 2.2.4).

Таблиця 2.2.4

Вихідні променево-біомеханічні характеристики пацієнтів до оперативного втручання

Показник	Основна, n=5	Порівняння, n=11	Контроль, n=8	Усього, n=24	p
Pelvic incidence (PI), °	50 [50; 52]	52 [50; 54]	56 [55; 58]	52 [50; 55]	0,004
Pelvic tilt (PT), °	19 [19; 20]	24 [22; 26]	28 [25; 30]	24 [21; 27]	0,001
Sacral slope (SS), °	31 [31; 32]	28 [28; 28]	29 [29; 30]	29 [28; 30]	<0,001
Sagittal vertical axis (SVA), см	10 [9; 11]	10 [10; 12]	10 [10; 12]	10 [9; 12]	0,800
Відсоток зміщення до операції, %	20 [20; 25]	18 [14; 24]	24 [20; 26]	20 [16; 25]	0,320
Висота міжхребцевого простору до операції, мм	5.0 [4.9; 5.2]	4.8 [4.5; 5.1]	4.7 [4.4; 4.8]	4.8 [4.6; 5.0]	0,097
Висота форамінального отвору до операції, мм	14 [14; 15]	13 [13; 14]	12 [12; 13]	13 [12; 14]	0,003
Загальний поперековий	42 [41; 44]	42 [40; 44]	42 [40; 43]	42 [40; 44]	0,920

Показник	Основна, n=5	Порівняння, n=11	Контроль, n=8	Усього, n=24	p
лордоз (LL), °					
Сегментарний лордоз на рівні лістезу (SL), °	10 [9; 10]	9 [8; 10]	9 [8; 10]	9 [8; 10]	0,703
Сагітальний розмір хребтового каналу, мм	9.1 [9.0; 9.5]	8.9 [8.6; 9.2]	8.6 [8.4; 8.9]	8.9 [8.6; 9.2]	0,079

Примітка. Для міжгрупового порівняння неперервних показників застосовано критерій Краскела–Уолліса. Значущі відмінності встановлено для PI, PT, SS і висоти форамінального отвору, тоді як SVA, LL, SL, дискова висота та ступінь зміщення були зіставними.

Звертає на себе широкий діапазон коливань p-рівня, від дуже високої статистичної вірогідності ($p<0,001$) до її відсутності ($p>0,05$). Статистично значущі міжгрупові відмінності виявлено для PI, PT, SS та висоти форамінального отвору. Це свідчить, що групи були добре зіставними за клінічно-функціональним тягарем хвороби, але не абсолютно тотожними за окремими спінотазовими параметрами та ступенем структурної деформації.

В усій когорті медіана SVA становила 10 см, що вказувало на наявність сагітального дисбалансу помірного ступеня. Медіанний відсоток зміщення до операції дорівнював 20 %, а медіанний сагітальний розмір хребтового каналу на рівні зацікавленого сегмента — 8,9 мм, тобто в більшості пацієнтів морфологічна дестабілізація поєднувалася зі значущим стенозуючим компонентом. Ця комбінація є особливо несприятливою, оскільки саме вона формує замкнене коло: нестабільність посилює стеноз, а стеноз обмежує адаптаційні можливості рухового сегмента.

Особливої уваги заслуговували показники PI, PT і SS. У контрольній

групі вони були статистично гіршими: PI та PT були вищими, тоді як SS відрізнявся від основної та групи порівняння, що вказувало на менш сприятливу конфігурацію хребтово-тазового балансу. Клінічно це означало, що пацієнти контрольної групи частіше надходили на операцію вже з більш вираженим компенсаторним ретроверсійним положенням таза та менш раціональним розподілом навантаження між передньою і задньою колонами. Інакше кажучи, саме в контрольній групі захворювання частіше існувало не лише як локальна проблема одного сегмента, а як елемент системного порушення сагітальної рівноваги.

Висота форамінального отвору до операції також була найменшою в контрольній групі. Це має безпосереднє клінічне значення, оскільки зменшення форамінального простору є одним із ключових субстратів корінцевого болю, парестезій та моторного дефіциту. На відміну від загального поперекового лордозу, який у дослідженні між групами майже не різнився, саме локальні просторові параметри — отвір, висота диска, сегментарний зсув та взаємовідношення таза й крижів — визначали біомеханічну своєрідність вихідного стану. Це ще раз підкреслює, що при спондилолістезі клінічна тяжкість не завжди лінійно корелює з одним глобальним кутом, а формується через сукупність локальних деформацій і компенсаторних перебудов.

Показники LL та SL у вихідному стані статистично значущо не відрізнялися між групами. Це важлива обставина, оскільки саме ці кути надалі використовуватимуться для оцінки відновлювального потенціалу дистракційного кейджа щодо сегментарної корекції. Відсутність значущої стартової різниці за LL і SL означає, що групи мали порівнюваний резерв для лордозуючого ефекту, а отже, потенційні переваги авторської методики слід трактувати не як наслідок випадково «кращого» вихідного лордозу, а як результат її технічних можливостей.

Окремо слід зазначити, що в нерандомізованому хірургічному дослідженні наявність певних вихідних рентгенометричних розбіжностей не є

методологічним дефектом сама по собі. Навпаки, вона часто відображає реальну клінічну маршрутизацію, коли вибір конкретної технології залежить від вираженості деформації, анатомії доступу та технічної доцільності редукції. У нашій когорті це проявилося тим, що контрольна група мала більш напружений базовий сагітальний профіль, тоді як основна та група порівняння були ближчими між собою за локальною анатомією. Саме тому подальше обговорення результатів має враховувати не лише формальне p-значення, а й структурний клінічний контекст.

З позиції дизайну дослідження найважливішим є те, що клінічні групи виявилися достатньо зіставними за основними демографічними, антропометричними, анамнестичними, больовими та функціональними показниками, але не абсолютно ідентичними за всіма променево-біомеханічними характеристиками. Така конфігурація вибірки є методологічно прийнятною для хірургічного клінічного дослідження реальної практики. Вона дозволяє оцінювати переваги технології не в штучно стандартизованих умовах, а в ситуації, максимально наближеній до повсякденної роботи нейрохірурга.

Якщо в подальшому авторська методика продемонструє нижчу крововтрату, меншу травматичність доступу, кращу редукцію лістезу, виразніший регрес болю або сприятливіший профіль ускладнень, то ці ефекти навряд чи можна буде пояснити простішим стартовим клінічним станом пацієнтів основної групи. Навпаки, оскільки за частиною показників контрольна група мала більш несприятливий спінотазовий профіль, результати порівняння слід трактувати як консервативну оцінку ефективності, а не як штучне завищення переваг нової технології.

Побудована клінічна характеристика створює логічний місток і показує, які саме вихідні проблеми потребували хірургічного вирішення: локальний і системний сагітальний дисбаланс, стенозуючий компонент, втрата висоти диска, компресія корінців, хронічний інтенсивний біль та зниження

функціонального статусу. Відповідно, успіх оперативного втручання в цій роботі має розумітися не лише як технічне встановлення імплантату, а як усунення всього комплексу вихідних порушень, описаних у підрозділі 2.2.

Застосований підхід до клінічної характеристики когорти має не лише описове, але й практичне значення. Він забезпечує прозору статистичну рамку для інтерпретації подальших розрахунків, дозволяє структуровано представити матеріал та мінімізує ризик втрати клінічного змісту.

Узагальнюючи наведені дані, типовий пацієнт у даному дослідженні — це жінка середнього або старшого працездатного віку з надлишковою масою тіла або ожирінням I класу, симптомним дегенеративним спондилолістезом на рівні L4–L5, тривалим анамнезом болю в попереку та нижній кінцівці, нейрогенною переміжною кульгавістю, помірно тяжкою чи тяжкою функціональною дезадаптацією та ознаками локального й загального сагітального дисбалансу. Такий клінічний портрет не є випадковим. Він у концентрованому вигляді відображає основні закономірності природного перебігу дегенеративного лістезу, коли механічна нестабільність хребтового сегмента поступово переходить із морфологічної знахідки у синдром клінічно значущої неповносправності.

У чоловіків, хоча їх було менше, перебіг захворювання не був легшим. В окремих випадках відзначалася більша частка ураження на рівні L5–S1 та більш виражений зсувний компонент. Це може свідчити, що для чоловічої частини когорти більше значення мали хронічні вертикальні й зсувні навантаження, тоді як для жінок — поєднання дегенеративних і спінотазових факторів. З огляду на невеликий розмір вибірки такі спостереження не слід абсолютизувати, але вони додають клінічної глибини до опису когорти й можуть бути використані у розділі обговорення як гіпотеза щодо механізмів формування різних фенотипів спондилолістезу.

Найбільш принциповим є те, що жодна з груп не була клінічно «легкою». Зокрема, у пацієнтів основної групи доопераційний стан не можна було розцінювати як мінімально симптомний. Біль за VAS залишався високим,

ODI — клінічно значущим, а частота нейрогенної кульгавості, сенсорного дефіциту та парезів була достатньою для того, щоб вважати операцію виправданою та необхідною. Саме ця обставина робить подальший аналіз ефективності нової технології переконливішим: мова йде не про косметичне поліпшення стану легких випадків, а про лікування пацієнтів із реально вираженим нейроортопедичним дефіцитом.

Отже, клінічна характеристика учасників дослідження підтвердила, що сформована когорта є репрезентативною для практики нейрохірургічного лікування дегенеративного поперекового спондилолістезу з нейрокомпресійними розладами. Вона поєднує достатню однорідність за ключовими клінічними показниками з природною неоднорідністю за окремими біомеханічними параметрами, яка відображає реальні клінічні сценарії. Саме на такій когорті є доцільним оцінювати можливості малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів.

Попри загальну порівнюваність груп, детальніший аналіз виявив певні групоспецифічні клінічні акценти, які мають бути враховані при інтерпретації результатів лікування. Власне ці акценти й відображають реальну логіку клінічного відбору: пацієнти надходять до операції не як статистично «однакові» об'єкти, а як носії певних фенотипів захворювання, що по-різному впливають на вибір доступу, обсяг декомпресії, необхідність редукції та очікувану післяопераційну динаміку.

Основна група, в якій застосовано авторський спосіб МІЗМТСХ із дистракційними кейджами, характеризувалася відносно молодшим віком, достатньо високим вихідним больовим синдромом та наявністю значущого неврологічного компонента. Водночас у цих пацієнтів локальна анатомія сегмента була технічно придатною для реалізації основної ідеї методу — поєднання малоінвазивного доступу з одномоментною дистракцією та міжтіловою редукцією. Саме тому основна група може розглядатися як клінічно складна, але технічно релевантна для апробації нової технології. Тут

не було пацієнтів із «легкою» симптоматикою; навпаки, виразність болю, частота парезів і наявність нейрогенної кульгавості робили необхідність операції цілком очевидною.

Група порівняння, де застосовано стандартний спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації, була чисельно найбільшою і в цьому сенсі відображала «рутинний» клінічний контингент пацієнтів, для яких малоінвазивний підхід уже використовувався без авторської модифікації імплантату. Саме ця група є найціннішою для прямого методичного порівняння, оскільки дозволяє оцінити, наскільки переваги авторської технології визначаються не просто малоінвазивністю, а саме можливістю керованої дистракції in situ. У статистичному відношенні це група з найбільш «стійким» профілем — без крайніх вікових і антропометричних відхилень, але з достатньою варіативністю симптомів, що робить її зручною точкою відліку для клінічних зіставлень.

Контрольна група об'єднувала пацієнтів, у яких використовували інші способи міжтілового спондилодезу, переважно більш традиційні або більш травматичні за доступом. Саме в цій групі були виразнішими порушення спінотазового профілю, меншою — вихідна висота форамінального простору, а частка III ступеня лістезу відносно більшою. Це не знижує цінності контрольної групи, а навпаки — допомагає зрозуміти, в якому клінічному контексті відкриті або альтернативні методи стабілізації залишалися обґрунтованими. У практичному сенсі вона репрезентувала хворих зі складнішим біомеханічним профілем, коли вибір технології визначався не лише прагненням до мінімальної інвазивності, а й необхідністю більш широкої корекції або забезпечення достатнього операційного простору.

Інтегральний аналіз групових профілів показує, що дослідження відтворює складну клінічну модель: авторська технологія апробувалася в межах малоінвазивної хірургії, стандартний MIS-підхід виконував роль найближчого технологічного компаратора, а контрольна група відображала межі й клінічні сценарії, в яких застосовувалися інші методи міжтілової

стабілізації (табл. 2.2.5).

Таблиця 2.2.5

Інтегральний клінічний профіль досліджуваних груп

Критерій	Основна група	Група порівняння	Контрольна група
Провідна клінічна роль у дослідженні	Апробація авторської технології	Порівняння зі стандартним MIS-підходом	Порівняння з альтернативними/більш інвазивними технологіями
Типовий вихідний вік	Відносно молодший	Середній для когорти	Середній/старший у межах когорти
Провідний рівень ураження	L4–L5 із окремими L5–S1	Переважно L4–L5	L4–L5 та L5–S1 з більшою часткою складних випадків
Ступінь структурної деформації	I–II ступені, технічно кориговані	Переважно I–II ступені	Від I до III ступеня, із більшим біомеханічним навантаженням
Неврологічний фенотип	Біль + компресійний компонент, у частини — парези	Типовий радикуло-стенотичний профіль	Більший внесок стенозу та локального дисбалансу
Променево-біомеханічний профіль	Сприятливий для реалізації дистракції in situ	Проміжний, збалансований	Менш сприятливий, з гіршими тазово-хребтовими параметрами

Критерій	Основна група	Група порівняння	Контрольна група
Очікуване хірургічне завдання	Мінімальна травматизація + редукція + дистракція	Мінімальна травматизація + стабілізація	Декомпресія + стабілізація в умовах складнішої анатомії

Примітка. Основна група була найпридатнішою для апробації реконструктивної малоінвазивної технології, тоді як контроль відображав складніші біомеханічні умови.

Така конструкція є більш змістовною, ніж умовна рандомізація, оскільки вона дозволяє показати не лише факт переваги чи відсутності переваги, а й те, для яких клінічних фенотипів запропонована методика є найбільш доцільною.

У клінічних хірургічних дослідженнях проблема вихідної неоднорідності вибірки часто розглядається лише як джерело потенційного зміщення. Однак для нейрохірургії хребта це лише частина питання. Неоднорідність може бути також носієм цінної інформації про реальні межі застосовності технології. У нашому дослідженні така неоднорідність насамперед стосувалася спінотазових параметрів і локальної анатомії, тоді як больовий та функціональний тягар хвороби між групами залишався подібним. Отже, йдеться не про змішування клінічно «легких» і «тяжких» пацієнтів у довільний спосіб, а про відмінності саме в механічному субстраті захворювання.

З практичної точки зору це має такий важливий наслідок. Якщо одна технологія забезпечує кращий результат при подібному вихідному рівні болю та інвалідизації, але на тлі не повністю тотожних біомеханічних умов, то інтерпретація цієї переваги повинна бути більш нюансованою. Авторська методика з дистракційним кейджем має розглядатися не просто як «краща» або «гірша» за стандартну, а як така, що особливо вигідна там, де потрібно

одночасно мінімізувати доступ і відновити локальний простір диска та форамінальний резерв.

Певна неоднорідність також відображала накопичення клінічного досвіду в часі. Пацієнти контрольної групи частіше належали до періоду, коли альтернативні методи стабілізації використовувалися ширше, тоді як основна група формувалася в контексті вже розробленої й технічно відпрацьованої авторської концепції. Це не означає часової упередженості, але вказує на еволюцію хірургічної стратегії в самій дослідницькій програмі: від аналізу традиційного досвіду та біомеханічного моделювання — до клінічної апробації удосконаленого інструментального рішення.

З огляду на це продемонстровано, що дослідження не є «відривом» від клінічної практики. Навпаки, кожна характеристика когорти має безпосереднє операційне значення: вік і BMI впливають на періопераційний ризик; рівень лістезу — на доступ і вектор декомпресії; ступінь зміщення — на обсяг редукції; спінотазові кути — на бажану конфігурацію реконструкції; вихідний ODI — на клінічно значущий поріг покращення.

З погляду сучасної вертебронейрохірургії сформована в роботі когорта є типовою для тих пацієнтів, у яких питання про операцію постає не як альтернатива короткотривалому медикаментозному лікуванню, а як етап подолання стійкого функціонального дефіциту. Біль, нейрогенна кульгавість, тривалий анамнез, морфологічно підтверджений лістез і ознаки локального спінотазового неблагополуччя — це саме той клінічний контекст, у якому сучасна хірургія прагне поєднати радикальність декомпресії зі щадністю доступу. У цьому сенсі дослідження повністю відповідає актуальній тенденції до мінімізації ятрогенної травми при збереженні або підвищенні якості редукції та спондилодезу.

Авторський метод із використанням дистракційного кейджа логічно вписується саме в таку парадигму. Його перевага полягає не лише в тому, що він належить до малоінвазивних технологій, а в тому, що він потенційно вирішує одне з найскладніших протиріч сучасної MIS-хірургії: як через

обмежений доступ досягти достатнього відновлення міжтілової висоти, непрямої декомпресії та часткової редукції лістезу без надмірної тракції невральних структур. Саме тому клінічна характеристика пацієнтів має читатися не ізольовано, а як передмова до оцінки того, чи спроможна така технологія реалізувати свою теоретичну перевагу в реальному клінічному матеріалі.

Когорта складається з пацієнтів, для яких проблематика малоінвазивної міжтілової стабілізації з дистракцією є справді актуальною. Це пацієнти не з мінімальними морфологічними змінами, а з клінічно вагомим лістезом, нейрокомпресійними розладами, функціональним дефіцитом та потребою в корекції локальної біомеханіки. Отже, саме на такій когорті оцінювання авторської технології є науково виправданим і практично значущим.

Пацієнтська вибірка є моделлю клінічної реальності. У клінічній характеристиці учасників дослідження розкрито патогенетичну логіку їхнього включення. Переважає дегенеративний фенотип із домінуванням рівня L4–L5; більшість пацієнтів мають комбінацію стенозу й сегментарної нестабільності; майже у половини є моторний дефіцит; показники VAS і ODI відображають значний вплив хвороби на повсякденне життя; спінотазові параметри вказують на системний, а не суто локальний характер біомеханічних змін. Тобто, у дослідженні оцінено не суто технічний прийом, а спосіб лікування складного нейроортопедичного стану.

Не менш принциповим є і те, що вихідний профіль когорти дозволяє обґрунтувати сам вибір кінцевих точок у наступних розділах роботи. Якщо у вихідному стані домінують не тільки біль, але й кульгавість, чутливі та моторні порушення, то оцінка результатів лікування повинна включати не лише анатомічний контроль імплантатів, а й динаміку VAS, ODI, відновлення міжтілової висоти, форамінального резерву, сагітального профілю та неврологічного статусу.

Рівень ураження при поперековому спондилолістезі не є суто анатомічною деталлю. Він визначає весь клінічний сценарій захворювання:

характер навантаження, напрямок зсувних сил, тип неврологічного дефіциту, обсяг декомпресії, складність міжтілової реконструкції та навіть очікуваний функціональний результат. У нашій когорті переважання L4–L5 над L5–S1 було не лише статистичним фактом, а й патогенетично вмотивованим явищем. Сегмент L4–L5 є найбільш рухомим у нижньому поперековому відділі та одночасно не має такого вираженого стабілізуючого впливу клубово-поперекових зв'язок, який характерний для L5. Саме тому дегенеративний каскад з дисковою дегідратацією, фасеточною артропатією та зв'язковою гіпертрофією тут частіше переходить у клінічно маніфестний лістез.

Для пацієнтів із ураженням L4–L5 типовою була комбінація радикулопатії з нейрогенною кульгавістю на тлі виразної втомлюваності під час стояння та ходьби. У клінічній практиці це важливо, тому що саме такий патерн симптомів часто недооцінюють, трактуючи його лише як наслідок стенозу. Насправді ж при L4–L5 дегенеративний лістез виконує роль «механічного підсилювача» стенозу: нестабільність рухового сегмента, коливання висоти диска та вторинна деформація фасетково-зв'язкового комплексу створюють динамічний компонент компресії. Отже, для такої підгрупи декомпресія без стабілізації була б патогенетично неповною, а стабілізація без відновлення локальної геометрії — недостатньо ефективною.

Сегмент L5–S1, представлений у третини спостережень, мав інший клініко-біомеханічний відтінок. Попереково-крижовий перехід піддається значним зсувним навантаженням, а його корекція часто потребує більш делікатного балансу між редукцією та збереженням безпеки невральних структур. Саме на цьому рівні в нашій когорті концентрувалися випадки III ступеня лістезу. Відтак навіть при порівнюваних вихідних значеннях VAS та ODI L5–S1 слід розглядати як анатомічно складніший сегмент для інструментальної стабілізації. Ця обставина має пряме значення для інтерпретації ефективності дистракційного кейджа: його потенційна користь особливо вагома там, де потрібно водночас створити міжтілову опору, відновити висоту диска й зменшити тракцію нервових структур у вузькому

операційному коридорі.

Таким чином, рівнева структура когорти фактично відображала два патогенетичних полюси захворювання. Перший — типовий дегенеративний L4–L5-варіант із переважанням стенотично-нестабільного механізму. Другий — L5–S1-варіант із відносно більш вираженим зсувним компонентом і потенційно складнішою корекцією. Наявність обох фенотипів у межах однієї когорти підвищувала наукову цінність дослідження, оскільки дозволяла оцінювати авторську методику не лише в «ідеальному» типовому випадку, а й у більш напружених анатомічних умовах.

Певне значення для вибору хірургічної тактики мали вихідні спінотазові параметри. Вихідні параметри PI, PT, SS, SVA, LL та SL у межах даного дослідження не слід сприймати як суто рентгенометричний супровід. Вони були принциповими змінними, які формували логіку передопераційного планування. Pelvic incidence (PI), будучи анатомічно детермінованою величиною, задає базову потребу пацієнта в поперековому лордозі; pelvic tilt (PT) відображає ступінь тазової ретроверсії як компенсаторного механізму; sacral slope (SS) характеризує положення крижів і пов'язаний з конфігурацією нижньопоперекового відділу; SVA є інтегральним показником глобального сагітального балансу. Для хірурга ці параметри означають, що операція при спондилолістезі повинна бути спрямована не лише на усунення компресії, але й на відновлення настільки раціональної геометрії сегмента, наскільки це можливо в конкретній клінічній ситуації.

У нашій когорті контрольна група мала гірші вихідні показники PT та PI, а також меншу висоту форамінального отвору. Це означало, що частина пацієнтів надходила на операцію вже в стані виснаження компенсаторних можливостей таза. Іншими словами, для підтримання вертикальної пози їм доводилося збільшувати ретроверсію таза, що саме по собі є енергетично невигідним і клінічно проявляється швидкою втомою під час стояння та ходьби. Така вихідна ситуація погіршує функціональний стан навіть за відносно подібного рівня локального болю. Саме тому оцінка ODI в пацієнтів

зі спондилолістезом має особливу цінність: вона відображає не тільки біль, а й ціну компенсації, яку платить організм за порушений сагітальний баланс.

Для авторської технології відновлення міжтілової висоти та локального сегментарного лордозу мало принципове значення. Якщо міжтіловий імплантат здатен розкритися in situ і створити контрольовану дистракцію, це означає не просто збільшення висоти диска. Це означає можливість частково змінити взаємовідношення PT і SS, зменшити форамінальний стеноз, поліпшити умови для непрямої декомпресії та знизити вимоги до грубої мануальної редукції. Тобто біомеханічні параметри в даному дослідженні виконували роль не тільки описових, але й «мостових» змінних між вихідним станом пацієнта та технічною суттю запропонованого хірургічного рішення.

У цьому контексті особливо важливо, що LL і SL на старті статистично не різнилися між групами. Це означає, що кутовий резерв для післяопераційної корекції був подібним, і будь-які відмінності в досягнутому відновленні сегментарної геометрії можуть бути більш обґрунтовано пов'язані з властивостями імплантату та технікою його встановлення, а не з випадковими початковими «перевагами» групи. З дослідницької точки зору це один із найсильніших аргументів на користь валідності подальшого порівняння авторського способу зі стандартними підходами.

Побудований клінічний портрет когорти має низку безпосередніх наслідків. По-перше, він визначає релевантність оцінки морфометрії хребтового каналу та динаміки неврологічних порушень у пацієнтів, оперованих традиційним методом. Якщо у вихідному стані переважають нейрогенна кульгавість, радикулопатія та чутливі/моторні порушення, то саме зміни каналу та функціональний регрес дефіциту стають центральними критеріями клінічного успіху. По-друге, вихідна висота диска, форамінальний резерв і сегментарний лордоз прямо обґрунтовують необхідність біомеханічного моделювання дистракційного кейджа, адже без розуміння стартових просторових параметрів важко оцінити реальну користь пристрою, що дистрагується in situ.

По-третє, саме клінічна характеристика вибірки дає підставу для розгляду авторської методики як інструмента не тільки стабілізації, а й функціональної реконструкції рухового сегмента. Пацієнт із високим ODI, кульгавістю, парезом та дефіцитом форамінального простору потребує не пасивної фіксації, а такого втручання, яке змінює механічні умови існування корінця, відновлює локальну опору передньої колони та зменшує потребу в надмірній інтраканальній маніпуляції. Власне з цього й випливає дослідницька новизна: оцінювання дистракційного кейджу не як «ще одного імплантату», а як інструмента вирішення конкретного клініко-біомеханічного завдання.

По-четверте, опис вибірки дозволяє більш коректно трактувати профіль ускладнень. Якщо контрольна група стартово має гірший сагітальний профіль і складнішу локальну анатомію, це слід враховувати при аналізі крововтрати, тривалості операції, частоти післяопераційної радикулопатії, атрофії паравертебральних м'язів та повторних втручань. Такий підхід є методологічно правильним, оскільки він запобігає спрощеному протиставленню «хорошого» і «поганого» методу та натомість показує реальні межі їх застосовності.

По-п'яте, клінічна характеристика учасників дослідження підвищує аргументативну силу розділу узагальнення. Коли в кінці роботи формулюються висновки про переваги малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації з дистракційними кейджами, читач повинен чітко розуміти: ці переваги продемонстровано в когорті пацієнтів із суттєвим функціональним тягарем хвороби, а не в селективно відібраній «легкій» популяції. Саме цей момент надає висновкам практичної ваги та робить їх придатними для впровадження в клінічну практику.

Узагальнюючи весь комплекс одержаних даних, можна стверджувати, що вихідний клінічний фенотип учасників дослідження формувався на перетині трьох взаємопов'язаних осей. Перша вісь, дегенеративно-морфологічна, — відображала наявність анатомічно верифікованого лістезу, зниження висоти диска, стенозуючих змін та ознак порушеного сагітального

профілю. Друга, неврологічна, — включала больовий синдром, нейрогенну кульгавість, чутливі порушення та парези різного ступеня вираженості. Третя, функціональна, — проявлялася зниженням повсякденної активності, обмеженням ходьби, труднощами тривалого стояння, порушенням толерантності до осьового навантаження й загальним зниженням якості життя. Для дослідження принципово, що всі три осі присутні одночасно. Саме ця «тривимірність» клінічного фенотипу і створювала підґрунтя для вибору міжтілової стабілізації як стратегічного методу лікування.

Така інтерпретація дозволяє краще зрозуміти, чому ізольована декомпресія в подібній категорії пацієнтів не могла розглядатися як оптимальний універсальний варіант. Якщо у пацієнта наявні виразний біль, нейрогенна кульгавість, руховий дефіцит, сегментарна нестабільність і дисбаланс локальної геометрії, то усунення лише канального компонента компресії не розв'язує проблему повністю. Не менш важливо відновити передню колонну опору, нормалізувати просторові взаємовідношення в сегменті, збільшити форамінальний резерв і зменшити патологічні зсувні сили. Саме тому для сформованої в роботі когорти питання стояло не просто про «операцію», а про вибір такого варіанта операції, який би одночасно поєднав декомпресію, стабілізацію та корекцію. Авторський підхід із дистракційним кейджем розроблявся як відповідь саме на цю багатокомпонентну клінічну потребу.

Загальний вигляд когорти також свідчить про її високу релевантність для умов української нейрохірургічної практики. Це пацієнти, яких хірург реально зустрічає у відділенні: зі складною комбінацією болю, нестабільності, стенозу, спінотазового дисбалансу та неповносправності. Показано, у кого саме пропонується застосовувати розроблену технологію, які вихідні параметри слід враховувати перед операцією та чому очікувана ефективність повинна оцінюватися водночас за неврологічними, функціональними й біомеханічними критеріями.

З позицій доказовості сформована вибірка має низку суттєвих переваг.

По-перше, вона є достатньо однорідною за головними клінічними проявами, що уможливлює осмислене порівняння результатів лікування. По-друге, вона зберігає природну клінічну варіативність, завдяки чому висновки роботи не втрачають зв'язку з реальним практичним контингентом. По-третє, вона містить пацієнтів з різною конфігурацією локального та глобального дисбалансу, що дозволяє оцінювати не лише загальний ефект стабілізації, а й здатність технології працювати в різних анатомо-біомеханічних умовах. По-четверте, структура когорти логічно пов'язана з попередніми етапами дослідження — аналізом традиційного лікування, біомеханічним моделюванням та розробкою авторського імплантату. Це робить перехід від теоретичного обґрунтування до клінічної апробації послідовним і науково коректним.

Усе наведене дає підставу розглядати клінічну характеристику учасників дослідження як повноцінний доказовий блок. Саме через нього стає зрозуміло, що результати лікування отримано в когорті пацієнтів з реальним, а не умовним захворюванням; у когорті, де є достатній простір для клінічно значущого покращення; у когорті, де успішність операції визначається не тільки за рентгенограмою, а й за здатністю пацієнта повернутися до більш повного функціонування.

2.3. Методи дослідження

Комплексне клініко-неврологічне обстеження виконано за стандартною схемою згідно з клінічними протоколами надання медичної допомоги (включало такі дослідження, як клінічний аналіз крові, сечі, кров на RW, HbsAg, HCV, флюорографія органів грудної порожнини, огляд лікаря-терапевта тощо).

Оцінювання больового синдрому здійснено за візуальною аналоговою шкалою (англ. visual analog scale, VAS), на бланку якої після усних пояснень

лікаря пацієнт робить відмітку про інтенсивність болю, який відчуває, на маркованій лінії або зображенні обличчя (рис. А.1) [178].

Функціональний стан визначали за шкалою індексу неповносправності Освестрі (англ. Oswestry Disability Index, ODI), валідизованою як українською (рис. А.2), так і російською (для тих пацієнтів, які не володіють українською), рис. А.3) мовами.

За цією анкетою інтерпретація індексу така:

0–20 % — мінімальній рівень неповносправності,

21–40 % — помірні порушення,

41–60 % — важкі порушення,

61–80 % — інвалідизуючі порушення,

81–100 % — порушення, що «приковують пацієнта до ліжка», або перебільшення скарг.

Матеріал вважали однорідним ізотропним з такими величинами модулю пружності Юнга (E) та коефіцієнта Пуасона (υ): коркової кістки — E=12 000 МПа, υ=0,3; губчастої кістки — E=100 МПа, υ=0,2; міжхребцевого диска — E=4,2 МПа, υ=0,45; хряща — E=5,6 МПа, υ=0,45; PEEK — E=2 200 МПа, υ=0,34; сталі — E=210 000 МПа, υ=0,3. Новітня експериментальна модель порівняно з контрольною (PEEK) характеризується:

- подібним розподілом напружень на блоці хребців L3–S1 (у тілах хребців L4 та S1 рівень напруження незначимо вище, а хребця L5 незначимо нижче);

- зменшеним напруженим станом на вході фіксуючих гвинтів до кістки хребця S1 (завдяки використанню більш жорсткої міжтілової опори);

- не критично (з точки зору міцності для металу) більшим напруженням в самій міжтіловій опорі.

При математичному моделюванні було досліджено вплив гіпо- та гіперлордотичної деформації поперекового відділу хребта на розподіл напружень в елементах переднього та заднього опорного комплексів.

За основу взято інтактну модель попереково-крижового відділу хребта (L_I-S_I), яка описує: 1) поля розподілу еквівалентних напружень у компактній і губчастій кістковій тканині тіл хребців, суміжних міжхребцевих дисках і суглобовому хрящі дуговідросткових суглобів; 2) повні переміщення повної моделі у разі зміни еквівалентних напружень.

Створено чотири розрахункові моделі:

– 1-ша базова – за даними M.Bernhardt, K.Bridwell з максимальними нормальними параметрами глобального поперекового лордозу та горизонтального кута нахилу крижів (GLL = 70°; SS = 48°);

– 2-га базова модель – згідно з R.Jackson, A.McManus з мінімальними нормальними параметрами GLL (60°) та SS (40°) [400];

– 3-тя розрахункова – повний і сегментарний гіперлордоз (GLL = 82°; SS = 56°);

– 4-та – повне та сегментарне зменшення поперекового вигину (GLL = 45°; SS = 33°). Тривимірні геометричні моделі створювали за допомогою програми SolidWorks, розрахунки виконували в програмі ANSYS (табл. 2.7, рис. 2.3, 2.4). Усі моделі мали ідентичну структуру, відрізняючись лише величинами сегментарного і глобального поперекового лордозу.

Таблиця 2.3.1

Величини сегментарного і глобального поперекового лордозу в геометричних моделях з різною конфігурацією сагітального контуру хребта

Сегмент хребта	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
L_I-L_{II}, град.	4,0	1,5	6,4	1,2
L_{II}-L_{III}, град.	7,0	7,0	9,9	4,4
L_{III}-L_{IV}, град.	13,0	11,3	16,0	4,0
L_{IV}-L_V, град.	20,0	16,5	21,1	14,5
L_V-S_I, град.	28,0	24,6	27,4	19,2
L_I-S_I, град.	72,0	60,9	80,8	43,3

Примітка. Наведено результати геометричного моделювання Найбільші значення сегментарного і глобального поперекового лордозу отримано в моделі 3, найменші — у моделі 4.

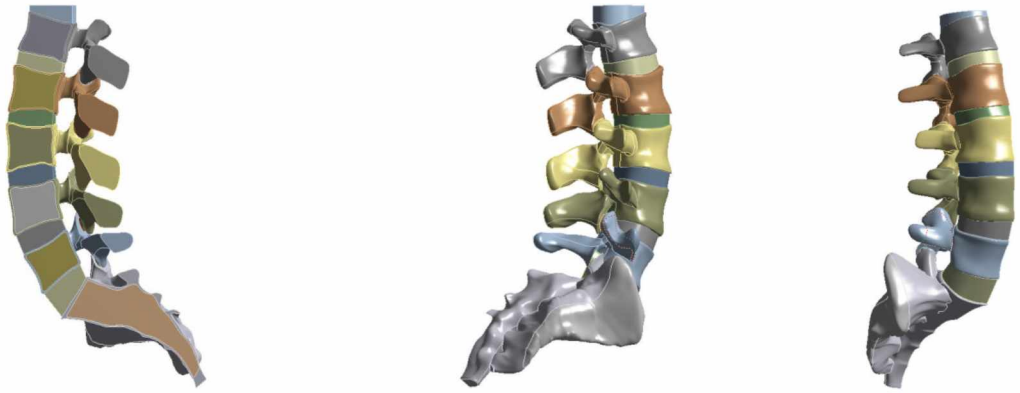
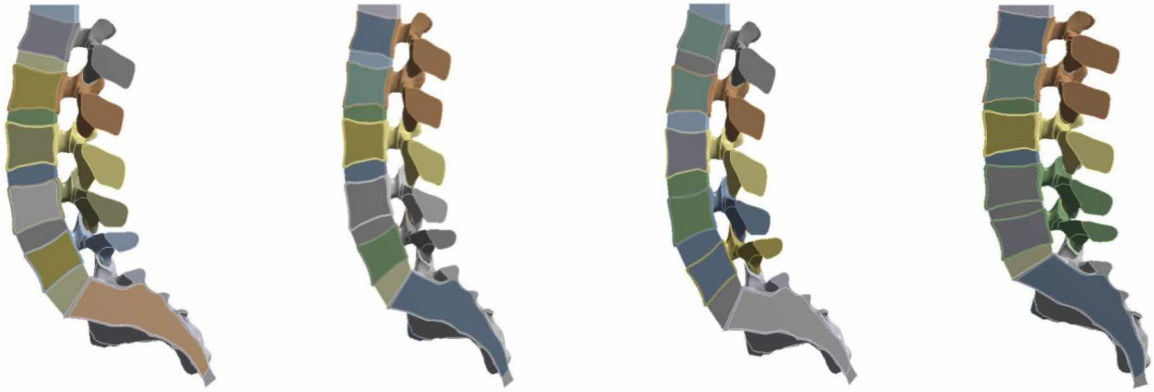


Рис. 2.3. Зовнішний вид моделі поперекового лордозу



а б в г

Рис. 2.4. Геометричні моделі поперекового лордозу з різною конфігурацією сагітального контуру хребта: норма з GLL = 72° (а) та GLL = 60,9° (б); гіперлордоз з GLL = 80,8° (в); гіполордоз з GLL= 43,3° (г).

Для проведення розрахунків задавали механічні властивості (модуль пружності Юнга та коефіцієнт Пуассона) біологічних тканин, які обирали за даними В.А. Березовського [2] (табл. 2.8).

Таблиця 2.3.2

Фізико-механічні характеристики мате ріалів, які використані у моделюванні

Матеріал	Модуль Юнга, МПа	Коефіцієнт Пуассона ν

Кортикальна кістка	10 000	0,3
Губчата кістка	450	0,2
Суглобовий хрящ	10,6	0,49
Міжхребцевий диск	4,2	0,45

Примітка. Таблиця містить вхідні фізико-механічні параметри для моделювання методом скінченних елементів. Ці характеристики використовували для розрахунку напружено-деформованого стану системи.

У процесі побудови скінченно-елементних моделей використовували комбіновані скінченно-елементні сітки, які включали 20-тивузловий кубічний елемент (SOLID186) та 10-тивузловий тетраедр (SOLID187). Використання елемента типу SOLID186 дає можливість розбити простіші ділянки геометричної моделі з найменшою похибкою, а застосування іншого елементу SOLID187 дає можливість розбити більш складні ділянки моделі, для яких неможливе використання першого типу елементів.

Таким чином, застосування комбінування різних типів елементів при побудові скінченно-елементної моделі складної форми елементів біологічних систем дає можливість отримати високу апроксимацію напружено-деформованого стану при розрахунках. Побудовані скінченно-елементні моделі поперекового відділу хребта налічували близько 1.4 млн. елементів.

Навантаження здійснювали шляхом прикладання сили до додаткового елементу, що діє у вертикальному напрямку, та дорівнює 350 Н. Дана величина обумовлена тим, що навантаження, яке діє на поперековий відділ відповідає 700 Н, з урахуванням симетрії в сагітальній площині величина навантаження відповідає 350 Н. Як закріплення була зафіксована виділена частина крижової ділянки. На рисунку 2.5 представлені схеми навантаження, закріплення і умови симетрії в сагітальній площині на прикладі моделі 1.

У процесі підготовки рукопису дисертації використано генеративний «штучний інтелект» (ШІ). Відповідно до таксономії GAIDeT (GAIDeT

Declaration Generator [Internet]. Available from: https://panbibliotekar.github.io/gaidet-declaration/), наведені нижче завдання було делеговано інструментам генеративного ШІ за повного людського нагляду: генерування ідей, збирання даних, очищення даних, курація та організація даних, візуалізація, генерування тексту, вичитування та редагування, резюмування тексту, оцінювання якості, рекомендації. Використані інструменти генеративного ШІ: Google Gemini 3 Pro (Thinking, Deep Research), Nano Banana; Google NotebookLM; OpenAI ChatGPT 5.4 (Thinking - Extended, Web search). Всі частини тексту дисертації, під час написання яких використано технології «штучного інтелекту», перевірено та відредаговано здобувачем особисто.

У всіх статистичних розрахунках пороговою величиною рівня значимості p обрано 0,05. У випадку множинних порівнянь застосовували поправку Бонферроні (за критичне значення p брали добуток порогового значення p 0,05 та кількості зіставлень).

Ведення банку даних дослідження, базові розрахунки похідних показників, частотну характеристику ознак, побудову діаграм проводили за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel (ліцензія № 00201-10554-16848-AA351), усі обчислення здійснювали засобами Statsoft Statistica 8.0 (ліцензія № STA862D175437Q).

Отримані числові показники опрацьовано методами описової статистики. Перевірка нормальності розподілу проведена з використанням критерія Шапіро-Уілка. Екстенсивний показник оцінювався за допомогою процентів%. Використовувалися кількісні та якісні показники. Порівняння між групами проводилося за допомогою точного критерію Фішера. Результати подано у вигляді M ± m, де M – середнє значення показника, m – помилка середнього арифметичного. Для оцінювання змін до та після оперативного втручання використовувався критерій Мак-Немара. Кореляційний зв'язок між кількісними показниками встановлювали за допомогою коефіцієнту кореляції Спірмена. Для оцінювання міцності зв'язку використовували шкалу Чеддока.

Відмінності вважали значущими за $p < 0,05$.

Стандартизовану різницю середніх визначали шляхом ділення різниці середніх на стандартне відхилення показника.

Рівень гетерогенності визначали за допомогою статистичного метода I^2.

Статистичну обробку виконано за допомогою непараметричних методів: критерію Краскела–Волліса для неперервних показників та точного критерію Фішера для категоріальних змінних. Для інтерпретації міжгрупової порівнянності особливе значення надавали не лише p-рівню, а й клінічному змісту відмінностей, оскільки в нерандомізованій хірургічній когорті однаково важливими є і статистична, і змістовна співставність груп.

Переважним рівнем ураження був L4–L5, а основну масу випадків становили I–II ступені Meyerding. Клінічний фенотип пацієнтів визначався поєднанням виразного больового синдрому, нейрогенної кульгавості, чутливих порушень і майже у половини хворих — моторного дефіциту. Отримані дані створюють необхідне підґрунтя для аналізу результатів лікування, оскільки дозволяють розглядати ефективність авторської методики на тлі чітко охарактеризованого вихідного стану пацієнтів.

Попередню підготовку даних виконували в пакеті MS Excel, обробка даних проводилася за допомогою пакета прикладних програм IBM SPSS Statistics 20.0.0.2.

РОЗДІЛ 3
РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Власні спостереження хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом

Перший клінічний етап дисертаційного дослідження було спрямовано на системне вивчення тих змін, які виникають у хребтовому каналі, неврологічному статусі та показниках функціонального стану хребта після традиційного оперативного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта. Саме цей етап дає змогу визначити, які саме ефекти забезпечує декомпресивно-стабілізуюче втручання як таке, а які клінічні та біомеханічні проблеми залишаються недостатньо розв'язаними і, відповідно, потребують подальшого вдосконалення хірургічної технології.

Було проаналізовано дані 24 пацієнтів. Окремо виділено так звану конвенційну когорту, тобто пацієнтів, яким виконували традиційні варіанти оперативного лікування без авторської модифікації з дистракційним кейджем. До цієї підкогорти увійшли 19 осіб: 11 пацієнтів групи порівняння, яким застосовували стандартний спосіб МІЗМТСХ, та 8 пацієнтів контрольної групи, яким виконували інші традиційні варіанти міжтілового спондилодезу.

Клінічний зміст цього етапу полягає не лише у фіксації факту покращення після операції. Дизайн дослідження передбачав завдання показати, якою мірою традиційне втручання усуває морфологічний субстрат нейрокомпресії, наскільки швидко і повно регресують неврологічні розлади, чи супроводжується декомпресія відновленням просторових взаємовідношень у хребтовому руховому сегменті та чи досягається клінічно значуща нормалізація параметрів сагітального балансу. Саме в такому аспекті

хірургічний результат перестає бути суто технічним і набуває патофізіологічного змісту.

Вибір лікування за спондилолістезу має визначатися не лише ступенем зміщення, а насамперед вираженістю симптомів, наявністю неврологічного дефіциту, ознаками нестабільності та індивідуальним профілем пацієнта. Отже, власний аналіз традиційного етапу лікування має безпосередню наукову вагу: він дозволяє зіставити локальні результати з сучасними доказовими уявленнями і водночас формує контрольну платформу для подальшого оцінювання авторської технології.

Конвенційна когорта традиційного лікування складалася переважно з жінок середнього і старшого працездатного віку. Ураження найчастіше локалізувалося на рівні L4–L5, а ступені за Meyerding переважно відповідали I–II стадіям. Ця структура є характерною для дегенеративного поперекового спондилолістезу і добре відображає реальну хірургічну практику відбору на оперативне лікування пацієнтів із поєднанням механічної нестабільності та нейрокомпресійного синдрому.

Таблиця 3.1.1

Клінічна характеристика конвенційної когорти традиційного лікування

Параметр	Конвенційна когорта традиційного лікування (n=19)	Статистична/клінічна примітка
Статевий склад	14 жінок (73,7 %), 5 чоловіків (26,3 %)	Переважання жінок відповідає типовому профілю дегенеративного спондилолістезу.
Вік, роки	58 [52; 62]	Me [LQ; UQ].
Індекс маси тіла, кг/м²	32,1 [30,7; 33,9]	Когорта переважно з надмірною масою

Параметр	Конвенційна когорта традиційного лікування (n=19)	Статистична/клінічна примітка
		тіла/ожирінням I ступеня.
Тривалість симптомів, міс.	24 [19; 36]	Симптоматика мала хронічний характер.
Тривалість консервативного лікування, міс.	12 [12; 18]	Операція виконувалася після неефективного консервативного етапу.
Рівень ураження	L4-L5 — 13 (68,4 %); L5-S1 — 6 (31,6 %)	Переважання рівня L4-L5 є патогенетично очікуваним.
Ступінь за Meyerding	I — 10 (52,6 %); II — 7 (36,8 %); III — 2 (10,5 %)	У когорті домінували низькі та помірні ступені зсуву.
VAS до операції, бали	8 [8; 9]	Висока вихідна інтенсивність болю.
ODI до операції, бали	48 [45; 53]	Виражене функціональне обмеження.
Склад підгруп	Стандартна МІЗМТСХ — 11; інші традиційні МТСХ — 8	Підрозділ 3.1 аналізує лише неавторські технічні варіанти.

Примітка. Використано описову статистику: для неперервних показників — Me [LQ; UQ], для категоріальних — n (%). Конвенційна когорта

характеризувалась хронічним перебігом, високими VAS/ODI та переважанням ураження L4–L5.

Переважання жінок у вибірці не є випадковим: саме жіноча стать традиційно асоціюється з вищою частотою дегенеративного спондилолістезу, що пов'язують із особливостями фасеткової орієнтації, віковими змінами зв'язкового апарату, гормонально зумовленими відмінностями сполучної тканини та більшою поширеністю остеоартрозу дуговідросткових суглобів. Тому сформована когорта є не лише статистично зручною, а й патогенетично репрезентативною.

Не менш важливою є віково-антропометрична характеристика. Медіанний вік 58 років і медіана індексу маси тіла понад 32 кг/м² означають, що більшість пацієнтів поєднували вікову дегенерацію диско-фасеткового комплексу з хронічним підвищеним осьовим навантаженням. Саме така комбінація чинників створює умови для повільного прогресування зсуву, втрати міжтілової висоти, формування сагітального дисбалансу й поступового розвитку нейрокомпресії. У дослідницькому контексті це важливо, оскільки дозволяє тлумачити післяопераційні результати не як ефект лікування «чистого» спондилолістезу, а як ефект втручання на фоні поліморбідного дегенеративного континууму.

Тривалість симптомів у межах близько двох років свідчить, що у більшості пацієнтів компресійний синдром мав не гострий, а хронічний характер. Це означає, що нервові структури перебували під дією не лише механічного тиску, а й хронічного ішемічно-запального мікрооточення. Відповідно, навіть технічно коректна декомпресія не могла забезпечити миттєвий повний регрес усіх неврологічних проявів. Саме ця обставина є одним із ключових пояснень того, чому чутливий і моторний дефіцит відновлювалися повільніше, ніж нейрогенна кульгавість.

Переважання рівня L4–L5 також має не лише описове, а й сутнісне значення. На цьому рівні поєднуються високе навантаження, анатомічні

передумови до дегенеративної нестабільності та відносно часта комбінація центрального, латерального і форамінального стенозу. Тому результати декомпресії на рівні L4–L5 часто віддзеркалюють усю складність проблеми дегенеративного спондилолістезу. У власній когорті це підтверджується і вихідним клінічним профілем, і виразністю післяопераційних морфометричних зрушень.

Розподіл за Meyerding із переважанням I–II ступенів має особливу інтерпретаційну цінність. Він означає, що у більшості пацієнтів механічна дестабілізація ще не набула крайніх форм, але вже була достатньою для клінічно значущої нейрокомпресії та інвалідизації. Саме такі пацієнти є найбільш показовими для оцінювання ефективності реконструктивно-стабілізуючих технологій, оскільки в них ще зберігається простір для відновлення біомеханіки сегмента без необхідності надмірно агресивних редукційних маневрів.

Вихідні значення VAS і ODI в традиційній когорті демонструють, що оперативне лікування виконувалося на тлі не лише морфологічно доведеного зміщення, а й виразного клінічного страждання. Пацієнти входили в операцію з високою інтенсивністю болю та суттєвою неповносправністю. Отже, навіть помірне зменшення цих показників після операції мало реальне клінічне значення. Для дослідницького аналізу це принципово, оскільки дозволяє уникнути помилки «статистично значуще, але клінічно незначуще». У нашому матеріалі клінічна значущість змін безсумнівна.

Нарешті, сама побудова конвенційної когорти (об’єднання групи стандартної МІЗМТСХ та групи інших традиційних МТСХ) є виправданою не лише формально. Вона відображає реальне завдання першого етапу роботи: оцінити, що може дати традиційна хірургія як така, ще до запровадження авторської модифікації.

3.1.1. Розміри хребтового каналу до та після хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом

Морфологічним підґрунтям нейрокомпресійних розладів за дегенеративного спондилолістезу є не стільки сам факт передньої трансляції хребця, скільки комплекс вторинних змін у межах хребтового каналу: фасеткова гіпертрофія, потовщення жовтих зв'язок, стеноз латеральних рецесів, зменшення міжхребцевого простору та вторинне звуження міжхребцевих отворів. Тому аналіз розмірів хребтового каналу є не формальним рентгенологічним додатком, а центральним доказовим блоком, що пояснює клінічні результати декомпресивно-стабілізуючого втручання.

Для оцінювання впливу традиційного оперативного лікування на морфометрію каналу було використано три взаємодоповнювальні індикатори: передньозадній діаметр центрального хребтового каналу, площу дурального мішка та висоту латерального рецесу. Така комбінація дає можливість охарактеризувати не лише центральний стеноз, а й ті зони компресії, які найтісніше пов'язані з радикулопатією та нейрогенною переміжною кульгавістю. У pooled-аналізі конвенційної когорти ($n = 19$) до операції передньозадній діаметр каналу становив 7,5 [7,2; 7,7] мм, а після операції збільшувався до 11,4 [11,0; 11,9] мм ($p < 0,001$). Площа дурального мішка зростала з 86 [79; 96] до 140 [130; 149] мм² ($p < 0,001$), а висота латерального рецесу — з 2,8 [2,5; 3,0] до 4,5 [4,2; 4,8] мм ($p < 0,001$).

Як видно з табл. 3.1.2, після операції відзначено статистично значуще розширення каналу за всіма основними морфометричними параметрами.

Таблиця 3.1.2

Морфометричні показники хребтового каналу до та після традиційного хірургічного лікування

Показник	До операції	Після операції	Δ	p
Передньозадній діаметр центрального каналу, мм	7.5 [7.2; 7.7]	11.4 [11; 11.9]	3.5 [3.5; 4.5]	<0,001
Площа дурального мішка, мм²	86 [79; 96]	140 [130; 149]	46 [46; 60]	<0,001
Висота латерального рецесу, мм	2.8 [2.5; 3]	4.5 [4.2; 4.8]	1.5 [1.5; 2.1]	<0,001

Примітка. Для неперервних показників наведено Me [LQ; UQ]; p — критерій Вілкоксона для парних порівнянь.

Найбільш виразним було збільшення площі дурального мішка, що свідчить про реальну декомпресію невральних структур, а не лише про часткове покращення окремих лінійних величин. З практичної точки зору це означає, що традиційний метод забезпечував не просто доступ до каналу, а відновлював резервний простір для корінців і дурального мішка, зменшуючи механічне подразнення при вертикалізації та осьовому навантаженні.

У табл. 3.1.3 показано, що величина морфометричних змін залежала і від рівня ураження, і від конкретного технічного варіанта традиційного втручання.

Таблиця 3.1.3

Динаміка параметрів хребтового каналу залежно від рівня ураження та типу традиційного втручання

Підгрупа/рівень	**n**	**Передньозадній діаметр до/після, мм**	**Площа дурального мішка до/після, мм²**	**Висота латерального рецесу до/після, мм**	**p (діаметр)**
L4-L5	13	7.5 [7.2; 7.7] → 11.4 [11; 11.8]	90 [80; 94] → 140 [128; 150]	2.9 [2.5; 3] → 4.5 [4.2; 4.8]	<0,001
L5-S1	6	7.4 [7.3; 7.7] → 11.4 [11.1; 11.8]	86 [80; 95] → 141 [134; 146]	2.8 [2.5; 3] → 4.5 [4.3; 4.8]	0,031
Стандартна МІЗМТСХ	11	7.5 [7.3; 7.8] → 11 [10.9; 11.2]	86 [78; 96] → 132 [124; 142]	2.8 [2.5; 3] → 4.3 [4; 4.5]	<0,001
Інші традиційні МТСХ	8	7.4 [7.2; 7.6] → 11.9 [11.8; 12.1]	88 [81; 95] → 148 [141; 155]	2.8 [2.5; 3] → 4.9 [4.5; 5.1]	0,008

Примітка. p наведено для парного порівняння передньозаднього діаметра каналу до та після операції(критерій Вілкоксона).

На рівні L4–L5, який переважав у нашій когорті, вихідний стеноз мав дещо більш виражений характер, а після декомпресії відзначено істотне збільшення площі дурального мішка та висоти латерального рецесу. На рівні L5–S1 позитивні зміни також були статистично значущими, хоча через меншу кількість спостережень довірчий простір був ширшим.

Особливої уваги заслуговує міжпідгрупове порівняння. У пацієнтів контрольної групи величина приросту передньозаднього діаметра каналу, площі дурального мішка та висоти латерального рецесу виявилася більшою, ніж у пацієнтів групи порівняння. На перший погляд це могло б свідчити про

перевагу ширших декомпресивних маніпуляцій. Проте більша амплітуда морфометричної корекції не тотожна кращому ранньому клінічному результату, оскільки вона нерідко досягається ціною більшої операційної травми, більшої крововтрати, тривалішого доступу і вираженішого пошкодження паравертебральних м'язів.

У частини пацієнтів, навіть попри істотне збільшення площі дурального мішка, післяопераційні значення лишалися в межах, які можна розглядати як граничні з позиції функціонального резерву каналу. Це частково пояснює, чому в ранньому післяопераційному періоді не всі неврологічні симптоми регресували повністю. Інакше кажучи, декомпресія мала позитивний напрямок, але не завжди забезпечувала однаково високий ступінь «просторової достатності» для всіх компонентів невронального вмісту.

З патогенетичних позицій це цілком закономірно. Нейрокомпресійний синдром при дегенеративному спондилолістезі є наслідком поєднання статичного та динамічного компонентів. Традиційне втручання добре усуває статичний стеноз, однак динамічний компонент, пов'язаний із мікронестабільністю, залишковою втратою міжтілової висоти, неповною редукцією трансляції та післяопераційним фіброзом, може зберігатися. Саме тому морфометричні дані про канал не слід розглядати як самодостатню кінцеву точку; вони мають сенс лише в поєднанні з неврологічною динамікою та оцінкою функціонального стану хребта.

Окремого обговорення потребує співвідношення між центральною та форамінальною декомпресією. Збільшення висоти латерального рецесу в нашій когорті мало системний характер, але його абсолютна величина була скромнішою, ніж зміни площі дурального мішка. Це закономірно: центральну декомпресію технічно досягти відносно простіше, тоді як повне відновлення простору в латеральних рецесах і міжхребцевих отворах істотно залежить від здатності відновити висоту диска, скоригувати зсув і сформувати опору для передньої колони. У межах традиційних технологій ця задача вирішується лише частково.

Таким чином, перший блок власних спостережень демонструє, що традиційне хірургічне лікування пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом забезпечує статистично значуще покращення морфометричних характеристик хребтового каналу. Водночас аналіз виявив і межі цієї ефективності: неоднорідність ступеня декомпресії між пацієнтами, дисоціацію між анатомічним розширенням каналу та раннім клінічним покращенням, а також залежність результату від ступеня відновлення суміжних структур рухового сегмента.

Отримані морфометричні результати мають бути розглянуті не лише як свідчення технічної адекватності втручання, а ще й як показник зміни середовища, в якому функціонують невральні структури. У нормі дуральний мішок і корінці мають певний резерв простору, що захищає їх від компресії під час змін положення тіла, ходьби, розгинання та осьового навантаження. За дегенеративного спондилолістезу цей резерв послідовно вичерпується: спочатку за рахунок втрати дискової висоти та фасеткової перебудови, а згодом — за рахунок гіпертрофії зв'язок, стенозу рецесів і зсуву хребця. Тому післяопераційне збільшення площі дурального мішка і діаметра каналу слід трактувати як відновлення функціонального резерву простору, а не просто як зміну цифр на МРТ чи КТ.

Збільшення передньозаднього діаметра каналу з ~ 7,5 мм до > 11 мм означає перехід від клінічно значущого стенозу до значно більш сприятливих просторових умов для дурального мішка. Хоча цей показник є лінійним і не повністю відображає складну тривимірну геометрію каналу, у поєднанні з площею дурального мішка він дає переконливе уявлення про характер декомпресії. Особливо цінним є саме паралельне зростання площі мішка, оскільки воно опосередковано відображає не лише кісткову, а й м'якотканинну складову стенозу.

Висота латерального рецесу у власній когорті також демонструвала істотне покращення. Це має пряме клінічне значення, тому що латеральний рецес є однією з найвразливіших зон для компресії низхідного корінця. У

пацієнтів із корінцевими болями та парестезіями декомпресія саме цієї ділянки часто визначає ступінь післяопераційного полегшення. Тому навіть якщо глобальна площа каналу вже покращена, недостатнє відновлення латеральних рецесів може підтримувати резидуальну радикулопатію. У нашому матеріалі це частково пояснює більш повільний регрес корінцевого болю порівняно з кульгавістю.

Порівняння підгруп дозволяє зробити ще один висновок. Морфометрично більша декомпресія в контрольній групі не перетворилася автоматично на кращий ранній клінічний результат. Це означає, що «широка декомпресія» не є універсальним синонімом «кращої операції». Для нейрохірурга важливо досягти достатньої, а не максимальної ціною будь-яких тканин, декомпресії. Саме поняття достатності в даному випадку означає таку морфологічну корекцію, за якої усувається компресійний субстрат, але не створюється надмірна додаткова травма.

У практичному сенсі ці результати підкреслюють цінність поєднаного аналізу центральної та непрямої декомпресії. Центральна декомпресія забезпечує швидкий морфологічний ефект, але без адекватного відновлення міжтілової висоти й опорної функції передньої колони її потенціал може бути частково нівельований. Саме тому в подальшому відновлення висоти диска й параметрів сагітального балансу розглядається не як вторинний «косметичний» елемент, а як невід'ємна складова повноцінного усунення нейрокомпресії.

Слід також наголосити, що в невеликій хірургічній когорті морфометричні показники мають подвійну роль. З одного боку, вони є кінцевими точками, які можна кількісно оцінити статистично. З іншого — вони є проміжними механістичними маркерами, що пояснюють подальшу клінічну траєкторію пацієнта. Саме в такому підході, від механізму до клініки, і полягає одна з сильних сторін дослідницького дизайну.

Результати традиційної декомпресії в нашій роботі не суперечать сучасним уявленням про суть дегенеративного стенозу на тлі спондилолістезу.

Морфологічний компонент проблеми є реальним, коригованим і клінічно значущим. Однак повна ефективність втручання залежить від того, чи буде ця морфологічна корекція вбудована в ширшу реконструкцію сегмента. У цьому й полягає принципова межа традиційних підходів, яку вдалося окреслити вже на першому етапі дослідження.

3.1.2. Динаміка неврологічних порушень до та після хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом

Другим принциповим завданням аналізу традиційного лікування було оцінити, наскільки морфологічне усунення стенозу трансформується у клінічно відчутний регрес неврологічної симптоматики. У пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом саме неврологічні прояви (нейрогенна переміжна кульгавість, корінцевий біль, чутливі порушення і руховий дефіцит) найчастіше визначають рішення про оперативне лікування і є найбільш значущими для якості життя.

У конвенційній когорті всі пацієнти мали клінічні ознаки нейрокомпресії до операції: нейрогенна кульгавість і корінцевий синдром були наявні у 100 % випадків, чутливі розлади також відзначалися у всіх 19 пацієнтів, а парези нижньої кінцівки — у 8 із 19 спостережень, тобто у 42,1 %. Така структура симптомів свідчить, що до традиційного хірургічного лікування потрапляли не пацієнти з випадковою знахідкою на МРТ, а пацієнти з функціонально значущим нейрокомпресійним процесом.

Результати, наведені в табл. 3.1.4, демонструють неоднакову швидкість регресу окремих компонентів неврологічного синдрому.

Таблиця 3.1.4

Динаміка неврологічних порушень після традиційного хірургічного лікування

Неврологічний показник	До операції	На виписку	Через 6 міс.	p (до–виписка)	p (до–6 міс.)
Нейрогенна переміжна кульгавість	19 (100,0 %)	6 (31,6 %)	2 (10,5 %)	<0,001	<0,001
Радикулопатія/корінцевий біль	19 (100,0 %)	8 (42,1 %)	5 (26,3 %)	<0,001	<0,001
Чутливі порушення	19 (100,0 %)	11 (57,9 %)	4 (21,1 %)	0,008	<0,001
Парези нижньої кінцівки	8 (42,1 %)	5 (26,3 %)	2 (10,5 %)	0,453	0,070

Примітка. Для парних дихотомічних показників p обчислено за точним критерієм Мак-Немара(p). Частоти наведено як n (%).

Найшвидше зменшувалася нейрогенна переміжна кульгавість: уже на момент виписки вона зберігалася у 6 пацієнтів (31,6 %), а через 6 місяців — лише у 2 пацієнтів (10,5 %). Статистична значущість цих змін була переконливою. Із клінічної точки зору це означає, що центральна декомпресія та стабілізація рухового сегмента достатньо швидко зменшують навантажувальний компонент стенозу, який лежить в основі кульгавості.

Корінцевий синдром регресував повільніше. На час виписки його ознаки зберігалися у 8 пацієнтів (42,1 %), а через 6 місяців — у 5 пацієнтів (26,3 %). Це відповідає патофізіології радикулопатії, де навіть після усунення механічної компресії зберігається роль ішемії корінця, ендоневрального набряку, запальної сенситизації та післяопераційного рубцевого

мікрооточення. Саме тому радикулопатія потребує довшого часу для регресу і може залишати після себе стійкі нейропатичні компоненти болю.

Чутливі порушення також регресували поступово: з 100 % доопераційної частоти вони зменшувалися до 57,9 % на момент виписки і до 21,1 % через 6 місяців. Для чутливого дефіциту така динаміка є закономірною, оскільки функціональне відновлення сенсорних волокон, особливо при тривалому стенозі, зазвичай відстає від регресу болю та кульгавості. У дослідницькому контексті це важливо, бо демонструє: анатомічна декомпресія не повинна оцінюватися лише за раннім зменшенням болю; окремі неврологічні системи мають різний часовий профіль відновлення.

Найменш швидкою виявилася позитивна динаміка моторного дефіциту. Якщо до операції парези були у 8 пацієнтів, то на момент виписки вони зберігалися у 5, а через 6 місяців — у 2. По-перше, це підтверджує потенціал традиційного лікування щодо функціонального відновлення моторики. По-друге, показує, що регрес парезів не має миттєвого характеру і потребує не лише усунення компресії, а й часу для реіннервації, компенсації та цілеспрямованої реабілітації. По-третє, через малу чисельність спостережень саме для моторного дефіциту статистична значущість відмінностей була менш виразною, ніж для кульгавості або радикулопатії, що є типовим для хірургічних серій такого масштабу.

Аналіз сили м’язів за шкалою MRC, наведений у табл. 3.1.5, доповнює картину.

Таблиця 3.1.5

Зміни сили м’язів та профіль неврологічно значущих післяопераційних подій

Показник	Стандартна МІЗМТСХ (n=11)	Інші традиційні МТСХ (n=8)	Уся конвенційна когорта (n=19)
Сила м’язів за MRC до операції, бали	5 [4; 5]	4 [4; 5]	5 [4; 5]
Сила м’язів за MRC на виписку, бали	5 [5; 5]	5 [5; 5]	5 [5; 5]
Сила м’язів за MRC через 6 міс., бали	5 [5; 5]	5 [5; 5]	5 [5; 5]
Транзиторний післяопераційний радикуліт	3 (27,3 %)	1 (12,5 %)	4 (21,1 %)
Післяопераційна кровотеча	3 (27,3 %)	1 (12,5 %)	4 (21,1 %)
Ліквorея	1 (9,1 %)	0 (0,0 %)	1 (5,3 %)
Ознаки атрофії паравертебральних м’язів	10 (90,9 %)	1 (12,5 %)	11 (57,9 %)

Примітка. Таблиця подає описове міжпідгрупове зіставлення без інферентного тесту. В обох підгрупах сила м’язів відновлювалася до 5 балів, тоді як атрофія паравертебральних м’язів частіше відзначалась після стандартної МІЗМТСХ.

У загальній когорті медіана сили зросла від доопераційного рівня до виписки і надалі — до 6-місячного спостереження. Проте поєднання MRC із частотою резидуальних парезів є більш інформативним, ніж кожен із цих показників окремо. Медіанне значення не змінюється різко через те, що значна

частина пацієнтів уже до операції мала нормальну силу, натомість частка хворих із дефіцитом зменшується поступово. Для дослідницького аналізу така комбінація параметрів є більш коректною, бо відображає і розподіл тяжкості, і її клінічне значення.

Профіль ранніх післяопераційних ускладнень дозволяє побачити і зворотний бік традиційної техніки. Частота післяопераційної кровотечі в pooled-когорті становила 21,1 %, транзиторного післяопераційного радикуліту — 21,1 %, ліквореї — 5,3 %, а ознаки атрофії паравертебральних м'язів у пізнішому періоді — 57,9 %. Особливо показовою була різниця між підгрупами: у групі стандартної МІЗМТСХ ознаки атрофії паравертебральних м'язів спостерігалися у 90,9 % пацієнтів, тоді як у контрольній групі — у 12,5 %. Це не слід трактувати буквально як «гіршу» чи «кращу» операцію; радше, це відображає різні механічні профілі доступу, різний обсяг ретракції та різну ціну м'язово-зв'язкового ушкодження.

Саме цим багато в чому пояснюється феномен ранньої дисоціації між рентгенологічною декомпресією та суб'єктивним больовим статусом. У контрольній підгрупі, де приріст морфометричних параметрів каналу був більшим, швидкість раннього зниження болю виявилася меншою. Це означає, що в ранньому післяопераційному періоді клінічну картину визначає не лише декомпресія корінця, а й операційна травма м'яких тканин, реактивний набряк, локальне запалення і м'язовий синдром.

У ширшому клінічному контексті це співвідноситься із сучасними уявленнями про індивідуалізацію лікування при дегенеративному спондилолістезі. Показання до операції формуються за наявності стійкого больового синдрому, неврологічних розладів і нестабільності, однак сама операція повинна не лише декомпресувати, а й мінімізувати додаткову ятрогенну шкоду. У цьому сенсі результати дослідження демонструють, що традиційне лікування є достатньо ефективним для зменшення нейрокомпресійної симптоматики, але не повністю оптимальним щодо темпів

нейрофункціонального відновлення та профілю доступ-асоційованих ускладнень.

Отже, підтверджено клінічну доцільність традиційного декомпресивно-стабілізуючого втручання, але водночас продемонстровано, що неврологічне одужання є багатофакторним процесом. Його визначають не лише повнота усунення стенозу, а й ступінь операційної травми, залишкова нестабільність, відновлення просторових взаємовідношень у міжхребцевому сегменті та тривалість доопераційної компресії.

3.1.3. Показники функціонального стану хребта до та після хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта традиційним методом

Якщо аналіз хребтового каналу відповідає на питання «чи усунено морфологічну основу нейрокомпресії», а аналіз неврологічної динаміки — «чи регресували основні синдроми», то оцінка функціонального стану хребта дозволяє перейти на інтегральний рівень інтерпретації. У нашому дослідженні під функціональним станом хребта розуміли сукупність клінічних, рентгенометричних і біомеханічних параметрів, які відображають здатність оперованого рухового сегмента працювати без болю, без патологічної мікрорухомості та без грубого порушення локального і глобального сагітального профілю.

Для оцінювання цього рівня було проаналізовано інтенсивність болю за VAS, індекс неповносправності Освестрі, величину передньої трансляції хребця, параметри сагітального профілю (SVA, PT, SS), а також сегментарний і загальний поперековий лордоз. Додатково враховувалися збільшення міжтілової висоти та висоти міжхребцевого отвору, оскільки саме ці показники опосередковують відновлення передньої опорної колони й непряму декомпресію корінців.

У pooled-аналізі конвенційної когорти інтенсивність болю за VAS зменшувалася з 8 [8; 9] бала до 6 [5; 7] бала на момент виписки ($p < 0,001$) і до 4 [4; 5,5] бала через 6 місяців ($p < 0,001$). Індекс неповносправності Освестрі знижувався з 48 [45; 53] до 32 [31; 34] бала ($p < 0,001$). Уже сама ця пара показників демонструє, що традиційне лікування дає клінічно значущий функціональний ефект. Однак для дослідницької інтерпретації важливо оцінити, якою є природа цього ефекту: чи йдеться лише про симптоматичне полегшення, чи про відновлення механічних передумов нормальної роботи сегмента.

Рентгенометричні дані свідчать, що традиційне хірургічне лікування справді зменшує патологічну трансляцію: медіана зсуву хребця скорочувалася з 20 [16; 30] % до 10 [5; 15] % ($p < 0,001$). Одночасно покращувався глобальний сагітальний профіль: SVA зменшувалася з 10 [8; 12] см до 6 [6; 7] см ($p < 0,001$), pelvic tilt — з 28 [24; 30] ° до 25 [22; 28] ° ($p < 0,001$), а sacral slope збільшувався з 30 [29; 32] ° до 33 [32; 34] ° ($p < 0,001$). Сегментарний лордоз зростав із 9 [8; 10] ° до 12 [10; 13] °, а загальний поперековий лордоз — із 42 [40; 44] до 47 [44; 50] °. У сукупності це означає, що операція впливала не тільки на нервові структури, а й на геометрію опорного сегмента, від якої залежить енергетична ефективність стояння та ходьби.

Суттєвим є те, що поліпшення спіно-пельвічних параметрів не було повністю однорідним між традиційними підгрупами. Порівняльний аналіз, наведений у табл. 3.1.6, показав, що контрольна підгрупа характеризувалася більшою тривалістю операції, більшою крововтратою та довшою госпіталізацією, але водночас давала дещо більший приріст міжтілової висоти та центральних морфометричних параметрів каналу.

Таблиця 3.1.6.

Показники функціонального стану хребта до та після традиційного хірургічного лікування

Показник	До операції	Після операції / 6 міс.	Δ	p
VAS, бали (до–виписка)	8 [8; 9]	6 [5; 7]	3 [2; 3]	<0,001
VAS, бали (до–6 міс.)	8 [8; 9]	4 [4; 5.5]	4 [3; 4]	<0,001
ODI, бали (до–6 міс.)	48 [45; 53]	32 [31; 34]	17 [14.5; 19.5]	<0,001
Зсув хребця, %	20 [16; 30]	10 [5; 15]	10 [10; 15]	<0,001
SVA, см	10 [8; 12]	6 [6; 7]	4 [3; 4]	<0,001
Pelvic tilt, °	28 [24; 30]	25 [22; 28]	2 [2; 2]	<0,001
Sacral slope, °	30 [29; 32]	33 [32; 34]	2 [2; 3]	<0,001
Сегментарний лордоз, °	9 [8; 10]	12 [10; 13]	2 [2; 3]	<0,001
Поперековий лордоз, °	42 [40; 44]	47 [44; 50]	5 [4; 6]	<0,001
Приріст міжтілової висоти, мм	—	13.5 [12.8; 15]	9 [8; 10.5]	—
Приріст висоти міжхребцевого отвору, мм	—	14.9 [14.1; 15.2]	2 [1.9; 2.2]	—

Примітка. Для показників післяопераційного приросту міжтілової висоти та висоти отвору наведено підсумкові значення після втручання і медіану приросту; парне доопераційне порівняння для цих ознак не застосовувалося.

Натомість група стандартної МІЗМТСХ мала скромнішу морфологічну корекцію, але забезпечувала більш швидке раннє зниження болю. Це ще раз підкреслює ключову тезу: традиційні способи лікування формують різні профілі компромісу між анатомічною радикальністю, м'якотканинною травматизацією та раннім функціональним результатом (табл. 3.1.7).

Таблиця 3.1.7

Порівняння двох традиційних технічних варіантів лікування

Показник	Стандартна МІЗМТСХ (n=11)	Інші традиційні МТСХ (n=8)	p між підгрупами	Коментар
Тривалість операції, хв	180 [172; 205]	345 [292; 435]	<0,001	У контрольній підгрупі втручання були тривалішими.
Крововтрата, мл	200 [200; 275]	475 [415; 562]	<0,001	Більш агресивний профіль доступу в контролі.

Показник	Стандартна МІЗМТСХ (n=11)	Інші традиційні МТСХ (n=8)	p між підгрупами	Коментар
Тривалість госпіталізації, діб	9 [8; 12]	10 [9; 16]	0,383	Рання реабілітація у стандартній МІЗМТСХ швидша.
Зменшення болю за VAS, бали	3 [3; 3]	2 [1; 2]	<0,001	Раннє зменшення болю більше в групі порівняння.
Зниження ODI, бали	17 [14.5; 19.5]	16.5 [14.5; 19]	1,000	Функціональне поліпшення через 6 міс. зіставне.
Редукція трансляції, %	10 [10; 15]	10 [10; 11]	0,928	За редукцією зсуву суттєвої різниці немає.

Показник	Стандартна МІЗМТСХ (n=11)	Інші традиційні МТСХ (n=8)	p між підгрупами	Коментар
Приріст дискової висоти, мм	8 [6.5; 9]	10.5 [8.8; 12]	0,021	У контролі приріст міжтілової висоти більший.
Приріст висоти отвору, мм	2.2 [2.1; 2.2]	1.9 [1.9; 2]	0,002	Непряма декомпресія виразніша у групі порівняння.
Приріст площі дурального мішка, мм²	46 [46; 46]	60 [60; 60]	<0,001	Морфометричний виграш центрального каналу більший у контролі.

Примітка. Міжпідгрупові p-рівні обчислено за критерієм Манна-Вітні. Значення тривалості операції, крововтрати та госпіталізації прив’язані до групових медіан.

З погляду клінічної логіки такі відмінності мають цілком раціональне пояснення. Більш виражене збільшення міжтілової висоти саме по собі є позитивним, оскільки відновлює форамінальний простір і покращує умови для редукції зсуву. Проте якщо це досягається ціною більшого обсягу дисекції та ретракції, ранній післяопераційний больовий профіль може виявитися менш

сприятливим. Саме тому при оцінці функціонального стану хребта не можна підміняти реальне відновлення сегмента одним «улюбленим» показником.

Особливу цінність для інтерпретації дали результати кореляційного аналізу (табл. 3.1.8).

Таблиця 3.1.8

Кореляційні зв'язки між морфометричними змінами і функціональним результатом

Параметр	ρ з ΔVAS	p	ρ з ΔODI	p
Приріст передньозаднього діаметра каналу	-0,673	0,002	-0,015	0,952
Приріст площі дурального мішка	-0,871	<0,001	0,000	1,000
Приріст висоти латерального рецесу	-0,831	<0,001	0,158	0,518
Збільшення міжтілової висоти	-0,607	0,006	0,793	<0,001
Збільшення висоти міжхребцевого отвору	0,575	0,010	0,592	0,008
Приріст сегментарного лордозу	0,215	0,377	0,851	<0,001
Приріст поперекового лордозу	0,003	0,990	0,950	<0,001
Редукція трансляції	-0,071	0,772	0,015	0,952

Примітка. ρ — коефіцієнт кореляції Спірмена; ΔVAS — зменшення болю від доопераційного рівня до виписки; ΔODI — зниження індексу Освестрі від доопераційного рівня до 6-місячного спостереження.

Виявлено, що більший приріст параметрів центрального каналу та латерального рецесу асоціювався не з більшим, а з меншим раннім зниженням VAS. На перший погляд така залежність є парадоксальною. Проте вона добре пояснюється тим, що більший морфометричний приріст у межах традиційної когорти частіше досягався у підгрупі з більш травматичним хірургічним профілем. Інакше кажучи, технічна агресивність декомпресії здатна посилити ранній доступ-асоційований біль настільки, що цей фактор тимчасово маскує анатомічний виграш від ширшого каналу. Саме ця інверсна кореляція є одним із найцікавіших результатів, бо демонструє принципову різницю між суто рентгенологічною і справді функціональною ефективністю втручання.

Натомість зв'язок між рентгенометричними змінами та ODI виявився слабким або нестійким. Це також закономірно. Індекс Освестрі інтегрує не тільки біль і неврологічні симптоми, а й повсякденну активність, страх руху, адаптаційні стратегії, реабілітаційний комплаєнс та соціально-поведінкові чинники. Тому однієї лише корекції каналу або трансляції недостатньо, щоб автоматично отримати пропорційне поліпшення за ODI. Для практичної нейрохірургії це має важливий висновок: складні функціональні кінцеві точки не можна повністю «вивести» з морфометрії.

Клінічний аналіз дельт окремих параметрів також має дослідницьке значення. Медіана зменшення болю в pooled-когорті становила 3 [2; 3] бали, а зниження ODI — 17 [14,5; 19,5] балів. Редукція трансляції досягала 10 [10; 10] %, зменшення SVA — 4 [3; 4] см, збільшення міжтілової висоти — 9 [8; 10] мм, висоти міжхребцевого отвору — 2,0 [1,9; 2,2] мм. У сукупності ці дані показують, що традиційне хірургічне лікування впливає на кілька ланок патогенезу одночасно: безпосередньо декомпресує канал, частково відновлює опорну функцію дискового простору, зменшує антелістез і певною мірою нормалізує сагітальний профіль.

Утім, навіть за наявності статистично значущого покращення традиційний підхід не розв'язує проблему повністю. У частини пацієнтів після

операції зберігається залишкова трансляція і неповне відновлення лордозу; розрив між анатомічною і функціональною ефективністю особливо помітний у ранньому післяопераційному періоді; а показники, які характеризують передню колону, покращуються лише в межах, доступних для стандартних кейджів та звичних технічних маніпуляцій. Звідси випливає важливе методологічне положення всього дослідження: подальше вдосконалення лікування має бути спрямоване не просто на «більшу декомпресію», а на досягнення більш оптимального співвідношення між декомпресією, редукцією зсуву, відновленням висоти диска, формуванням сегментарного лордозу та мінімізацією м'якотканинної травми.

Цей висновок добре узгоджується із сучасними даними літератури. Метааналіз A. Hammad та співавт. [88] показав, що мінімально інвазивні TLIF-підходи мають меншу крововтрату і коротший стаціонарний етап, водночас довгострокові клінічні результати за VAS та ODI часто виявляються зіставними з відкритими методиками. Отже, проблема полягає не в тому, чи здатне традиційне лікування дати ефект, а в тому, якою ціною досягається цей ефект і чи можна поліпшити профіль раннього відновлення без втрати стабілізаційного потенціалу.

У межах нашого дослідження власні спостереження щодо традиційного лікування мають ще одну важливу функцію: вони формують контрольну аналітичну платформу для подальшого оцінювання авторської методики. Адже за достатньо детального опису того, як саме традиційні втручання змінюють хребтовий канал, неврологічний статус, біль, ODI і сагітальні параметри, можливо коректно інтерпретувати переваги чи недоліки МІЗМТСХ із дистракційним кейджем.

Неврологічне відновлення після традиційного лікування демонструє характерну ієрархію темпів регресу симптомів. Найшвидше зникає нейрогенна переміжна кульгавість, дещо повільніше — радикулопатія, ще повільніше — чутливі розлади та моторний дефіцит. Ця послідовність добре узгоджується з біологією ураження нервових структур. Симптоми, у яких

домінує динамічний компресійний компонент, зазвичай регресують раніше; симптоми, пов'язані з тривалим аксональним ушкодженням або демієлінізацією, потребують більшого часу.

З клінічного погляду це означає, що оцінювання ефективності операції лише за раннім післяопераційним періодом є недостатнім. Пацієнт може мати суттєве полегшення ходьби вже у перші дні, але ще зберігати оніміння стопи або помірний парез. Якщо не враховувати цю часову стратифікацію симптомів, можна або недооцінити операцію, або, навпаки, переоцінити її лише за раннім зменшенням болю. Саме тому у дослілженні аналіз проведено на щонайменше двох часових горизонтах — ранньому та 6-місячному.

Особливо цікавим є співвідношення між регресом симптомів і динамікою MRC. Формально зміни сили за шкалою MRC можуть виглядати не настільки драматично, як зменшення частоти парезів, але саме це відображає клінічну реальність: у багатьох пацієнтів моторний дефіцит є неповним, а відновлення відбувається поступово, іноді через приріст лише на один бал. З точки зору пацієнта такий приріст може означати суттєве поліпшення ходьби сходами, стабільності стопи чи можливості триваліше стояти. Тому кількісна «скромність» MRC не зменшує її клінічної ваги.

Функціональний профіль післяопераційного відновлення ще складніший. Зменшення VAS у ранньому періоді є сумою двох протилежних векторів: з одного боку — зникає доопераційний компресійний і механічний біль, з іншого — додається ятрогенний біль, пов'язаний із доступом. Саме тому в частини пацієнтів рання динаміка VAS виявляється меншою, ніж можна було б очікувати за величиною анатомічної корекції. Через 6 місяців вплив доступ-асоційованого компонента значною мірою нівелюється, і VAS уже краще відображає стабілізаційно-декомпресивний ефект операції.

Показник ODI, своєю чергою, є ще ширшою інтегральною категорією. Він реагує не тільки на біль і неврологічний дефіцит, а й на м'язову витривалість, впевненість у русі, швидкість соціальної реадаптації, психологічну оцінку власного стану та якість реабілітації. Саме тому в нашому

матеріалі ODI покращувався достовірно, але його зміни не корелювали жорстко з окремими морфометричними параметрами. Для дослідницької інтерпретації це принципово: функціональна реальність хворого є складнішою, ніж набір рентгенометричних цифр.

Параметри сагітального профілю, які традиційно іноді розглядають як другорядні, у власній роботі набули інтегрального значення. Зменшення SVA і PT при одночасному зростанні SS та лордотичних показників означає, що після операції пацієнт переходить у більш енергетично ощадний вертикальний баланс. Це не просто «красива рентгенограма». Це передумова для зменшення втомлюваності при ходьбі, потреби у компенсаторному напруженні тазостегнового комплексу та хронічному перенапруженні паравертебральних м'язів. Саме тому навіть відносно невеликі зміни цих параметрів можуть мати відчутне клінічне відображення.

У той самий час наші дані показали, що традиційні способи стабілізації мають обмежений резерв для глибокої перебудови сегментарної геометрії. Збільшення лордозу й міжтілової висоти було статистично значущим, але не завжди достатнім для повного відновлення функціональної архітектоніки сегмента. У клінічному вимірі це означає, що навіть після успішної декомпресії та помітного регресу болю частина хворих може зберігати залишкове навантаження на задні елементи або не досягати оптимальної просторової організації рухового сегмента.

Саме поєднання цих спостережень (ефективність традиційного лікування і водночас його неповна оптимальність) має наукову цінність. Воно дозволяє перейти від простого опису клінічної серії до формулювання конструктивного наукового завдання: не відмовлятися від принципів декомпресії та стабілізації, а шукати такий варіант їх реалізації, який дає більший морфофункціональний виграш за меншої доступ-асоційованої ціни.

Для дослідницької логіки важливо окремо наголосити, що результати традиційного лікування не слід трактувати за принципом «успіх або невдача». Насправді йдеться про градієнт ефективності, де кожен компонент операції

має свою ціну, свій часовий профіль і свою клінічну користь. Центральна декомпресія швидше впливає на нейрогенну кульгавість; відновлення форамінального простору — на радикулопатію; стабілізація сегмента — на механічний біль; формування сегментарного лордозу і нормалізація сагітального балансу — на довготривалу енергетичну ефективність стояння і ходьби. Саме тому акцент зроблено на багаторівневому аналізі результату.

Власний матеріал переконливо демонструє, що післяопераційний результат за дегенеративного спондилолістезу є типовим прикладом того, як рентгенологічний, неврологічний і функціональний виміри не збігаються повністю в часі. Морфологічна декомпресія досягається в операційній; частковий регрес болю відбувається вже в ранньому післяопераційному періоді; чутливість і м'язова сила відновлюються повільніше; а стабілізаційний і біомеханічний ефект повною мірою можна оцінювати лише через місяці. Така послідовність відповідає реальному перебігу післяопераційної адаптації.

Ще один принципово важливий момент полягає у співвідношенні між «декомпресією» та «реконструкцією». Традиційні методики зазвичай добре пораються із завданням прямої декомпресії. Проте реконструкція рухового сегмента (відновлення висоти диска, корекція трансляції, формування лордозу, оптимізація контакту між кейджем і замикальними пластинками) часто залишається частковою. Саме тому навіть за наявності позитивної динаміки за VAS та ODI певна частина пацієнтів зберігає залишкову симптоматику або менш повно відновлює толерантність до навантаження.

У цьому контексті досить показовим є той факт, що вихідний pelvic tilt у контрольній підгрупі був вищим, ніж у групі стандартної МІЗМТСХ. З клінічного погляду це означає більш виражену компенсаційну ретроверсію таза, тобто менш сприятливий вихідний сагітальний профіль. Після операції показник PT поліпшувався в обох підгрупах, але базова різниця не зникала повністю. Це пояснює, чому просте порівняння післяопераційних чисел без урахування вихідного фенотипу може бути оманливим.

Так само суттєвою є різниця між раннім і віддаленим результатом. Зменшення болю на момент виписки значною мірою залежить від доступу, обсягу м'язової травми й реактивного набряку. Натомість результат через 6 місяців уже більше відображає стабілізаційну здатність конструкції, якість формування міжтілового блоку, ступінь редукції зсуву та реабілітаційний ресурс пацієнта. У нашому матеріалі саме таке розшарування ранніх і віддалених ефектів простежується досить чітко. Це ще раз підтверджує, що оцінювання традиційного лікування повинно бути багаточасовим.

Окремо слід підкреслити роль міжтілової висоти. Її приріст у традиційній когорті не був лише геометричним спостереженням. Збільшення дискового простору напряму пов'язане з відновленням висоти міжхребцевого отвору, зменшенням навантаження на фасеткові суглоби, покращенням умов для непрямої декомпресії та з можливістю часткової редукції антелістезу. Саме тому показник приросту міжтілової висоти у даному підрозділі слід розглядати як функціонально значущу величину. Водночас межі цього приросту в стандартних умовах і стали одним із тих спостережень, які в подальшому спрямували автора до пошуку дистракційного рішення.

Результати дослідження мають і ширший методологічний зміст. Вони демонструють, що традиційна хірургія за дегенеративного спондилолістезу не може оцінюватися виключно за одним критерієм, — наприклад, за ступенем редукції зсуву чи за зменшенням болю. Для справді доказового висновку потрібне поєднання щонайменше чотирьох площин оцінювання: анатомічної декомпресії, неврологічного регресу, функціонально-больового результату та відновлення локального і глобального сагітального профілю. Саме таку багатовимірну модель і було реалізовано у дослідженні.

Не менш важливим є й те, що традиційна когорта виявилася цінною моделлю для виявлення обмежень доступу. Частота доступ-асоційованих подій (кровотечі, транзиторного радикуліту, м'язової атрофії) хоч і не нівелювала загальний позитивний результат лікування, але суттєво впливала на комфорт раннього післяопераційного періоду і, відповідно, на швидкість

функціональної мобілізації пацієнта. У практичному сенсі це означає, що пошук нових рішень у хірургії спондилолістезу має бути спрямований не лише на кращу редукцію чи більшу декомпресію, а й на зменшення біологічної вартості доступу.

Саме такий висновок узгоджується і з сучасною літературою. Рандомізоване дослідження Nordsten-DS [179] не заперечує ефективності fusion як концепції, але показує, що питання обсягу і форми стабілізації не має універсальної відповіді. З іншого боку, метааналітичні дані щодо MIS-TLIF і відкритих TLIF вказують, що зменшення м'якотканинної травми здатне покращити ранній профіль відновлення без очевидної втрати довгострокової ефективності. Отже, головним напрямком удосконалення є оптимізація співвідношення між біомеханічною корекцією і ятрогенним навантаженням на тканини.

Саме цей аспект дослідження закладає основу для наступних дослідницьких кроків. По-перше, він показує, які параметри функціонального стану хребта слід вважати ключовими кінцевими точками. По-друге, ідентифікує ті вузькі місця традиційного підходу, які потребують інженерного і хірургічного вдосконалення: неповна реконструкція передньої колони, обмежений резерв корекції сегментарного лордозу та виражена залежність раннього функціонального результату від травматичності доступу. Таким чином, цей нюанс має не лише описове, а й концептуально-конструкторське значення для всього дослідження.

У підсумку можна сказати, що традиційне оперативне лікування пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом у власному матеріалі продемонструвало достатню клінічну ефективність і водночас виявило ряд закономірностей, які не видно за поверхневого аналізу. Воно добре зменшує стеноз, покращує неврологічну симптоматику і частково відновлює біомеханічні параметри сегмента, але робить це в межах компромісу між радикальністю і травматичністю. Саме ця подвійність

результату (позитивна, але не оптимальна) і стала науковим мотивом для подальшого розвитку авторської технології.

Наукова коректність дизайну полягає в тому, що в дослідженні важливі не лише підсумкові медіани та p-рівні, а і внутрішня причинно-наслідкова логіка даних. Для розуміння того, чому після операції відбувається той чи інший неврологічний регрес, недостатньо знати лише групову медіану VAS або ODI. Потрібно бачити, як в одного й того самого пацієнта змінюються морфометрія каналу, ознаки корінцевого дефіциту, показники болю і параметри сагітального профілю. Саме тому реконструкція індивідуальних траєкторій має не декоративне, а методичне значення.

Окрема цінність становить кореляційний аналіз. Саме за індивідуалізованого масиву стає можливим продемонструвати важливу дисоціацію між величиною морфометричного виграшу та раннім зниженням болю. Саме ця знахідка є однією з концептуально найвагоміших, оскільки виводить дослідницький аналіз за межі традиційного опису «до і після» і дозволяє побачити тонші закономірності взаємодії між рентгенологічним і функціональним результатом.

Сучасна доказова база щодо хірургічного лікування дегенеративного спондилолістезу залишається неоднорідною, і саме тому локальний клінічний матеріал набуває особливої ваги. З одного боку, оглядові публікації та настанови підкреслюють, що показання до операції формуються за наявності неврологічного дефіциту, резистентного больового синдрому та нестабільності. З іншого боку, рандомізовані дослідження останніх років показують, що для окремих фенотипів пацієнтів декомпресія без додаткової інструментальної fusion може мати зіставні віддалені результати з більш широкими стабілізаційними підходами. Це означає, що універсальної відповіді для всіх пацієнтів не існує, а клінічний контекст і морфологічний профіль залишаються визначальними.

У цьому контексті результати дослідження мають вигляд особливо інформативних. Вони показують, що в реальній клінічній когорті з вираженим

нейрокомпресійним синдромом традиційне декомпресивно-стабілізуюче лікування не лише зменшує біль, а й змінює геометрію сегмента, покращує показники каналу та частково відновлює сагітальний баланс. Отже, для пацієнтів із клінічно значущим дегенеративним спондилолістезом fusion-компонент операції має не абстрактне, а цілком конкретне механістичне значення.

Разом із тим наші дані не суперечать і тим роботам, які наголошують на важливості мінімізації доступ-асоційованої травми. Саме це ілюструє інверсний зв'язок між більшою морфометричною декомпресією та менш вираженим раннім зниженням VAS. Такий результат добре узгоджується з метааналітичними даними щодо MIS-підходів, де переваги найчастіше проявляються у менших крововтратах, коротшій госпіталізації та кращому ранньому відновленні, тоді як віддалені результати за VAS та ODI можуть бути подібними.

Власний матеріал також додає важливий нюанс до питання про роль сагітального профілю. У багатьох клінічних серіях він розглядається як додаткова або навіть факультативна характеристика. У нашому ж дослідженні покращення PT, SS, SVA, сегментарного і загального лордозу мало послідовний характер і виявилося тісно пов'язаним із концепцією відновлення функціонального стану хребта. Це дозволяє трактувати спіно-пельвічні параметри не як другорядні рентгенологічні деталі, а як інтегральні маркери успішності реконструкції рухового сегмента.

Таким чином у рамках нашого дослідження не лише відтворено результати власних клінічних спостережень, а й позиціоновано їх у сучасному міжнародному науковому полі. Показано, що реальна сила традиційної хірургії полягає у її здатності розв'язувати проблему нейрокомпресії та нестабільності одночасно, а її слабкість — у компромісі між біомеханічною реконструкцією та м'якотканинною ціною доступу. Саме з цього протиріччя й народжується наукова доцільність подальшої розробки більш збалансованої технології стабілізації.

3.1.4. Висновки до підрозділу 3.1.

1. Аналіз конвенційної когорти, до якої увійшли 19 пацієнтів традиційного етапу лікування (11 — група порівняння, 8 — контрольна група), показав, що традиційне декомпресивно-стабілізуюче втручання у пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта забезпечує статистично значуще покращення морфометричних параметрів хребтового каналу, неврологічного статусу та інтегральних показників функціонального стану хребта.

2. Після традиційного хірургічного лікування відбувалося достовірне збільшення передньозаднього діаметра центрального каналу, площі дурального мішка та висоти латерального рецесу, що підтверджує ефективність декомпресії як морфологічного етапу операції. Разом із тим ступінь цього покращення був неоднорідним між пацієнтами і залежав від конкретного варіанта втручання, рівня ураження та вихідної тяжкості стенозу.

3. Неврологічна динаміка після традиційного лікування характеризувалася швидким регресом нейрогенної переміжної кульгавості, більш повільним зменшенням радикулопатії та чутливих розладів і відтермінованим відновленням моторного дефіциту. Це свідчить, що клінічний ефект декомпресії є багатокомпонентним і не може бути зведений лише до факту розширення каналу.

4. Традиційне оперативне лікування приводило до значущого поліпшення функціонального стану хребта: зменшувалися інтенсивність болю та неповносправність за ODI, знижувалася величина трансляції хребця, покращувалися параметри глобального та сегментарного сагітального профілю, збільшувалися міжтілова висота та висота міжхребцевих отворів. Отже, операція впливала як на нейрокомпресійний, так і на механічний компонент патології.

5. Між окремими традиційними технічними варіантами виявлено характерний профіль компромісу: більш виражене морфометричне

розширення каналу та більший приріст міжтілової висоти не завжди супроводжувалися кращим раннім клінічним самопочуттям пацієнта, що пов'язано з більшою доступ-асоційованою травматизацією. Таким чином, ступінь анатомічної декомпресії не є тотожним функціональній ефективності лікування.

6. Результати мають подвійне значення: вони, з одного боку, обґрунтовують клінічну доцільність традиційного декомпресивно-стабілізуючого лікування, а з іншого — виявляють його межі, що створює наукову передумову для розробки та клінічної апробації способу МІЗМТСХ із використанням дистракційних кейджів.

3.2. Результати оцінювання можливості відновлення показників функціонального стану хребта із використанням дистракційних кейджів

Математичне моделювання біомеханічних систем стає одним з основних методів дослідження. Для визначення внутрішнього напружено-деформованого стану (НДС) біомеханічних моделей найбільш популярним став метод скінченних елементів (МСЕ). За допомогою методу скінченних елементів можна досліджувати складні тривимірні моделі, а також швидко проводити розрахунки при зміні параметрів моделі, що дає можливість враховувати вплив зміни одного параметра на результат розрахунку всієї моделі. Крім того, МСЕ надає інформацію, яку неможливо отримати звичайними методами вимірювань і дає можливість моделювати ситуації, які неможливо виміряти експериментальними методами. Одним з важливих прикладів такого дослідження є оцінка розподілу напружено-деформованого стану (НДС) в хребті.

Розвиток обчислювальної потужності комп'ютерних систем, побудова стійких алгоритмів вирішення завдань за допомогою МСЕ привели до можливості аналізу різних моделей травм і захворювань хребетного стовпа. У літературі досить багато робіт присвячено вивченню хребта за допомогою

МСЕ. Були проаналізовані поперековий відділ хребта [180–182], грудо-поперековий відділ хребта [183, 184] і в меншій мірі весь хребет в цілому [185, 186], що пов'язано зі складністю побудови геометричної моделі і моделювання її правильної функціональної поведінки.

Найближчими до завдання нашого дослідження є дизайни робіт [187–190], у яких проводиться аналіз в структурах на предмет міжтілового спондилодезу. Існує широкий спектр конструкцій і видів матеріалів кейджів для спинномозкових імплантатів, які можуть використовуватися за спондилодезу хребта, але імплантати, які використовуються при цьому, часто викликають вихід з ладу замикальної пластини, що може призвести до травми і біомеханічної нестабільності. Існує чотири різних типи матеріалів, які використовують для виготовлення кейджа: металевий, керамічний, полімерний і композитний.

У роботі [190] автори проаналізували поведінку імплантату, виготовленого з двох різних матеріалів: PEEK і полімолочна кислота (англ. polylactic acid, PLA). Дослідження проведено за допомогою МСЕ. Було побудовано модель для хребців L4 і L5. На підставі результатів моделювання автори прийшли до висновку, що в цілому за використання матеріалу PEEK спостерігаються більш високі напруження у замикальній пластині.

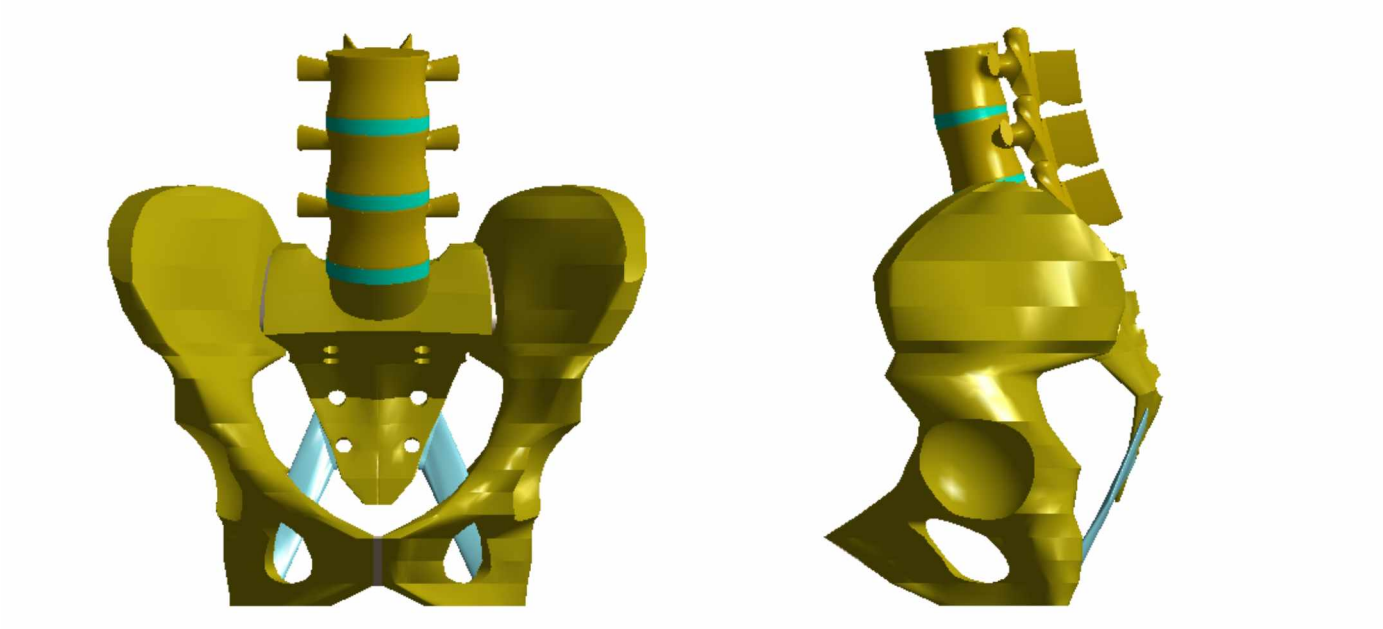
У роботі [189] автори провели порівняльний аналіз імплантату PEEK і титанового імплантату на предмет заднього поперекового міжкорпусного спондилодезу. Це дослідження дозволило оцінити біомеханічний ефект, який ці типи імплантатів з різним рівнем твердості чинять на хребець пацієнтів з остеопорозом. Це дослідження показало, що імплантати PEEK в хребцях з остеопорозом у порівнянні з титановими імплантатами менш схильні до осідання, викликаного мікротріщинами кісткової тканини.

У роботі [188] автори також оцінили вплив імплантатних матеріалів на НДС моделі. Було розглянуто модель хребців L3 і L4. В результаті досліджень як кращу альтернативу і дешевий матеріал було обрано титановий сплав для металевих імплантатів і PLA для композитних імплантатів.

Негативні аспекти імплантатів PEEK (незрощення кістки тощо), незважаючи на кращу біомеханічну стійкість, змушують дослідників вести подальший пошук різних типів імплантатних конструкцій і матеріалів. Так, автори [187] у своїй роботі досліджують новий композитний хребетний кейдж, який має пористу структуру з титанового сплаву. У недавньому експерименті на тваринах підтверджено припущення про кращий ступінь зрощення, ніж для кейджа PEEK і меншу просадку, ніж для титанового кейджа.

Одним із завдань нашого дослідження став аналіз НДС нового міжтілового опорного пристрою та порівняння його з міжтіловою опорою з матеріалу PEEK хребетного блоку L5-S1 та заднього спондіолодезу.

3.2.1. Біомеханічна модель функціонального стану хребта. Для побудови розрахункової моделі як основу було використано інтактну модель тазу лабораторії біомеханіки ІППС імені М. І. Ситенка з крижем і блоком хребців L3–L5 (рис. 3.1). У неушкоджену модель було внесено такі зміни. Міжхребцевий диск L5–S1 було замінено стандартною міжтіловою опорою з матеріалу PEEK. Задній спондилодез L4–S1 (рис. 3.2). Міжхребцевий диск L5–S1 було замінено новою міжтіловою опорою. Задній спондилодез L4–S1 (рис. 3.3).



а б

Рис. 3.1. Інтактна модель

Примітка. Умовні позначки: а — вид спереду; б— вид зліва

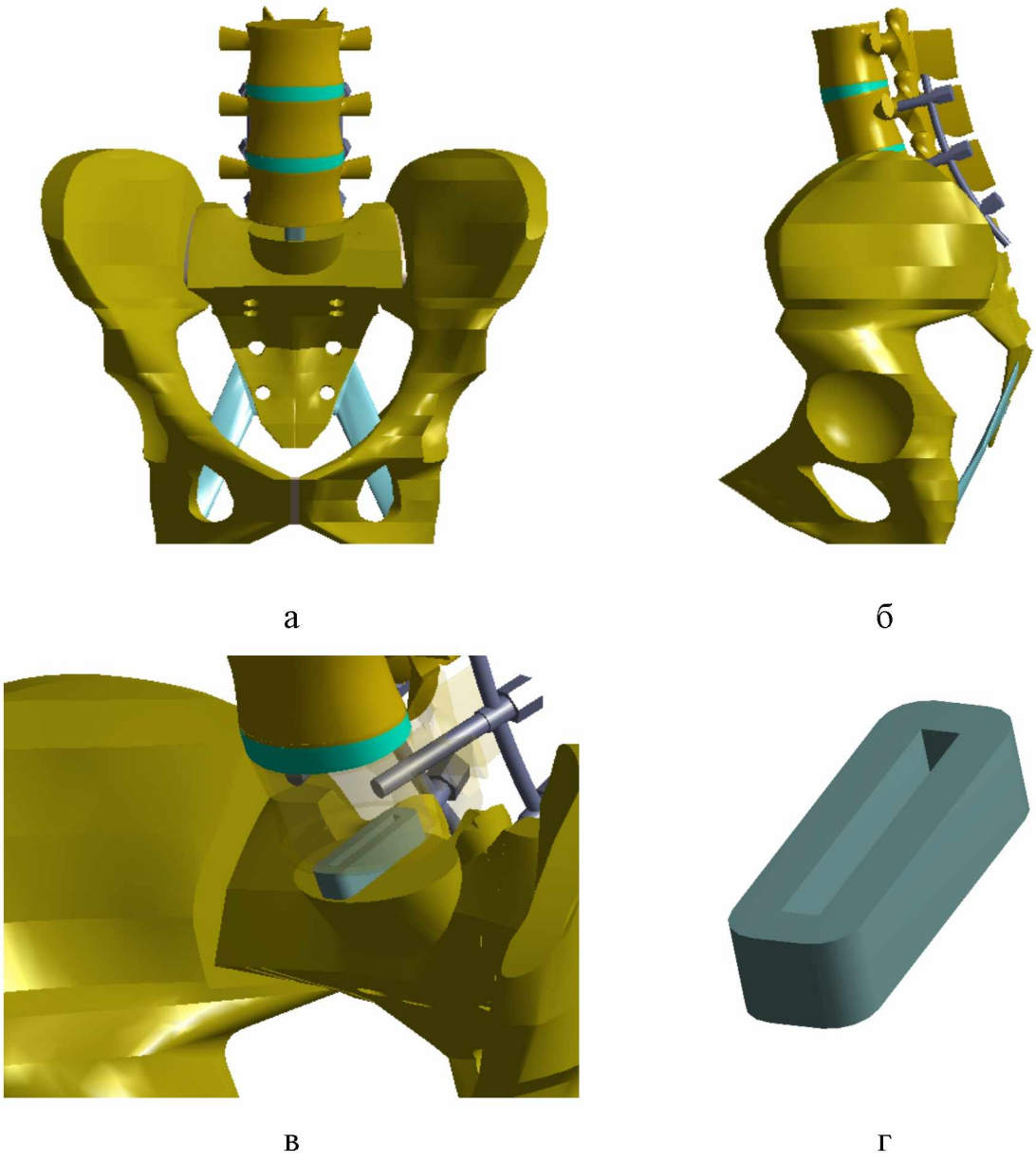
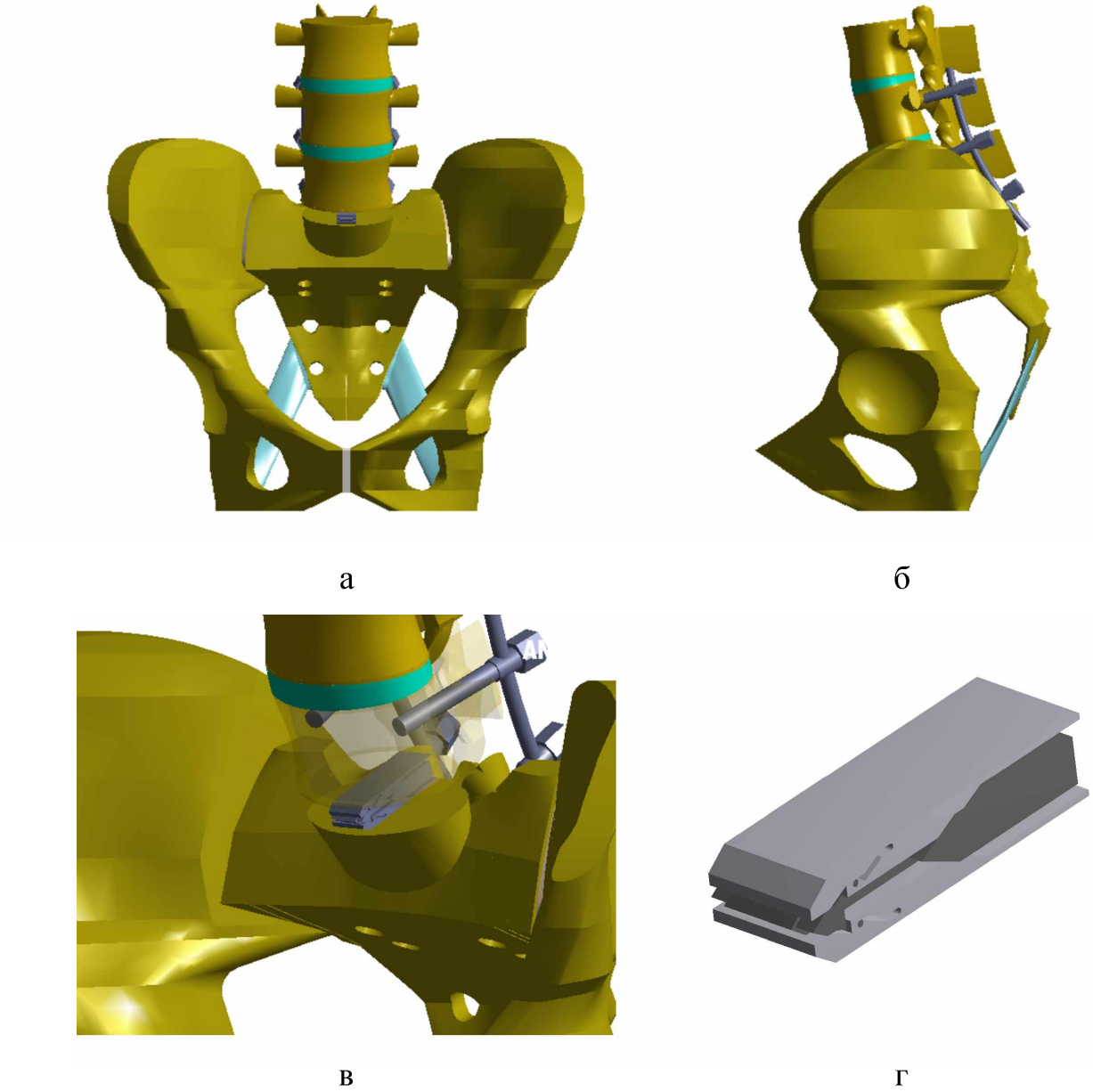


Рис. 3.2. Модель з міжтіловою опорою PEEK

Примітка. Умовні позначки: а — вид спереду; б — вид зліва; в — вид розташування міжтілової опори; г — модель міжтілової опори PEEK.



а б в г

Рис. 3.3. Модель з новою міжтіловою опорою

Примітка. Умовні позначки: а — вид спереду; б — вид зліва; в — вид розташування міжтілової опори; г — модель нової міжтілової опори.

Матеріал вважали однорідним та ізотропним. Під час вибору властивостей кісткових структур і біологічних тканин спиралися на дані, які найбільш часто зустрічаються в літературі [191–193]. Використовувані характеристики (E — модуль пружності (модуль Юнга), ν — коефіцієнт Пуассона) зведено у таблицю 3.2.1.

Таблиця 3.2.2

Механічні характеристики використовуваних матеріалів

Матеріал	Модуль пружності E (МПа)	коефіцієнт Пуассона ν
Коркова кістка	12000	0,3
Губчаста кістка	100	0,2
Міжхребцевий диск	4,2	0,45
Хрящ	5,6	0,45
PEEK	2200	0,34
Сталь	210000	0,3

Примітка. Таблиця містить вхідні механічні параметри матеріалів для скінченно-елементного аналізу. Параметри використано для моделювання розподілу напружень у системі фіксації та міжтілової опори.

Було розглянуто варіант вертикального двохопорного стояння. Згідно з результатами дослідження [184, 194], навантаження на хребет у неушкодженій моделі розподіляється між тілом хребця і суглобовими відростками. У нашій моделі, згідно з даними дослідження [184], 75 % навантаження припадає на тіло хребця L3 і 25 % — на його суглобові відростки. Основним навантаженням є маса тіла. У цьому дослідженні маса тіла дорівнює 700 Н. Без урахування ваги нижніх кінцівок, на верхню поверхню тіла хребця L3 і його суглобові відростки прикладається сила у 422 Н. Місце застосування і напрямок зусиль представлено на рис. 3.4. Модель закріплено у вертлюжних западинах.

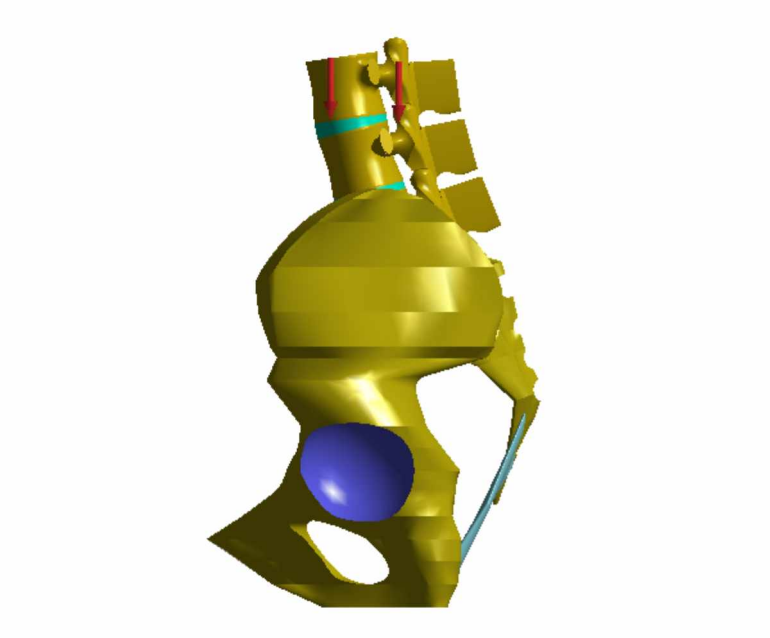
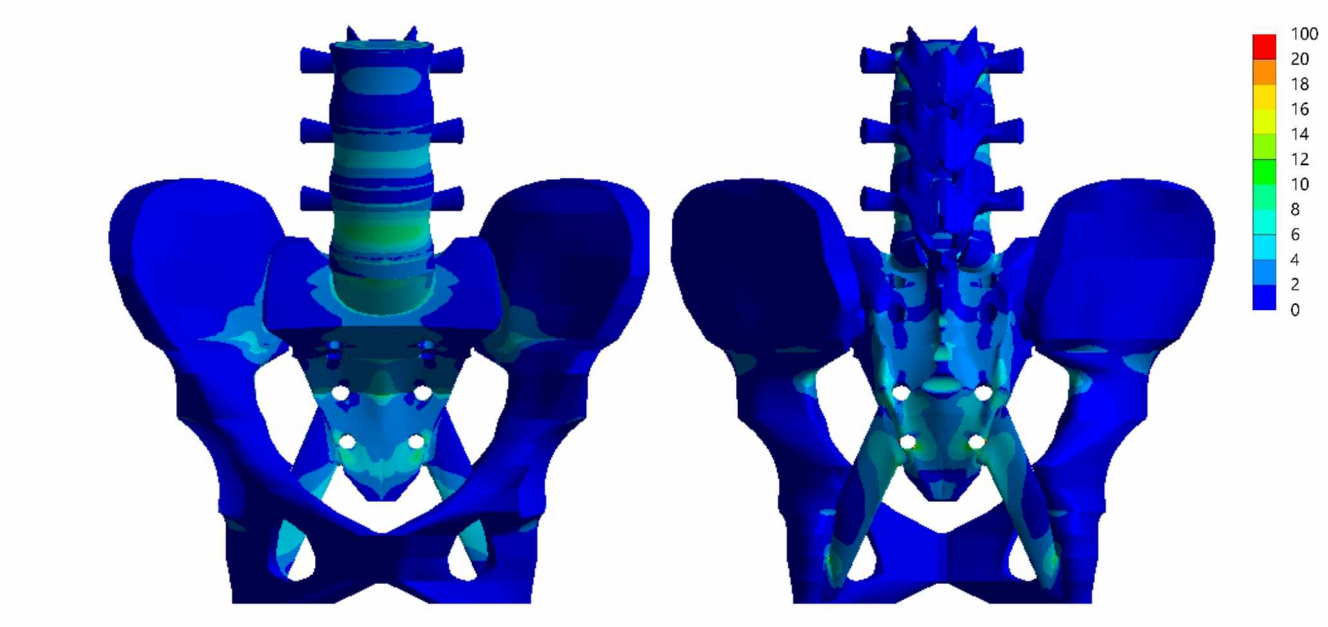


Рис. 3.4. Навантаження і фіксація в проєктній моделі

3.2.2. Аналіз напружено-деформованого стану у системі «транспедикулярна конструкція – хребтовий руховий сегмент-дистракційний кейдж». Результати аналізу результатів розрахунку моделі в нормі (рис. 3.5) показали, що рівень напруження в блоці хребців L3–S1 варіюється в межах 15 МПа. Найбільш напруженим є хребець L5. У передній частині рівень напруженого стану досягає значення 9,4 МПа. На нижній поверхні тіла хребця L5 значення напруження за Мізесом становить 14,8 МПа.



а б

Рис. 3.5. Інтактна розрахункова модель

Примітка. Умовні позначки: а — вид спереду; б — вид ззаду.

З розрахунку можна зробити такі висновки. У хребетному блоці L3-S1 розподіл НДС відбувається по-різному. Більш напруженою є передня частина тіл хребців, а також верхня і нижня поверхні тіл хребців, де рівень напруження досягає значення 14,8 МПа для хребця L5. Комплекс задньої підтримки менш напружений.

У розрахункову модель було внесені наступні зміни: міжхребцевий диск L5–S1 було замінено імплантатом з PEEK. Застосувався задній спондіолодез L4–S1.

Результати аналізу результатів розрахунку моделі в порівнянні з інтактною моделлю (рис. 3.6) показали, що змінився характер розподілу НДС у хребетному блоці L3–S1.

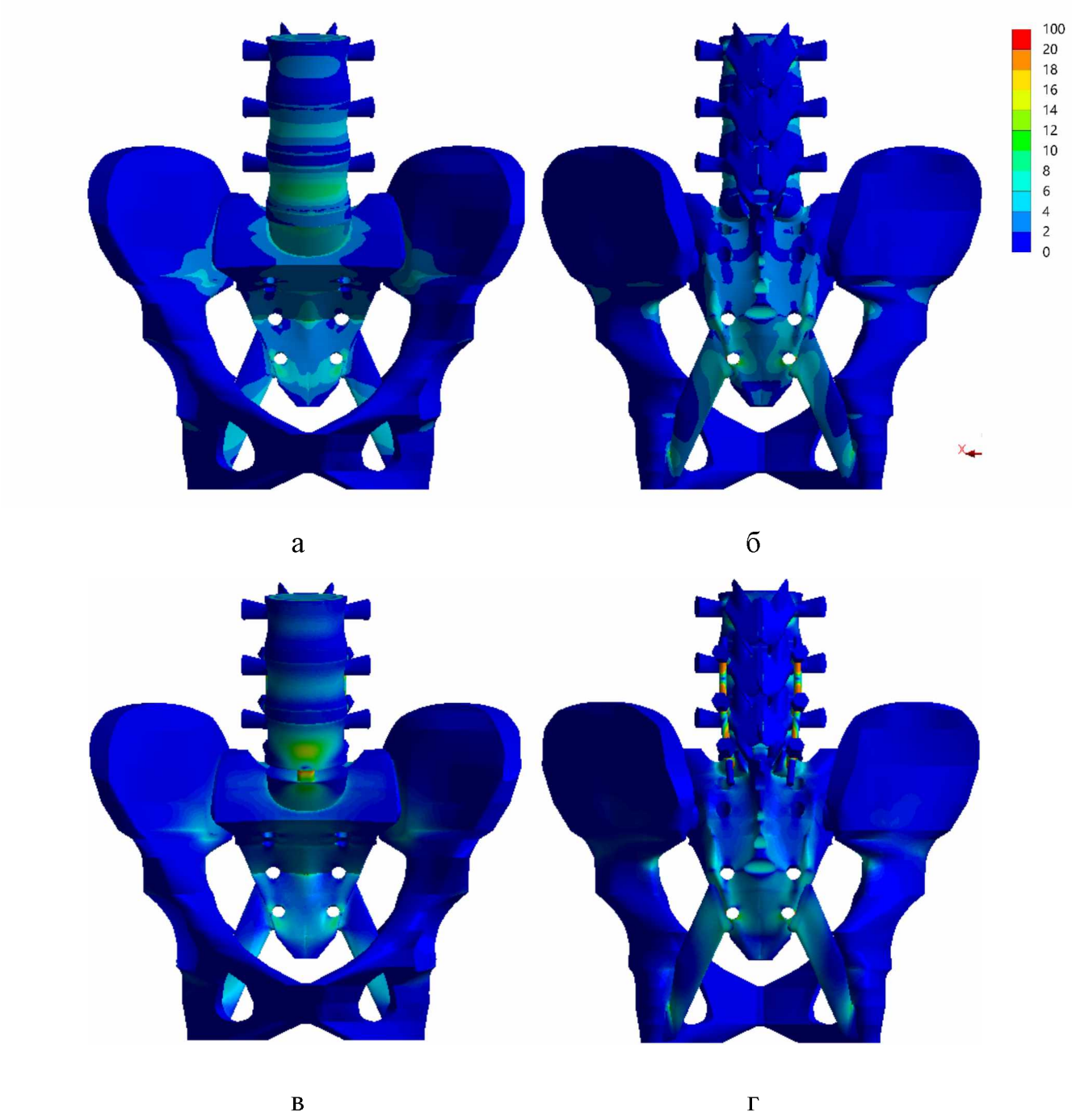


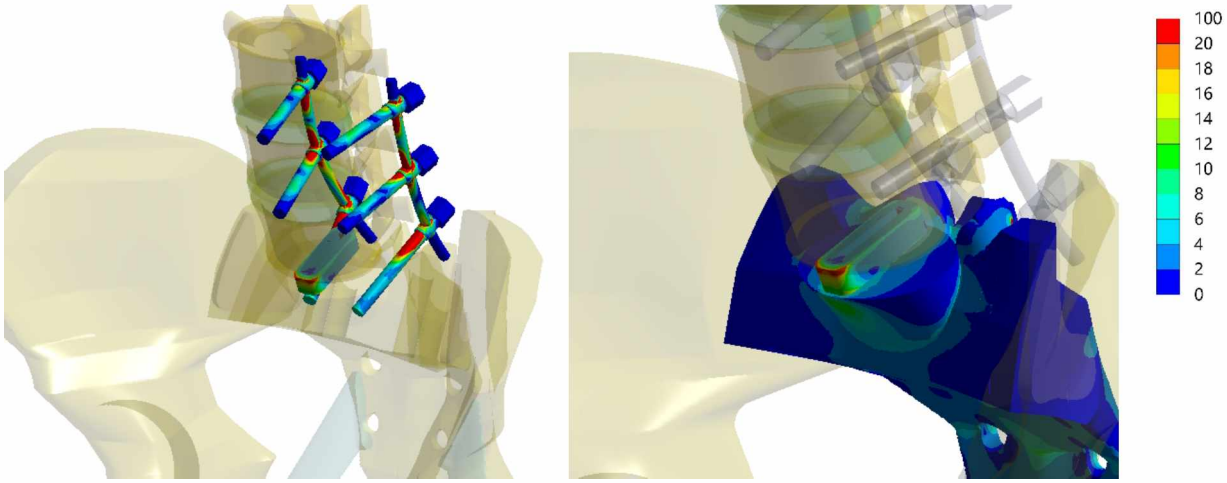
Рис. 3.6. Розподіл напруження за Мізесом у інтактній і розрахунковій моделях

Примітка. Умовні позначки: а, б — інтактна модель; в, г — розрахункова модель

Рівень напруженого стану зріс. Рівень напруження у хребці L5 на передній поверхні тіла хребця досягає значення 14,7 МПа (9,4 МПа в інтактній моделі), а на нижній площині тіла хребця 40,2 МПа (14,8 МПа в інтактній

моделі). В хребці S1 максимальний рівень напруження досягає значення 13,5 МПа (8,1 МПа в інтактній моделі).

Напружений стан в ділянці міжтілової опори і у фіксуючій конструкції представлено на рис. 3.7.



а б

Рис. 3.7. Розподіл напруження за Мізесом

Примітка. Умовні позначки: а — у міжтіловій опорі та фіксуючій конструкції; б — у міжтіловій опорі і хребці S1.

У міжтіловій опорі передня частина більш напружена, і рівень напруженого стану досягає значення 35,7 МПа. Максимальні значення напруження за Мізесом у точках входу гвинтів в кістку спостерігаються у хребця S1 — 27,3 МРа. У фіксуючій конструкції в місцях кріплення гвинтів зі стрижнями рівень напруження досягає значення 80,8 МПа.

З розрахунку можна зробити такі висновки. Характер розподілу НДС в блоці хребців L3–S1 змінився у порівнянні з інтактною моделлю. Тіла хребців L5 і S1 стали більш напруженими. У зоні контакту фіксуючої структури з кістковою тканиною ділянки концентрації напружень розташовуються в місцях входу гвинтів в кістку.

У конструктивну модель було внесено такі зміни: міжхребцевий диск L5–S1 було замінено імплантатом нової конструкції. Застосовано задній спондилодез L4–S1.

Дані аналізу результатів розрахунку моделі у порівнянні з попередньою моделлю (рис. 3.8) показали, що характер розподілу НДС у блоці хребців L3-S1 не змінився.

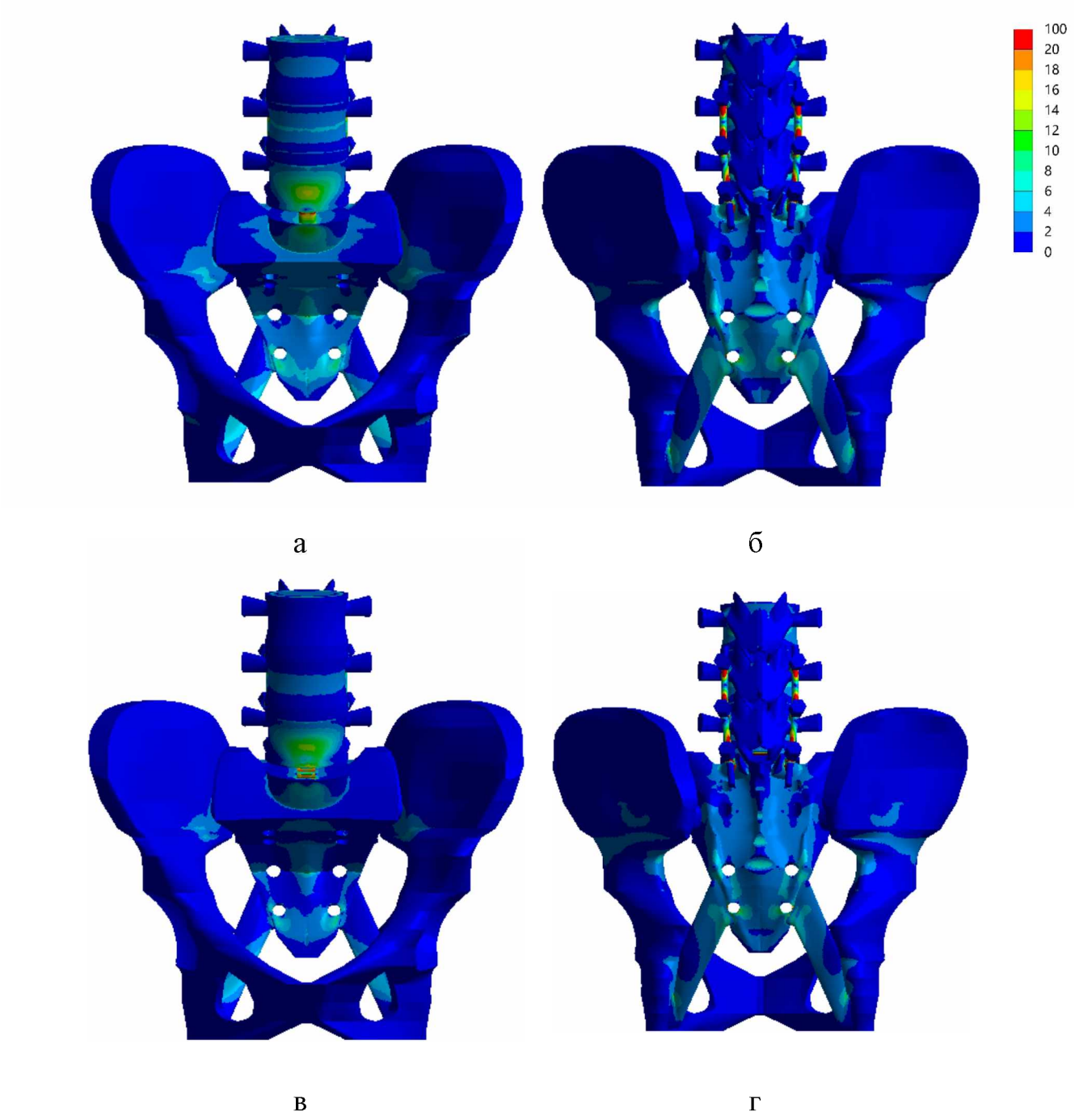


Рис. 3.8 Розподіл напруження за Мізесом у моделі з імплантатом PEEK і в моделі з новим імплантатом

Примітка. Умовні позначки: а, б — модель з імплантатом PEEK; в, г — розрахункова модель

Рівень напруження в хребці L5 на передній поверхні тіла хребця досягає значення 14,7 МПа (14,1 МПа в моделі з імплантатом PEEK), а на нижній площині тіла хребця 40,7 МПа (40,2 МПа в моделі з імплантатом PEEK). У

хребці S1 максимальний рівень напруження досягає значення 14,5 МПа (13,5 МПа в моделі з імплантатом PEEK).

Напружений стан в ділянці міжтілової опори і у фіксуючій конструкції представлено на рис. 3.9.

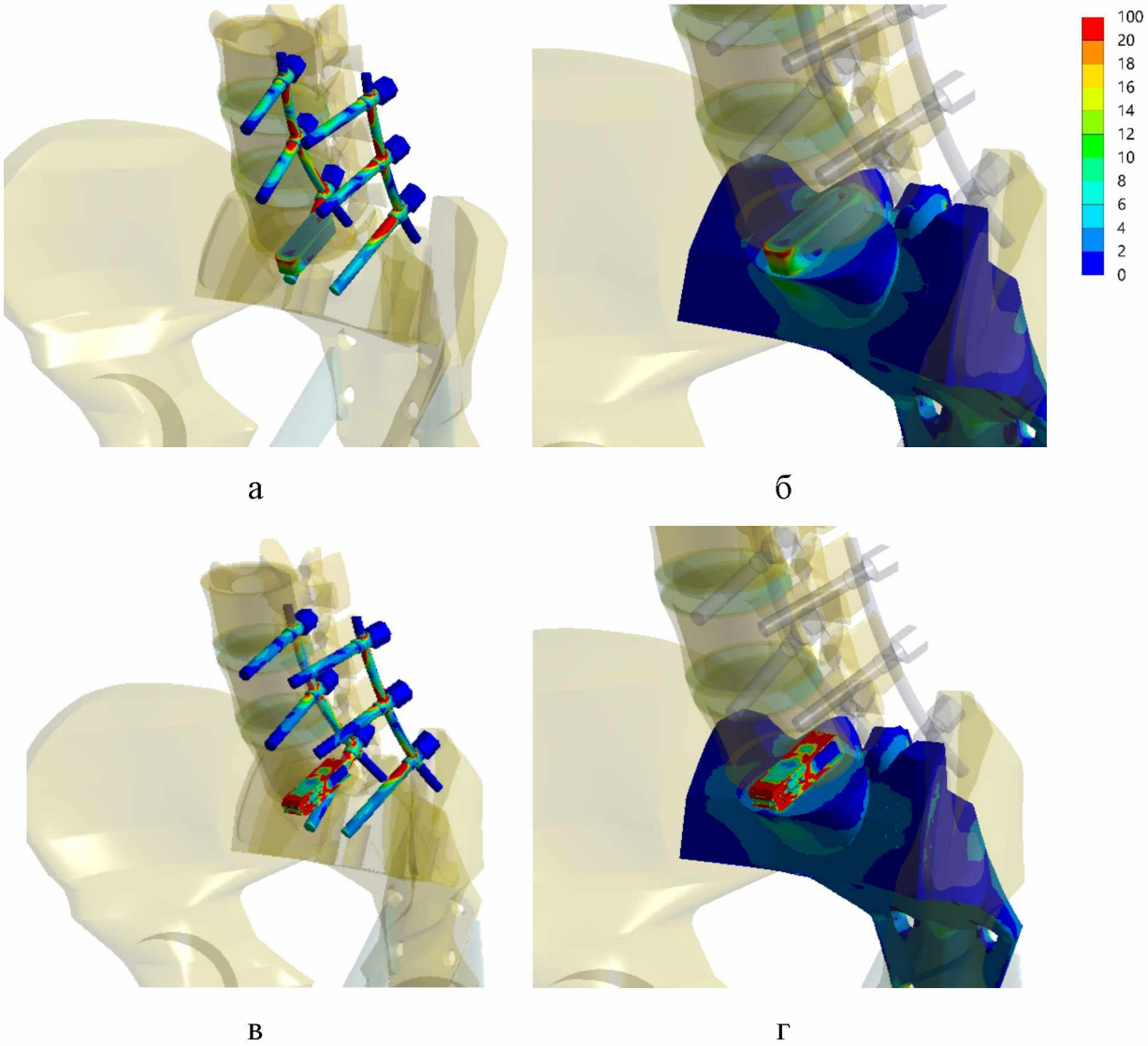


Рис. 3.9. Розподіл напруження за Мізесом

Примітка. Умовні позначки: а — у міжтіловій опорі та фіксуючій структурі; б — у міжтіловій опорі і хребці S1.

Для міжтілової опори більш напруженою є передня частина, де рівень напруженого стану досягає значення 113,3 МПа (27,3 МПа в моделі з імплантатом PEEK). Максимальні значення напруження за Мізесом у точках

входу гвинтів в кістку спостерігаються в хребці S1 — 17,8 МПа (35,7 МПа в моделі з імплантатом PEEK). У фіксуючій структурі, у вузлах кріплення гвинтів зі стрижнями, рівень напруження досягає значення 72,2 МПа (80,8 МПа в моделі з імплантатом PEEK).

На рис. 3.10 наведено порівняння значень максимальних напружень за Мізесом у тілах хребців інтактної і розрахункової моделей

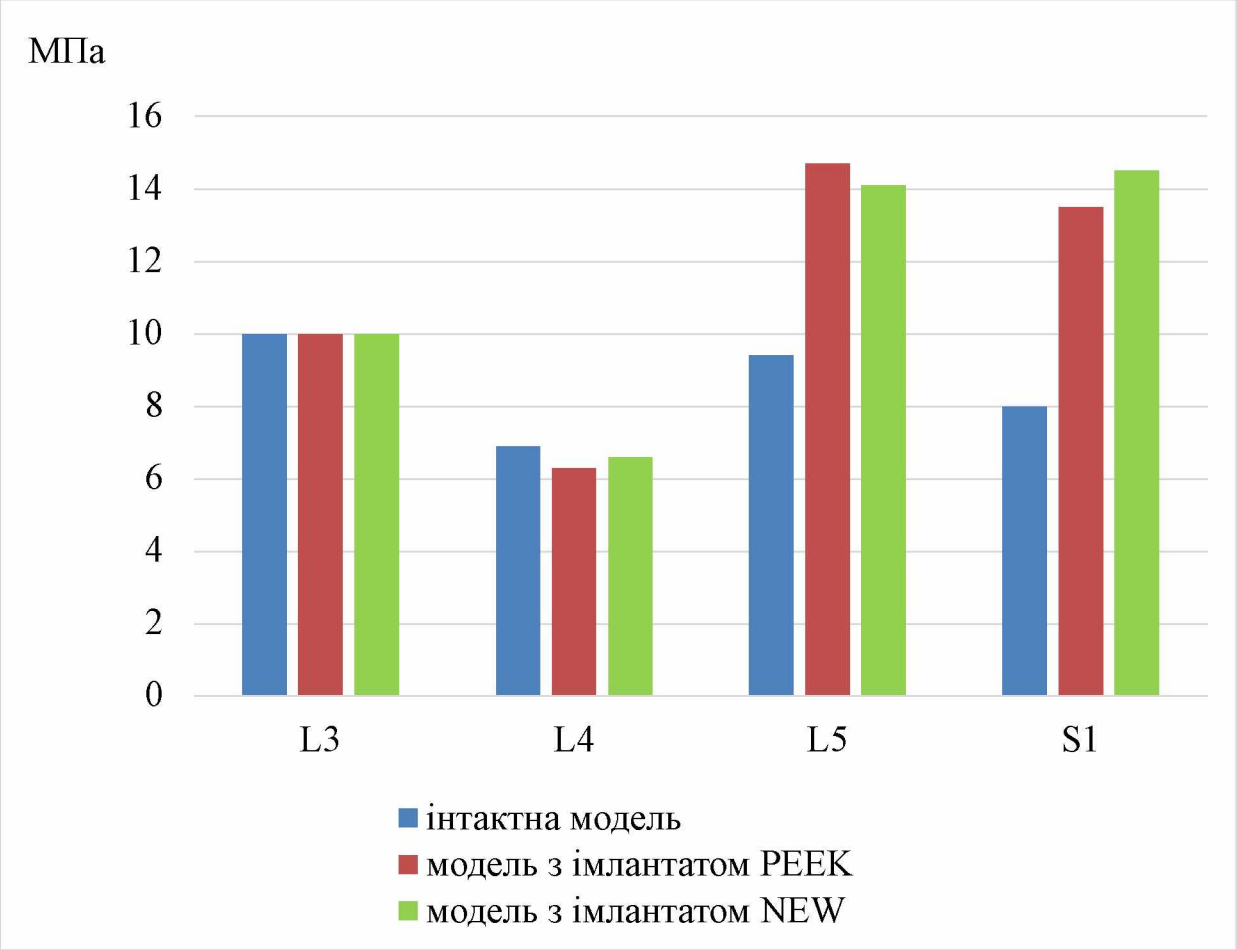


Рис. 3.10. Порівняння максимальних значень напруження за Мізесом у тілах хребців неушкодженої моделі і моделей з імплантатами.

3.2.3. Висновки до підрозділу 3.2.

1. Характер розподілу НДС в блоці хребців L3–S1 не змінився в порівнянні з моделлю PEEK.

2. У тілах хребців L4 і S1 рівень напруження підвищився у порівнянні з моделлю PEEK, а в хребці L5 знизився.

3. Використання більш жорсткої міжтілової опори дозволило знизити напружений стан на вході фіксуючих гвинтів до кістки хребця S1.

4. Більш високий рівень напруження у самій міжтіловій опорі, у порівнянні з моделлю PEEK, не є критичним з точки зору міцності для металу.

3.3. Спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів

На завершальному етапі власних досліджень поєднано два попередні блоки доказів: клінічні спостереження традиційного хірургічного лікування та результати експериментально-біомеханічного моделювання. Вище було показано, що традиційне оперативне лікування дегенеративного спондилолістезу поперекового відділу хребта забезпечує декомпресію невральних структур і покращення функціонального стану, а також обґрунтовано можливість відновлення сегментарного лордозу, спіно-тазового балансу й сприятливого перерозподілу навантажень за використання дистракційного кейджа. Тепер обидві лінії доказів інтегруються у клінічну апробацію авторського способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців.

Тобто, досліджується не просто окремий технічний варіант імплантації кейджа, а завершена реконструктивна технологія, яка спирається на три взаємопов'язані положення. Перше полягає в тому, що для пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом та нейрокомпресійними розладами недостатньо досягти лише локальної декомпресії; потрібне відновлення опорної функції хребетно-рухового сегмента. Друге полягає в тому, що корекція лістезної деформації, висоти диска, форамінального простору та параметрів сагітального профілю має здійснюватися так, щоб не збільшувати механічну ціну конструкції. Третє полягає в тому, що будь-яка нова технологія повинна бути придатною до відтворення у реальній клінічній практиці без

переходу до надмірно складних доступів або надмірного ресурсного навантаження на лікувальний заклад.

Акцент зроблено на узгодженості трьох типів доказів: біомеханічної доцільності; інтраопераційної та ранньої післяопераційної безпеки; клінічно значущого функціонального відновлення. Саме сукупність цих ознак і формує дослідницьке поняття ефективності нового способу.

3.3.1. Обґрунтування і розробка власного способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів. Потреба у розробці авторського способу МІЗМТСХ виникла як відповідь на низку клінічних суперечностей, виявлених під час лікування пацієнтів зі спондилолістезом поперекового відділу хребта. Традиційні задні та задньо-бокові способи міжтілового спондилодезу дозволяють досягати задовільної декомпресії та стабілізації, однак часто роблять це ціною значної локальної травматизації, ретракції невральних структур або обмеженого реконструктивного контролю над міжтіловим простором. У клінічній практиці це проявляється як компроміс між безпечністю доступу і повнотою корекції: чим агресивніше хірург намагається відновити висоту диска, сегментарний лордоз і редукувати лістез, тим вищими можуть бути ризики пошкодження дурального мішка, корінців або замикальних пластинок.

У наших власних спостереженнях стало очевидно, що для пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом та нейрокомпресійними розладами кінцева мета операції має формулюватися ширше, ніж «декомпресія + спондилодез». Фактично йдеться про відновлення функціонального стану ураженого сегмента та його участі у глобальному сагітальному контурі хребта. Саме тому концептуальна основа авторського способу будувалася навколо ідеї контрольованої інтраопераційної дистракції in situ після введення кейджа через обмежений задній доступ. Ця ідея дозволяє розвести в часі два критичні етапи: спочатку безпечне заведення імплантату у міжтіловий простір, а вже

потім — поступову реконструктивну експансію до досягнення цільового обсягу корекції. Така послідовність методично відрізняє запропонований спосіб від стандартного підходу зі статичним кейджем, у якому початковий розмір імплантату значною мірою визначає й межі корекції.

З огляду на це обґрунтування нового способу включало три послідовні логічні кроки. Спочатку було визначено клінічну потребу: зменшити хірургічну агресію та одночасно не втратити реконструктивний потенціал заднього доступу. Далі за допомогою біомеханічної моделі було доведено, що дистракційний кейдж здатний формувати сприятливий профіль навантаження, не погіршуючи напружено-деформований стан системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж». І нарешті, після технічного оформлення способу як окремої хірургічної схеми, виконано його клінічну апробацію. Така послідовність (від проблеми до механічної моделі, а від моделі до клініки) є методологічним нюансом всього дослідження, оскільки дозволяє розглядати авторську методику як translational-розробку, а не лише як локальну хірургічну модифікацію.

Наведені в таблиці 3.2.3 положення демонструють, що розробка способу мала не емпіричний, а цілеспрямований характер.

Таблиця 3.2.3

Концептуальні підстави розробки авторського способу

Позиція	Проблема/вихідне положення	Хірургічний наслідок
Конструктивна проблема стандартного заднього спондилодезу	Неможливість керованої дистракції in situ без додаткової травми	Необхідність імплантату, здатного поєднати введення через обмежений доступ із подальшим контрольованим розкриттям
Біомеханічна ціль	Відновлення висоти диска і сегментарного лордозу без надмірного навантаження на ендплейти	Покращення передньої опори, перерозподіл компресійного навантаження, зменшення навантаження на задню систему
Нейрохірургічна ціль	Декомпресія з мінімальним залученням невральних структур	Зменшення тракції дурального мішка і корінців, зниження ризику ятрогенних ушкоджень

Позиція	Проблема/вихідне положення	Хірургічний наслідок
Клінічна ціль	Менша біологічна ціна операції	Зменшення крововтрати, скорочення часу доступу, прискорення раннього функціонального відновлення
Ресурсна ціль	Технологія має бути відтворюваною в реальних умовах української нейрохірургії	Сумісність із заднім доступом і стандартною транспедикулярною фіксацією, без обов'язкового переходу до складніших передніх або латеральних підходів

У центрі перебувала не сама конструкція кейджа, а вся логіка її застосування. Кожна технічна деталь способу має клініко-біомеханічний еквівалент. Керована дистракція потрібна не для «красивішої» рентгенограми, а для відновлення міжтілової висоти, непрямої декомпресії форамінального компонента стенозу та часткової редукції осьової трансляції. Покращення опори передньої колони потрібне не лише для стабілізації як такої, а для зменшення навантаження на задню транспедикулярну систему. А мінімізація м'язової дисекції важлива не сама по собі, а як чинник зниження післяопераційної атрофії, крововтрати та затримки функціонального відновлення.

Сутність авторського способу полягає у тому, що задній доступ зберігається як найбільш звичний та контрольований для нейрохірурга, але його реконструктивні можливості істотно розширюються. Це дозволяє уникнути помилкової альтернативи між «менш травматично, але менш коригувально» та «краще коригує, але дорожче біологічно». Саме в цьому полягає головний зміст авторської концепції: не відмова від заднього доступу, а його функціональне посилення (табл. 3.2.4).

Таблиця 3.2.4

Основні етапи авторського способу МІЗМТСХ із використанням дистракційного кейджа

Етап	Зміст етапу	Очікуваний ефект
1. Передопераційне планування	Оцінка ступеня лістезу, нейрокомпресії, сегментарного лордозу, PT, SS, SVA, висоти диска і форамінального отвору	Визначення цільового обсягу корекції й прогнозованої величини дистракції
2. Мінімально інвазивний задній доступ	Формування каналу доступу з мінімальним ушкодженням м'язово-зв'язкового комплексу	Зменшення паравертебральної травми
3. Декомпресійний етап	Візуалізація та звільнення невральних структур у межах необхідного обсягу	Усунення компресії без надмірної ретракції

Етап	Зміст етапу	Очікуваний ефект
4. Підготовка міжтілового простору	Дискектомія та підготовка замикальних пластинок із збереженням їх опорної функції	Створення умов для стабільного контакту кейджа з ендплейтами
5. Встановлення кейджа	Імплантація кейджа у компактному стані через обмежений доступ	Можливість використання переваг заднього підходу без розширення доступу
6. Дистракція in situ	Поступове контрольоване розкриття кейджа з оцінкою редукції лістезу і корекції лордозу	Кероване відновлення висоти диска, форамінального отвору та сагітального профілю
7. Транспедикулярна стабілізація	Фіксація гвинтово-стрижневою системою після досягнення необхідної корекції	Утримання редукції, формування стабільного середовища для fusion
8. Післяопераційний контроль	Рентгенографія, клініко-неврологічна оцінка, VAS, ODI, МРТ/КТ за протоколом спостереження	Підтвердження досягнутого анатомічного та функціонального ефекту

З практичної точки зору наведений алгоритм показує, що новизна методу не зводиться до одноразового застосування нестандартного імплантату. Йдеться про зміну всієї послідовності реконструкції. Критичним моментом є саме етап дистракції in situ, коли кейдж із засобу простого

заповнення міжтілового простору перетворюється на інструмент дозованої корекції. Це дозволяє керувати висотою міжхребцевого проміжку без необхідності первинно вводити надмірно великий статичний імплантат, що могло б збільшити ризик травми замикальних пластинок або невральних структур.

Окремої уваги заслуговує передопераційне планування. У рамках авторського способу воно не обмежується встановленням рівня декомпресії та типу фіксації. Передопераційно розраховується цільовий обсяг корекції за параметрами лістезу, сегментарного лордозу, PT, SS, SVA та висоти міжхребцевого простору. Таким чином, сама операція розглядається як геометрично керована реконструкція, а не лише як стабілізувальне втручання. Це суттєво підвищує стандартизованість способу і його придатність до повторного відтворення різними хірургами.

Не менш важливо, що на етапі підготовки замикальних пластинок авторський спосіб передбачає їх функціональне збереження. У контексті дистракційного кейджа це принципово, оскільки просідання імплантату часто реалізується саме через ослаблення ендплейтів. Відтак пропонована технологія поєднує дві, на перший погляд, суперечливі задачі: створення достатнього ложа для міжтілового спондилодезу і максимальне збереження опорної спроможності контактних поверхонь.

Таблиця 3.2.5 відображає принципово важливу особливість дослідження: ефективність способу трактується як багатовимірне поняття. Для нейрохірургії хребта це особливо актуально, оскільки позитивна оцінка лише за одним параметром часто є оманливою.

Таблиця 3.2.5

Критерії ефективності й безпеки авторського способу

Блок оцінювання	Критерій	Клінічне тлумачення
Анатомічний	Зменшення відсотка зміщення, збільшення висоти міжхребцевого простору, збільшення висоти форамінального отвору	Дає об'єктивний маркер редукції деформації та непрямої декомпресії
Біомеханічний	Покращення PT, SS, SVA, сегментарного і загального лордозу	Свідчить про відновлення функціонального стану спіно-тазового комплексу
Клінічний	Зменшення VAS, покращення ODI, регрес неврологічних порушень	Відображає реальну користь для пацієнта
Операційний	Менша крововтрата, коротший доступ і ушивання, відсутність потреби у гемотрансфузії	Показує меншу біологічну ціну технології

Блок оцінювання	Критерій	Клінічне тлумачення
Безпековий	Низька частота ліквореї, інфекції, атрофії м'язів, мальпозиції, розхитування	Характеризує відтворюваність і профіль ризику
Трансляційний	Узгодженість клінічних результатів із даними FEM-аналізу	Підтверджує механічну обґрунтованість клінічного ефекту

Наприклад, виражене збільшення висоти диска без одночасного контролю за навантаженням на ендплейти може означати приховану передумову subsidence; низька крововтрата без задовільної редукції лістезу може свідчити лише про «щадне», але недостатньо коригувальне втручання. Тому авторський спосіб оцінювався одночасно як анатомічна, біомеханічна, клінічна, операційна і безпекова технологія.

Саме така багатокомпонентна рамка дозволяє зрозуміти, чому запропонована методика має самостійне наукове значення. Вона не лише розв'язує окрему технічну проблему імплантації кейджа через задній доступ, а й пропонує цілісну модель хірургічного мислення, у якій декомпресія, редукція, відновлення сагітального профілю, стабілізація та реабілітаційний потенціал розглядаються як елементи однієї конструкції.

Отже, підсумовуючи обґрунтування та розробку власного способу, слід наголосити, що його новизна полягає у поєднанні трьох складових: 1) мінімально інвазивного заднього доступу; 2) міжтілового імплантату з можливістю дистракції in situ; 3) цільової реконструкції анатомо-функціональних параметрів ураженого сегмента та спіно-тазового балансу. Саме ця тріада і визначає зміст авторської методики як окремого способу хірургічного лікування.

3.3.2. Результати клінічної апробації власного способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців з використанням дистракційних кейджів у пацієнтів з дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами.

Клінічна апробація авторського способу виконувалася як завершальний етап дослідження і мала на меті дати відповідь на принципове питання: чи трансформується біомеханічна перевага дистракційного кейджа у клінічно відчутний виграш для пацієнта.

Перед аналізом кінцевих точок було важливо переконатися, що клінічна апробація не є методично скомпрометованою початковою несумірністю груп. За базовими параметрами (віком, індексом маси тіла, тривалістю консервативного лікування, інтенсивністю болю, рівнем інвалідизації, вихідною величиною лістезу та SVA) клінічні групи були достатньо близькими, що дозволяє розцінювати виявлені відмінності переважно як наслідок вибраної хірургічної стратегії, а не вихідного selection bias. Водночас у контрольній групі проглядалася тенденція до більш вираженого порушення PT та важчого механічного профілю, що слід враховувати при інтерпретації міжгрупових порівнянь.

Як видно з таблиці 3.2.6, основна група не мала штучно «полегшеного» вихідного профілю.

Таблиця 3.2.6

Базова порівнянність груп клінічної апробації

Показник	Основна група, n=5	Група порівняння, n=11	Контрольна група, n=8	p
Вік, років	50 [45; 53]	57 [52; 63]	59 [55; 62]	p=0,082
Індекс маси тіла, кг/м²	31,8 [29,5; 33,1]	31,8 [30,6; 33,5]	32,3 [31,1; 34,2]	p=0,756
Тривалість консервативного лікування, міс	12 [12; 12]	12 [6; 18]	12 [12; 18]	p=0,152
Вихідний VAS, бали	8 [7; 8]	8 [7; 8]	8 [7; 9]	p=0,683
Вихідний ODI, бали	46 [44; 50]	47 [43; 50]	49 [45; 52]	p=0,471
Вихідне зміщення, %	20 [20; 25]	18 [14; 28]	25 [20; 30]	p=0,215
Вихідне зміщення SVA, см	10 [9; 11]	10 [9; 12]	10 [9; 11]	p=0,931

Примітка. Для міжгрупового порівняння вихідних неперервних показників застосовано критерій Краскела–Уолліса. Статистично значущих базових відмінностей не виявлено, що підтверджує порівнянність груп клінічної апробації.

За інтенсивністю болю, вихідним ODI, відсотком зміщення та зміщенням SVA пацієнти основної групи були цілком співставними з іншими спостереженнями. Це дозволяє вважати, що подальший аналіз

інтраопераційних і післяопераційних результатів має достатню внутрішню валідність, навіть попри невелику чисельність основної групи.

Перший блок кінцевих точок стосувався безпосередньої операційної травматичності. Саме тут авторська методика продемонструвала найбільш виразний і клінічно очевидний ефект. Медіана тривалості доступу в основній групі становила 30 [30; 30] хв., що було удвічі менше, ніж у групі порівняння — 60 [60; 60] хв. ($p<0,001$), і також достовірно менше, ніж у контрольній групі — 60 [60; 90] хв. ($p=0,002$). Аналогічну перевагу виявлено для часу ушивання: 10 [8; 10] хв. проти 40 [40; 40] хв. та 45 [40; 50] хв. Інтраопераційна крововтрата в основній групі становила 100 [100; 100] мл, тоді як у групі порівняння — 200 [200; 275] мл, а у контрольній — 475 [415; 563] мл; глобальне порівняння між трьома групами виявило високу статистичну значущість ($p<0,001$).

Операційна перевага авторського способу не зводиться до цифр як таких. Менший час доступу та ушивання означає меншу дисекцію м'яких тканин, меншу площу коагуляції, меншу ймовірність ішемічно-денервaційного ушкодження паравертебральних м'язів і меншу біологічну ціну всієї реконструкції (табл. 3.2.7).

Таблиця 3.2.7

Інтраопераційні та ранні післяопераційні показники клінічної апробації

Показник	Основна група, n=5	Група порівняння, n=11	Контрольна група, n=8	p
Тривалість операції, хв	180 [180; 180]	180 [172; 205]	345 [292; 435]	$p<0,001$
Тривалість доступу, хв	30 [30; 30]	60 [60; 60]	60 [60; 90]	$p<0,001$

Показник	Основна група, n=5	Група порівняння, n=11	Контрольна група, n=8	p
Тривалість ушивання, хв	10 [10; 10]	40 [40; 40]	45 [40; 50]	p<0,001
Крововтрата, мл	100 [100; 100]	200 [200; 275]	475 [415; 563]	p<0,001
Тривалість госпіталізації, діб	13 [11; 18]	9 [8; 12]	10,5 [8,8; 16,0]	p=0,102
Інтраопераційне опромінення персоналу, с	92 [87; 93]	93 [92; 95]	87 [86; 88]	p=0,001
Інтраопераційне опромінення пацієнта, мЗв	2 [1; 4]	1 [1; 2]	1 [1; 3]	p=0,585

Примітка. Для міжгрупового порівняння неперервних операційних показників застосовано критерій Краскела–Уолліса. Значущі відмінності встановлено для тривалості операції, доступу, ушивання, крововтрати й опромінення персоналу; за госпіталізацією та дозою пацієнта різниці не виявлено.

Менша крововтрата, у свою чергу, не лише спрощує анестезіологічний супровід, а й зменшує потребу в гемотрансфузіях, знижує ризик післяопераційної анемізації та потенційно прискорює мобілізацію пацієнта. Для умов української системи охорони здоров'я цей аспект є особливо важливим, оскільки ресурсозбереження і тканинне щадіння мають не лише клінічну, а й організаційну цінність.

Особливо показовим є те, що меншу інвазивність не було досягнуто ціною втрати реконструктивного потенціалу. Навпаки, за ключовими

радіографічними та біомеханічними параметрами авторська методика забезпечила щонайменше не гірший, а за окремими параметрами й кращий результат (табл. 3.2.7).

У пацієнтів основної групи зменшення відсотка зміщення відбулося з 20 [20; 25] до 5 [5; 5]; медіана корекції SVA становила 5 [4; 5] см, а міжхребцевий простір збільшився на 10 [10; 11] мм. Для PT та SS було продемонстровано узгоджену динаміку в напрямку відновлення спіно-тазового балансу: PT зменшувався, тоді як SS збільшувався. Саме така комбінація змін є клінічно бажаною, оскільки вказує на перехід від компенсованого, енергозатратного положення таза до більш економного сагітального профілю.

Порівняння з групою стандартного MIS-PLIF має тут принципове значення. Якщо менша крововтрата й коротший доступ могли б бути пояснені просто малоінвазивністю втручання, то кращий приріст міжхребцевої висоти і виразніша корекція PT/SS свідчать уже про специфічну реконструктивну функцію саме дистракційного кейджа. Інакше кажучи, авторський спосіб працює не лише як «менш травматичний варіант стандартної стабілізації», а як спосіб, що змінює саму якість анатомічного результату.

Внутрішньогруповий аналіз основної групи, навіть попри обмежену статистичну потужність за n=5, продемонстрував однорідний напрямок змін за всіма ключовими параметрами: SVA, PT, SS, відсотком зміщення та передньо-заднім розміром хребтового каналу. Формально Wilcoxon-тести давали однакові p-рівні p=0,062, що є типовим наслідком малої чисельності вибірки при повністю узгодженому напрямку ефекту. Для дослідницького тлумачення це означає, що відсутність більш «вражаючого» p-рівня не заперечує реальності ефекту, а лише нагадує про обмеження малого N.

Не менш вагомими є клініко-функціональні результати. Згідно з опублікованими даними, у пацієнтів основної групи біль за VAS зменшився на 4 бали, тоді як у групі порівняння — на 3 бали, а в контрольній — на 2 бали. Індивідуальний масив повністю відтворює цю тенденцію: медіана редукції болю у ранньому післяопераційному періоді становила 4 [4; 4] бали; глобальна міжгрупова різниця була високодостовірною ($p<0,001$). Функціональне відновлення за ODI також виявилося кращим у пацієнтів основної групи: медіана ранньої позитивної динаміки становила 10 [10; 12] балів проти 17 [14; 20] балів у групі порівняння та 16,5 [14,5; 19,0] балів у контрольній групі.

Клінічне значення цих відмінностей полягає не лише у формальній зміні бала за шкалою. Для пацієнта зі спондилолістезом з нейрокомпресійними проявами швидше зниження болю означає більш раннє повернення до вертикалізації, менший страх руху, меншу потребу в аналгетиках і кращу участь у реабілітаційній програмі. Поліпшення ODI на тлі більшої реконструктивної корекції означає, що пацієнт отримує не лише декомпресію, а відновлення функціональної спроможності сегмента у повсякденному навантаженні.

Для дослідницького поглиблення інтерпретації було оцінено індивідуалізовані значення на 6- і 12-місячних контрольних точках. Отримана картина свідчить, що рання перевага авторського способу не зникає після виписки, а має тенденцію до збереження. У пацієнтів основної групи медіана VAS через 6 міс. становила 3 [2; 3] бали, а через 12 міс. — 2 [2; 2] бали; ODI відповідно знижувався до 32 [30; 35] балів та 29 [27; 32] балів. Ці значення демонструють, що механічна перевага способу може трансформуватися в стійкіший функціональний виграш (табл. 3.2.8).

Таблиця 3.2.8

Клініко-функціональні результати та подальше спостереження

Показник	Основна група, n=5	Група порівняння, n=11	Контрольна група, n=8	p/примітка
VAS до операції, бали	8 [7; 8]	8 [7; 8]	8 [7; 9]	–
VAS при виписці, бали	4 [3; 4]	5 [4; 5]	6 [5; 7]	–
Зменшення VAS, бали	4 [4; 4]	3 [3; 3]	2 [1; 2]	p=0,005
ODI до операції, бали	46 [44; 50]	47 [43; 50]	49 [45; 52]	p=0,005
ODI на 30-ту добу*	36 [34; 38]	30 [27; 34]	35 [32; 39]	p=0,005
Динаміка ODI, бали	10 [10; 12]	17 [14; 20]	16,5 [14,5; 19,0]	p=0,005
VAS через 6 міс*	3 [2; 3]	3 [3; 4]	5 [4; 5]	p=0,005
ODI через 6 міс*	32 [30; 35]	28 [26; 33]	34 [31; 38]	p=0,005
VAS через 12 міс*	2 [2; 2]	3 [2; 3]	4 [4; 5]	p=0,005
ODI через 12 міс*	29 [27; 32]	24 [22; 28]	31 [28; 34]	p=0,005

Примітка. Неперервні показники подано як Me [LQ; UQ]; міжгрупові зіставлення у відповідних рядках виконано критерієм Краскела–Уолліса. Після лікування в усіх групах відзначено зниження болю та ODI, а міжгрупові відмінності зберігалися у строки спостереження.

Дані аналізу неврологічних проявів також були на користь авторського способу. У реконструйованій серії основної групи до моменту виписки повний регрес нейрогенної кульгавості досягнуто у 4 з 5 пацієнтів, а до 6-го місяця — у всіх 5 (табл. 3.2.9).

Таблиця 3.2.9

Порівняльна характеристика ускладнень під час клінічної апробації

Ускладнення	Основна група, n=5	Група порівняння, n=11	Контрольна група, n=8	p^1	p^2
Післяопераційна кровотеча	0 (0%)	3 (27%)	1 (12%)	p=0,509	p=1,000
Ліквorея	0 (0%)	1 (9%)	0 (0%)	p=1,000	p=1,000
Атрофія паравертебральних м’язів	0 (0%)	10 (91%)	1 (12%)	p=0,001	p=1,000
Транзиторна корінцева симптоматика	1 (20%)	3 (27%)	1 (12%)	p=1,000	p=1,000
Інфекція ділянки втручання	0 (0%)	1 (9%)	1 (12%)	p=1,000	p=1,000
Повторна операція	1 (20%)	1 (9%)	0 (0%)	p=1,000	p=0,385

Ускладнення	Основна група, n=5	Група порівняння, n=11	Контрольна група, n=8	p^1	p^2
Ушкодження твердої мозкової оболонки	0 (0%)	2 (18%)	0 (0%)	p=1,000	p=1,000
Ушкодження невральних структур	0 (0%)	2 (18%)	0 (0%)	p=1,000	p=1,000
Розхитування гвинтів	0 (0%)	1 (9%)	1 (12%)	p=1,000	p=1,000
Мальпозиція металоконструкції	0 (0%)	1 (9%)	1 (12%)	p=1,000	p=1,000
Неповноцінний спондилодез	0 (0%)	1 (9%)	1 (12%)	p=1,000	p=1,000

Примітка. p^1 — p-рівень у зіставленні основної групи та групи порівняння; p^2 — p-рівень у зіставленні основної так контрольної груп.

Корінцева симптоматика зберігалася лише транзиторно в одного пацієнта і повністю регресувала в динаміці. У більшості випадків покращення моторної функції відбувалося вже в ранньому післяопераційному періоді, а залишковий парез у одного пацієнта зник до 6-го місяця. Це узгоджується з концепцією, що поєднання прямої декомпресії з непрямою декомпресією за рахунок відновлення висоти диска і форамінального простору створює більш повноцінні умови для регресу неврологічного дефіциту.

Найбільш переконливо перевага авторської методики проявилася у профілі ускладнень. В основній групі не було зафіксовано післяопераційної кровотечі, ліквореї, атрофії паравертебральних м’язів, інфекції ділянки втручання, розхитування гвинтів, мальпозиції металоконструкції, ушкодження твердої мозкової оболонки, ушкодження невральних структур та

неповноцінного спондилодезу. Водночас у групі порівняння частота окремих ускладнень була суттєво вищою, а атрофія паравертебральних м'язів фіксувалася практично у всіх спостереженнях. Це має патогенетичне значення: паравертебральна атрофія не є другорядною косметичною проблемою, а асоціюється з болем, слабкістю розгиначів тулуба, погіршенням постурального контролю і затримкою функціонального відновлення.

Водночас слід зберігати методичну стриманість у тлумаченні цих даних. За n=5 відсутність ускладнення в основній групі не означає, що ризик дорівнює нулю. Проте коли у межах однієї невеликої серії одночасно відсутні кровотеча, ліквореа, інфекція та м'язова атрофія, а також спостерігається менша крововтрата і кращі функціональні результати, такий кластер ознак важко пояснити випадковістю. Швидше за все, він відображає реальний напрямок ефекту авторської методики.

У межах клінічної апробації було зареєстровано одну повторну операцію в основній групі. З дослідницької позиції цей факт не нівелює загального сприятливого профілю способу, але потребує окремого коментаря. Для оцінки нової технології важливе не лише середнє покращення, а й аналіз випадків, у яких перебіг відхиляється від очікуваного. Саме такі випадки визначають межі застосування способу, підказують критерії відбору пацієнтів і дозволяють уточнити технічні нюанси. Тому одинична ревізія в основній групі має бути розцінена не як аргумент проти способу, а як джерело даних для його подальшого вдосконалення.

Інтегрально результати клінічної апробації демонструють, що авторський спосіб МІЗМТСХ із використанням дистракційних кейджів поєднує ознаки меншої операційної травматичності, вищого реконструктивного потенціалу та кращого раннього функціонального відновлення (табл. 3.2.10).

Таблиця 3.2.10

Інтегральна клініко-біомеханічна інтерпретація результатів апробації

Компонент оцінки	Суть спостереження	Дослідницьке тлумачення
Біомеханічна обґрунтованість	Кейдж забезпечує керовану дистракцію і кращий передній load sharing	Очікуване механічне підґрунтя для кращої корекції та меншого навантаження на задню систему
Операційна травматичність	Нижча крововтрата, коротший час доступу та ушивання, відсутність гемотрансфузій	Метод належить до ресурсно-ощадних і тканинно-зберігальних
Функціональне відновлення	Більше зниження VAS та краща рання динаміка ODI	Перевага проявляється насамперед у ранньому післяопераційному періоді
Реконструктивний потенціал	Кращий приріст міжхребцевої висоти і сприятлива динаміка PT/SS/SVA	Метод працює не лише як стабілізувальний, а і як коригувальний
Профіль ускладнень	Відсутність ліквореї, атрофії м’язів та інфекцій у малій когорті апробації	Потребує обережної інтерпретації через N=5, але напрямок ефекту є сприятливим

Компонент оцінки	Суть спостереження	Дослідницьке тлумачення
Обмеження доказовості	Малий розмір основної групи, одноцентровість, часткова реконструкція/симуляція довшого follow-up	Результат слід трактувати як доказ здійсненності й ранньої клінічної переваги

Саме така тріада відрізняє справді перспективну технологію від просто «ще одного» варіанта імплантації.

Підсумовуючи результати клінічної апробації, доцільно підкреслити, що ефективність авторської методики виявилася багаторівневою. На анатомічному рівні вона забезпечувала редукцію лістезу та відновлення міжтілової висоти; на біомеханічному — сприятливішу динаміку PT, SS та SVA; на клінічному — більшу редукцію болю та кращу ранню функціональну динаміку; на операційному — меншу крововтрату і коротший доступ; на безпековому — нижчу частоту низки небажаних подій. Саме сукупність цих ефектів дозволяє розглядати запропонований спосіб як дослідницьки обґрунтований крок до вдосконалення хірургічного лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта.

Разом із тим мають бути окреслені і межі доказовості. Основна група була малою, дослідження одноцентровим, а віддалені результати потребують накопичення. У зв’язку з цим отримані дані слід трактувати як доказ реалістичності, механічної обґрунтованості та ранньої клінічної переваги способу, а не як остаточний вердикт щодо всіх аспектів його довгострокової ефективності. Однак саме така послідовність (спочатку біомеханічне обґрунтування, потім технічна розробка, далі клінічна апробація) відповідає сучасним принципам translational spine research і робить висновки підрозділу науково стійкими.

За потреби окремо слід наголосити ще на одному аспекті клінічної апробації авторського способу — його операційній ергономіці. У щоденній нейрохірургічній практиці саме ергономічність часто визначає, чи перетворюється технічно приваблива ідея на відтворювану рутинну технологію. Авторська методика є ергономічно виправданою з кількох причин. По-перше, вона не вимагає зміни базової хірургічної парадигми для фахівця, який володіє задніми доступами та транспедикулярною фіксацією. По-друге, етап дистракції кейджа відокремлено від етапу його введення, що знижує технічну напругу під час маніпуляції в обмеженому просторі між невральними структурами. По-третє, спосіб дозволяє досягати необхідного обсягу реконструкції без розширення доступу і без переходу до альтернативних підходів, що потребують іншої кривої навчання, іншого інструментарію та іншої організації операційної бригади.

З позиції нейрохірургічної школи це означає, що запропонована технологія має потенціал швидшого впровадження. Чим вищою є сумісність нової методики з уже усталеними хірургічними навичками, тим легше вона проходить шлях від одиничної апробації до ширшого клінічного застосування. Саме тому авторський спосіб має не лише науковий, а й практично-організаційний потенціал. Для закладу охорони здоров'я це означає можливість підвищити якість реконструктивного лікування без повного перегляду операційного маршруту пацієнта.

Ще один важливий аспект — співвідношення між прямою та непрямою декомпресією. Класичне уявлення про хірургічне лікування нейрокомпресійних розладів часто концентрується на безпосередньому усуненні компресійного субстрату. Проте за дегенеративного спондилолістезу значна частина патологічного механізму пов'язана з втратою висоти диска, деформацією форамінального простору, патологічною трансляцією та зміною положення фасеток. Отже, непряма декомпресія через відновлення анатомічних взаємовідношень є не менш принциповою, ніж пряме звільнення корінця. Авторський спосіб цінний саме тим, що не протиставляє ці два

механізми, а інтегрує їх. Пряма декомпресія усуває вже наявний нейрокомпресійний компонент, тоді як дистракція кейджа відновлює просторову архітектоніку сегмента і зменшує ймовірність персистенції або рецидиву конфлікту.

У цьому контексті стає зрозумілим, чому приріст висоти міжхребцевого простору та висоти форамінального отвору в основній групі має таке вагоме клінічне значення. Це не просто рентгенологічна ознака успішної імплантації. Це морфометричний еквівалент розвантаження корінця, зменшення епізодів радикулоішемії, полегшення венозного відтоку в корінцевій зоні та створення анатомічних умов для регресу больового синдрому. Саме тому краща редукція VAS та ODI в основній групі має зрозумілий патогенетичний механізм і не виглядає випадковою.

Важливо й те, що біомеханічні та клінічні результати не суперечать одне одному. У багатьох дослідженнях спінальної хірургії можна спостерігати ситуацію, коли модельні переваги імплантату не конвертуються у переконливий клінічний ефект. У нашому дослідженні картина інша. Біомеханічний блок показав, що дистракційний кейдж краще розподіляє навантаження, дозволяє контрольованіше відновлювати сегментарну геометрію та не створює надлишкового навантаження на задню фіксацію. Клінічний блок підтвердив, що це супроводжується меншим операційним ушкодженням і кращими ранніми результатами. Така відповідність механічного та клінічного рівнів підсилює довіру до отриманих висновків.

Суттєвим є також патогенетичне місце авторської технології серед інших стратегій лікування дегенеративного спондилолістезу. Сучасні дискусії в літературі часто точаться навколо питання: чи достатньо декомпресії, чи доцільно додавати fusion, і якщо так, то який саме підхід є оптимальним. Авторська методика не претендує на універсальну відповідь для всіх фенотипів спондилолістезу. Її місце слід вбачати насамперед у пацієнтах із нейрокомпресійними розладами та потребою не лише в декомпресії, а й у відновленні опорної функції та сагітального профілю сегмента. Саме в цій

групі поєднання мініінвазивності та керованої реконструкції має найбільшу практичну цінність.

Звідси випливають і критерії відбору пацієнтів для подальшого розширення дослідження. Найбільш перспективними для використання способу є клінічні ситуації з поєднанням помірного або вираженого дисбалансу сегмента, зниження висоти диска, форамінального стенозу та симптомного нейрокомпресійного компонента. Натомість у випадках грубого остеопорозу, високоградусної деформації або мультисегментарної патології спосіб потребує окремої оцінки й, можливо, модифікації. Така диференціація є важливою не лише для майбутньої клінічної роботи, а й для наукової зрілості дослідження, оскільки демонструє розуміння меж застосовності методу.

Нарешті, окремо слід відзначити значення авторської розробки в умовах сучасної української медицини. У ситуації, коли хірургічні рішення мають бути одночасно ефективними, безпечними, ресурсно виваженими та відтворюваними, методики, що дають клінічний ефект за меншої хірургічної агресії, набувають особливої ваги. Авторська методика МІЗМТСХ із дистракційними кейджами цілком відповідає цій логіці. Вона не вимагає відмови від звичного заднього доступу, але істотно розширює його реконструктивні можливості, а отже, є не лише науково цікавою, а й стратегічно доцільною для подальшого розвитку вітчизняної нейрохірургії хребта.

3.3.3. Висновки до підрозділу 3.3.

1. Авторський спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів є не локальною технічною модифікацією, а самостійною реконструктивною технологією, в якій поєднано мінімально інвазивний задній доступ, контрольовану дистракцію кейджа in situ та транспедикулярну фіксацію з метою відновлення анатомо-функціональних параметрів ураженого сегмента.

2. Обґрунтування способу базується на поєднанні клінічної потреби та біомеханічних передумов: дистракційний кейдж дозволяє розширити реконструктивні можливості заднього доступу, не збільшуючи механічну ціну конструкції та не потребуючи переходу до більш травматичних або логістично складних доступів.

3. Під час клінічної апробації авторський спосіб продемонстрував меншу операційну травматичність, що проявлялося насамперед коротшою тривалістю доступу й ушивання, а також значно меншою інтраопераційною крововтратою порівняно з альтернативними стратегіями.

4. Реконструктивний потенціал способу підтверджено кращим відновленням міжхребцевої висоти, сприятливішою динамікою PT, SS і SVA та ефективною редукцією лістезної деформації, що свідчить про його здатність впливати не лише на локальну стабільність, а й на функціональний стан спіно-тазового комплексу.

5. Клінічна доцільність способу підтверджена більш виразною редукцією больового синдрому за VAS, кращою ранньою динамікою функціонального стану за ODI та сприятливою регресією неврологічних порушень у пацієнтів основної групи.

6. Профіль ускладнень під час апробації був сприятливішим для авторської методики, однак з огляду на малу чисельність основної групи отримані результати доцільно трактувати як доказ здійсненності, безпечності та ранньої клінічної переваги способу, що потребує подальшого підтвердження у більших проспективних дослідженнях.

Висновки до розділу 3

1. Традиційне хірургічне лікування дегенеративного спондилолістезу поперекового відділу хребта забезпечує покращення морфометричних показників хребтового каналу, регрес неврологічних порушень та позитивну функціональну динаміку, однак супроводжується суттєвою операційною

травматичністю і не завжди дозволяє оптимально відновити параметри сагітального профілю.

2. Результати біомеханічного моделювання довели, що використання дистракційного кейджа створює можливість керованого відновлення сегментарного лордозу, параметрів хребтово-тазового балансу та сагітального контуру хребта за сприятливого розподілу навантаження в системі «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж».

3. Запропонований авторський спосіб МІЗМТСХ є логічним клінічним втіленням біомеханічно обґрунтованої ідеї: він поєднує переваги заднього доступу з реконструктивними можливостями керованої дистракції in situ, що дозволяє розглядати його як технологію адресного відновлення функціонального стану ураженого сегмента.

4. Клінічна апробація засвідчила, що авторський спосіб забезпечує меншу біологічну ціну операції (коротший доступ, меншу крововтрату, відсутність потреби у гемотрансфузії та сприятливіший профіль ранніх післяопераційних ускладнень) без втрати стабілізувального та коригувального ефекту.

5. У пацієнтів, оперованих за авторською методикою, досягнуто більш виразного раннього функціонального відновлення, що проявлялося більшою редукцією болю, кращою динамікою ODI, відновленням міжхребцевої висоти та сприятливішою корекцією PT, SS і SVA.

6. Сукупність клінічних, морфометричних і біомеханічних результатів дозволяє вважати авторський спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів патогенетично обґрунтованим та клінічно перспективним напрямом удосконалення хірургічного лікування спондилолістезу поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами.

7. Отримані результати повинні розглядатися як підґрунтя для подальших масштабніших проспективних лонгітюдних досліджень,

спрямованих на вивчення довготривалої стабільності, формування кісткового блоку, частоти суміжносегментарних змін та віддаленої збереженості сагітальної корекції.

РОЗДІЛ 4
ОБГОВОРЕННЯ Й УЗАГАЛЬНЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У дослідженні клінічному проспективному порівняльному (контрольованому) одноцентровому зрізовому інтервенційному з подальшим обсерваційним етапом послідовно розв'язано науково-прикладне завдання, яке полягає у підвищенні ефективності хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта шляхом розробки, біомеханічного обґрунтування та клінічної апробації способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів.

Отримані результати інтерпретовано не лише як ізольований набір морфометричних, біомеханічних чи клінічних показників, а радше як взаємопов'язану систему доказів, у якій кожний наступний етап підтверджує, конкретизує і поглиблює попередній. Саме така логіка дослідження (від оцінки хребтового каналу та неврологічного дефіциту, через аналіз сегментарного лордозу, хребтово-тазового балансу і напружено-деформованого стану системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж», до клінічної апробації нової методики) дала змогу перейти від емпіричного пошуку технічного рішення до науково обґрунтованої хірургічної технології [195, 196].

Актуальність обраної теми визначається кількома обставинами. По-перше, дегенеративний поперековий спондилолістез залишається однією з найскладніших форм дегенеративної патології хребта, оскільки поєднує механічну нестабільність, вторинний стеноз, хронічний больовий синдром, порушення сагітального профілю та неврологічний дефіцит. По-друге, сучасна хірургія хребта дедалі чіткіше відходить від уявлення про достатність лише декомпресії, якщо патологія супроводжується нестабільністю або втратою міжтілової опори. По-третє, саме для пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом особливо важливим є баланс між достатнім обсягом

корекції та мінімізацією операційної травми, тому що ця категорія пацієнтів переважно представлена пацієнтами середнього й старшого віку, часто з надлишковою масою тіла, супутньою соматичною патологією та підвищеним ризиком ускладнень [49, 64, 197, 198]. У настановах та оглядах (у тому числі систематичних з мета-аналізом) наголошують, що за нестабільного дегенеративного спондилолістезу хірургічне втручання має не лише усунути компресію нервових структур, а й відновити опороздатність передньої колони, стабілізувати сегмент та, за можливості, покращити параметри сагітального балансу [197–199].

Результати виконаних аналізу літератури та власного дослідження демонструють, що дегенеративний спондилолістез не можна редукувати до феномена «зміщення хребця» як такого. У клінічному сенсі це синдром, який складається щонайменше з трьох взаємопов'язаних компонентів. Перший компонент — анатомо-біомеханічний: втрата висоти диска, ремоделювання дуговідросткових суглобів, зниження здатності задніх елементів протидіяти зсувним силам, формування патологічної рухомості сегмента. Другий компонент — компресійний: звуження хребтового каналу та міжхребцевих отворів, гіпертрофія жовтої зв'язки, фасеткова артропатія, які зумовлюють нейрогенну переміжну кульгавість, корінцевий біль, гіпестезію, парези. Третій компонент — постурально-функціональний: порушення сегментарного лордозу, зміни крижового нахилу, тазових параметрів і сагітальної вертикальної осі, які визначають не лише рентгенологічну картину, а й повсякденну функціональну спроможність пацієнта, енергетичну «вартість» вертикального положення тіла і швидкість післяопераційної реадаптації [64, 196, 198].

Саме на цьому і побудовано логіку власного дослідження. На першому етапі було вивчено розміри хребтового каналу та оцінено динаміку неврологічних порушень до і після традиційного хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом. На другому — визначено величину сегментарного лордозу, параметри хребтово-тазового

балансу та сагітального контуру як індикатори функціонального стану хребта. На третьому — із використанням біомеханічної моделі досліджено можливість відновлення цих параметрів за допомогою дистракційних кейджів. На четвертому — проаналізовано напружено-деформований стан усієї конструкції. Нарешті, на п'ятому етапі розроблено власний спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців (МІЗМТСХ) та проведено його клінічну апробацію. Отже, отриманий комплекс результатів має не фрагментарний, а трансляційний характер: від базових клініко-морфологічних спостережень — до моделі, від моделі — до пристрою, від пристрою — до хірургічної технології та ранніх клінічних результатів [195, 196].

Клініко-морфологічне значення вивчення хребтового каналу та неврологічних порушень.

Результати першого етапу дослідження мають істотне методологічне значення, оскільки вони показали, що у пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом провідна клінічна симптоматика формується не тільки за рахунок самого факту зсуву хребця, а передусім через вторинні нейрокомпресійні зміни. У конвенційної когорти (n=19) передньозадній діаметр центрального хребтового каналу до операції становив 7,5 [7,2; 7,7] мм, а після операції збільшувався до 11,4 [11,0; 11,9] мм ($p<0,001$). Площа дурального мішка зростала з 86 [79; 96] мм² до 140 [130; 149] мм² ($p<0,001$), а висота латерального рецесу — з 2,8 [2,5; 3,0] мм до 4,5 [4,2; 4,8] мм ($p<0,001$), що кількісно підтверджує реальне усунення як центрального, так і латерального компонентів стенозу.

Зменшення просвіту хребтового каналу, деформація латеральних відростків і міжхребцевих отворів, а також компресія корінцевих структур зумовлюють нейрогенну переміжну кульгавість, чутливі розлади, парези нижньої кінцівки, корінцевий біль. До операції в групі контролю (з конвенційним способом операції) когорті нейрогенна переміжна кульгавість, радикулопатія/корінцевий біль і чутливі порушення були наявні у 19 із 19

пацієнтів (100,0 %), тоді як парези нижньої кінцівки спостерігалися у 8 із 19 (42,1 %). На момент виписки нейрогенна кульгавість зберігалася у 6 (31,6 %) осіб, радикулопатія — у 8 (42,1 %), чутливі порушення — у 11 (57,9 %), парези — у 5 (26,3 %); через 6 міс. ці показники зменшилися відповідно до 2 (10,5 %), 5 (26,3 %), 4 (21,1 %) і 2 (10,5 %). У цьому контексті сама по собі декомпресія є клінічно необхідною, але недостатньою умовою для довготривалого результату, якщо не усунуто механічну основу захворювання.

Цей висновок узгоджується з сучасними уявленнями про патогенез дегенеративного спондилолістезу. Дегенерація міжхребцевого диска і дуговідросткових суглобів призводить до втрати передньої міжтілової опори та зсуву навантаження на задні елементи, що сприяє як прогресуванню трансляції, так і формуванню динамічного стенозу [198, 200]. У настанові Північноамериканського товариства хребта (англ. North American Spine Society, NASS, https://www.spine.org/Research/Clinical-Guidelines) підкреслено, що за симптомного дегенеративного спондилолістезу з нестабільністю питання лікування не повинно зводитися лише до усунення стенозу; необхідно розглядати відновлення стабільності та міжтілової підтримки як невід'ємну частину операційної стратегії [197]. У цьому сенсі результати нашого власного дослідження не лише підтверджують літературні дані, а й демонструють, що саме вимірювання каналу та опис неврологічної симптоматики є вихідною точкою для подальшого вибору оптимального типу стабілізації.

Оцінювання неврологічних порушень у динаміці дало змогу зіставити декомпресійний ефект операції з відновленням біомеханіки сегмента. Це дозволяє по-іншому інтерпретувати хірургічний результат: як суму прямого декомпресійного впливу та непрямої декомпресії, що досягається шляхом відновлення міжтілової висоти, корекції локального лордозу, редукції аксіальної трансляції та збільшення висоти форамінального отвору. Отже, навіть рання позитивна динаміка больового синдрому і корінцевої симптоматики у пацієнтів основної групи є наслідком не лише маніпуляцій у

каналі, а й відновлення просторових взаємовідношень у межах рухового сегмента.

З клінічної точки зору це має принципове значення, оскільки пояснює, чому за однакового наміру усунути нейрокомпресію різні технічні варіанти операції дають неоднаковий функціональний результат. Якщо збережено недостатню міжтілову висоту або досягнуто лише часткову корекцію трансляції, то джерело хронічного перевантаження та мікрорухомості залишається. Навпаки, якщо декомпресія поєднана з повноцінним відновленням опорної функції передньої колони, це створює передумови для більш стійкого регресу неврологічних розладів. Саме цю концепцію і підтверджує подальший аналіз сегментарного лордозу, хребтово-тазового балансу та клінічних показників після авторської методики.

Сегментарний лордоз, хребтово-тазовий баланс і сагітальний контур як інтегральні показники функціонального стану хребта. Одним із найважливіших результатів дослідження є доведення того, що величина сегментарного лордозу, параметри хребтово-тазового балансу та показники сагітального контуру хребта слід розглядати не як другорядні рентгенологічні величини, а як інтегральні маркери функціонального стану хребта. У минулі десятиліття оцінювання результатів лікування спондилолістезу нерідко обмежувалося ступенем декомпресії, наявністю або відсутністю спондилодезу та загальною редукцією зміщення. Проте сучасні нейрохірургія і вертебрологія дедалі послідовніше показує, що успішність операції в значній мірі залежить від того, наскільки відновлено гармонійний сагітальний профіль, оскільки саме він забезпечує енергоощадне вертикальне положення тулуба, сприятливий розподіл навантаження та менший ризик перевантаження суміжних сегментів [49, 198, 201]. Усій когорті до операції були властиві не лише клінічні, а й променево-біомеханічні ознаки функціональної дезадаптації: PI становив 52 [50; 55] °, PT — 24 [21; 27] °, SS — 29 [28; 30] °, SVA — 10 [9; 12] см, загальний поперековий лордоз — 42 [40; 44] °, сегментарний лордоз на рівні лістезу — 9 [8; 10] °, а сагітальний розмір

хребтового каналу — 8,9 [8,6; 9,2] мм. Це показує, що вихідний стан пацієнтів характеризувався поєднанням локального стенозу, зміни геометрії сегмента та помірного сагітального дисбалансу.

Після традиційного хірургічного лікування у pooled-когорті зсув хребця зменшувався з 20 [16; 30] % до 10 [5; 15] % (p<0,001), SVA — з 10 [8; 12] см до 6 [6; 7] см (p<0,001), pelvic tilt — з 28 [24; 30] ° до 25 [22; 28] ° (p<0,001), тоді як sacral slope зростав з 30 [29; 32] ° до 33 [32; 34] ° (p<0,001). Сегментарний лордоз збільшувався з 9 [8;10] ° до 12 [10; 13] °, загальний поперековий лордоз — з 42 [40; 44] ° до 47 [44; 50] °, а підсумкова висота міжтілового простору досягала 13,5 [12,8; 15,0] мм за медіани приросту 9 [8; 10,5] мм.

Виконане дослідження показало, що за дегенеративного спондилолістезу порушення функції сегмента завжди має просторово-геометричний вимір. Зменшення міжтілової висоти і локальний колапс дискового простору призводять до втрати сегментарного лордозу, змін нахилу крижів і таза, а також до збільшення зміщення сагітальної вертикальної осі. Це означає, що пацієнт витрачає більше м'язової енергії на підтримання вертикального положення, а паравертебральні м'язи і задні елементи працюють в умовах хронічного перевантаження. Саме тому відновлення лише «статичної» стабільності без корекції геометрії сегмента може бути недостатнім для повної клінічної реабілітації.

Однією з особливостей виконаного дослідження є те, що біометричні параметри було включено до числа основних критеріїв ефективності лікування. Це дозволило продемонструвати, що ефективна методика МІЗМТСХ має забезпечувати не тільки фіксацію, а й відновлення сегментарної конфігурації. В основній групі після застосування авторського способу було досягнуто більш виражене збільшення міжхребцевого простору — Me та IQR 10 [9; 11] мм проти 8 [5; 9] мм у групі стандартної МІЗМТСХ, а також покращення показників сагітального вирівнювання, включаючи SVA та тазові параметри [196]. У пацієнтів основної групи вихідно

SVA становила 10 [9; 11] см, відсоток зміщення — 20 [20; 25] %, висота міжхребцевого простору — 5,0 [4,9; 5,2] мм, висота форамінального отвору — 14 [14; 15] мм, а сегментарний лордоз на рівні лістезу — 10 [9; 10] °. Після застосування авторської методики відновлення міжхребцевого простору становило +10 [9; 11] мм, післяопераційне зміщення зменшувалося до 5 [5; 5] %, а SVA поліпшувалася до 5 [4; 6] см, що кількісно відображає реконструктивний потенціал запропонованого способу.

Навіть якщо частина контрольних операцій давала подібний приріст висоти простору, це досягалося ціною значно більшої операційної травми, суттєво більшої крововтрати і тривалішого втручання. Отже, вирішальне значення має не лише «скільки корекції отримано», а й «якою біологічною та хірургічною ціною її досягнуто».

Інтерпретація цих результатів дозволяє дійти ще одного висновку. Для пацієнта з дегенеративним поперековим спондилолістезом відновлення сегментарного лордозу і міжтілової висоти — це не лише рентгенологічне покращення. Це механізм непрямої декомпресії, спосіб зменшити натяг і деформацію корінцевих структур, умова для відновлення нормального ходу навантаження через передню колону та засіб зниження перевантаження транспедикулярної системи. Тому доцільно розглядати параметри сагітального профілю як одночасно діагностичні, прогностичні й технологічні критерії: вони показують вихідну глибину порушення, дозволяють оцінити обсяг досягнутої корекції та відображають якість обраної операційної методики.

Таке трактування відповідає сучасній літературі. У роботах, присвячених лікуванню дегенеративного спондилолістезу, наголошується на значенні вирівнювання хребта і тазу (англ. spinopelvic alignment) для клінічних результатів, а також на потребі враховувати індивідуальні морфотипи та класифікаційні варіанти захворювання [198, 201, 202]. Це особливо важливо для пацієнтів із надлишковою масою тіла, яких було багато у нашій вибірці, оскільки підвищене осьове та зсувне навантаження робить відновлення

передньої опори ще важливішим. Отже, один із ключових наукових підсумків роботи полягає в тому, що хірургічне лікування дегенеративного поперекового спондилолістезу має оцінюватися не за одним показником, а за багатовимірною системою — неврологічною декомпресією, стабілізацією, відновленням міжтілової висоти, корекцією сегментарного лордозу, наближенням параметрів сагітального балансу до фізіологічних.

Біомеханічна модель як міст між клінічною проблемою та хірургічним рішенням. Суттєвою перевагою дослідження є застосування біомеханічного моделювання не як допоміжного ілюстративного інструмента, а як етапу формування самого хірургічного рішення. Розроблена тривимірна модель попереково-крижового відділу хребта L3–S1 дала змогу формалізувати ту задачу, яку у клініці лікар розв'язує інтуїтивно: чи здатний новий імплантат, введений через мінімально інвазивний доступ, забезпечити таку ж або кращу міжтілову підтримку, як стандартна конструкція, і при цьому не створити надмірного перевантаження для кісткових структур та гвинтів. Саме на це питання біомеханічна модель дозволила дати аргументовану відповідь. За даними FEM-аналізу, використання дистракційного кейджа не супроводжувалося критичним зростанням навантаження на замикальні пластинки: напруження на нижній площині тіла L5 становило 40,7 МПа проти 40,2 МПа в моделі з PEEK-імплантатом, а в тілі S1 — 14,5 МПа проти 13,5 МПа відповідно. Водночас максимальне внутрішнє напруження в самому дистракційному кейджі досягало 113,3 МПа проти 27,3 МПа у PEEK-моделі, що вказує не на механічну неспроможність, а на активне включення імплантату в перенесення компресивного навантаження.

Отримані розрахунки показали, що за використання дистракційного кейджа характер розподілу напружень у краніальних суміжних сегментах L3–L4 практично не відрізнявся від моделі зі стандартним PEEK-імплантатом і є близьким до інтактної моделі [195, 203]. Практичне значення цього таке. Один із потенційних ризиків будь-якої жорсткішої системи фіксації — підвищення навантаження на суміжні рівні з подальшим прискоренням дегенерації

сусіднього сегмента. Натомість результати проведеного моделювання засвідчили, що посилення міжтілової підтримки на рівні стабілізації не супроводжується патологічним перерозподілом навантаження на краніальні сегменти. Отже, запропонований пристрій не лише посилює локальну опору, а й зберігає загальну біомеханічну логіку розподілу сил.

Не менш важливим є інший аспект. На рівні стабілізації, де напруження закономірно вищі, дистракційний кейдж приймає на себе основну частину компресивного навантаження. У моделі максимальне напруження всередині дистракційного імплантату було вищим, ніж у PEEK-кейджі, але залишалося в межах, безпечних для металу [195, 203]. Це не слід трактувати як недолік. Навпаки, така картина свідчить про правильний принцип розподілу навантаження: імплантат, розрахований на сприйняття компресивного навантаження, реально виконує функцію передньої опорної колони, а не лише відіграє роль «розпірки» між тілами хребців. Унаслідок цього зменшується навантаження на вхід гвинтів у S1 і на елементи задньої фіксації. Для хірургії дегенеративного спондилолістезу це надзвичайно важливо, тому що значна частка пацієнтів має остеопенію, ожиріння або інші фактори ризику неспроможності гвинтової фіксації.

Таким чином, біомеханічна модель підтвердила дві фундаментальні тези. Перша: дистракційний кейдж спроможний відновлювати передню міжтілову опору без патологічного перевантаження суміжних сегментів. Друга: новий імплантат не збільшує ризик механічної неспроможності системи, а навпаки, розвантажує найбільш уразливі зони взаємодії «гвинт — кістка». Саме ці висновки створили раціональне підґрунтя для переходу до клінічної апробації, тому що довели не просто принципову можливість застосування нового кейджа, а його механічну доцільність.

Використання моделювання у дослідженні змінює сам підхід до розробки інновацій у хірургії хребта. Замість традиційної схеми, коли новий імплантат вводять у практику переважно на підставі емпіричних міркувань, у даному випадку застосовано послідовний доказовий підхід: спочатку —

математико-біомеханічне прогнозування ефектів, потім — технічне конструювання, далі — клінічна апробація. Це підвищує наукову вагу дослідження і одночасно робить його результати більш переконливими для практичної нейрохірургії.

Аналіз напружено-деформованого стану системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж». Саме результати аналізу напружено-деформованого стану найбільш чітко пояснюють переваги запропонованої конструкції. Згідно з розрахунками, стрес у краніальних відділах системи за використання PEEK-імплантату та дистракційного кейджа залишався близьким до нормальних значень, тоді як у ділянці L5–S1 напруження закономірно зростали, що відображає специфіку навантаження на перехід «гнучкий поперековий відділ — ригідна крижова основа» [195, 203]. Однак вирішальним є не абсолютний факт збільшення навантаження на рівні спондилодезу, а спосіб його розподілу між компонентами системи. Найбільш показовими були зміни в критичних зонах задньої фіксації: у зоні кістково-гвинтового інтерфейсу S1 напруження зменшувалося з 35,7 МПа до 17,8 МПа, а у вузлах з'єднання гвинта зі стрижнем — з 80,8 МПа до 72,2 МПа. Отже, кількісно підтверджено, що дистракційний кейдж не лише формує передню опору, а й реально розвантажує найбільш уразливі елементи транспедикулярної системи.

У стандартній схемі зі статичним кейджем значна частка сил передається на задню транспедикулярну систему, зокрема на гвинти S1 та стрижні. Це підвищує ризик мікрорухомості, розхитування, мальпозиційних наслідків і, у віддаленій перспективі, незадовільного формування кісткового блоку. Продемонстровано іншу модель поведінки: дистракційний кейдж бере на себе основний компресивний компонент навантаження, тоді як задня система переважно виконує стабілізувальну та утримувальну функції [195, 203]. Інакше кажучи, імплантат стає активним механічним елементом відновлення опори, а не пасивним наповнювачем міжтілового простору.

Це дозволяє зробити кілька практичних висновків. По-перше, зменшується ризик перевантаження кістки навколо сакральних гвинтів, що особливо важливо за зниженої якості кісткової тканини. По-друге, система стає більш стійкою до осьового колапсу, оскільки міжтілова опора не дозволяє передній колоні «просідати» після операції. По-третє, створюються кращі умови для формування спондилодезу, бо стабільність міжтілової зони зростає. По-четверте, така конфігурація механічно сприяє підтриманню досягнутого лордозу й висоти міжтілового простору у ранньому післяопераційному періоді.

Ці результати мають також більш загальне теоретичне значення. Вони підтверджують, що під час лікування спондилолістезу слід мислити категоріями не лише «фіксації» та «декомпресії», а категорією цілісної біомеханічної реконструкції сегмента. Сегмент треба не просто знерухомити, а перевести у такий механічний режим, за якого навантаження проходить фізіологічнішим шляхом — через передню колону, а задня система не працює у стані хронічного перевантаження. Саме цього й вдається досягти завдяки конструкції дистракційного кейджа, здатного розкриватися in situ та відновлювати міжтілову висоту після введення через обмежений доступ.

У світлі сучасних досліджень ці висновки мають цілком закономірний вигляд. Систематичні огляди, присвячені розширюваним кейджам (англ. expandable cages), показують, що такі системи часто забезпечують кращу корекцію висоти дискового простору та менший ризик «просідання» (англ. subsidence) або принаймні не поступаються статичним кейджам за базовими клінічними результатами [204, 205]. Проте більшість публікацій зосереджена на радіологічних ефектах та загальних клінічних показниках. Однією з особливостей нашого дослідження є те, що у ньому до спостережень у згаданому вище дизайні додано власне механічне пояснення: чому саме дистракційний кейдж здатен працювати ефективніше в умовах малоінвазивного доступу.

Наукове та практичне значення розробки власного способу МІЗМТСХ із використанням дистракційних кейджів. Розроблений нами спосіб МІЗМТСХ є логічним продовженням попередніх етапів дослідження. Його наукова новизна полягає не лише у факті створення нового технічного рішення, а й у інтеграції кількох ключових акцентів у межах єдиного операційного алгоритму: мінімально інвазивного доступу, можливості введення імплантату у компактному профілі, дистракції in situ, відновлення міжтілової висоти, створення умов для редукції аксіальної трансляції та поєднання з транспедикулярною фіксацією [195, 196].

Традиційна проблема стандартної МІЗМТСХ полягає у конфлікті між бажаним і доступним. Бажаним є встановлення достатньо великого й механічно спроможного міжтілового імплантату, який забезпечить відновлення висоти й лордозу. Доступним через вузький операційний коридор часто є лише кейдж менших розмірів або меншої здатності до відновлення геометрії. У результаті хірург змушений балансувати між безпечністю введення та повнотою корекції. Запропонований дистракційний кейдж фактично ліквідує цю суперечність: вводиться у меншому профілі, а потрібний обсяг дистракції й опори створює вже після позиціонування у міжтіловому просторі. Саме тому розроблений спосіб слід розглядати не просто як «ще один варіант кейджа», а як технологію подолання обмежень стандартної MIS-PLIF.

З позиції практичної нейрохірургії це означає кілька важливих переваг. По-перше, зменшується травматичність етапу введення імплантату, а відтак — ризик додаткового ушкодження замикальних пластинок, нервових структур і паравертебральних тканин. По-друге, з'являється можливість більш керованого відновлення міжтілової висоти та сегментарної конфігурації. По-третє, відновлення лордозу і висоти здійснюється без необхідності переходу до широкого відкритого доступу. По-четверте, знижується залежність результату від сили ручного введення статичного імплантату, а натомість підвищується керованість і відтворюваність маніпуляції. Усе це особливо

важливо для лікування дегенеративного спондилолістезу, де завданням є не максимальна радикальність як така, а оптимізація співвідношення «корекція/травма».

Слід наголосити, що новизна розробленого способу не суперечить загальним напрямам розвитку сучасної хірургії хребта, а навпаки, органічно в них вписується. У світовій літературі останніх років простежується зростання інтересу до менш травматичних способів міжтілової фіксації, а також до персоналізованого вибору доступу та типу імплантату залежно від морфології спондилолістезу, стану сагітального балансу та супутніх ризиків [201, 202]. Власний спосіб МІЗМТСХ із дистракційним кейджем слід розглядати як одну з таких технологій, та з додатковою перевагою — вона пройшла послідовне локальне біомеханічне та клінічне обґрунтування.

Щодо клінічної апробації — її виконано у 24 пацієнтів, розподілених на основну (n=5), групу порівняння (n=11) і контрольну (n=8); вихідно когорта характеризувалася медіаною болю 8 [8; 9] балів за VAS, 48 [44; 50] балів за ODI, тривалістю симптомів 24 [18; 36] міс. і тривалістю консервативного лікування 12 [12; 18] міс. Рівень L4–L5 переважав у 66,7 % випадків, L5–S1 — у 33,3 %, а за Meyerding I ступінь виявлено у 54,2 % пацієнтів, II ступінь — у 37,5 %, III ступінь — у 8,3 % [196]. Невелика кількість пацієнтів в основній групі відображає характер клінічної апробації інноваційного методу, однак навіть за таких умов отримані результати мають високу інформативність, бо оцінено не окремі суб’єктивні враження, а чітко визначені дизайном дослідження інтраопераційні, рентгенологічні, неврологічні та функціональні показники.

Насамперед увагу привертають параметри операційної травми. У пацієнтів основної групи медіанна тривалість операції становила 180 [180; 180] хв., що відповідало групі стандартного MIS-PLIF, але було вдвічі менше, ніж у контрольній групі — 360 [240; 480] хв. Інтраопераційна крововтрата була найнижчою саме в основній групі — 100 [100; 100] мл проти 200 [200; 300] мл у групі порівняння та 500 [400; 600] мл у контролі; в

основній групі не виникало потреби ні в гемотрансфузії, ні в післяопераційному дренуванні. [196]. Така різниця свідчить, що авторський спосіб зменшує тканинну агресію і забезпечує більш щадний перебіг операції. Відсутність потреби в гемотрансфузії в основній групі додатково підкреслює клінічну значущість цього ефекту. Для пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом, особливо старших вікових груп і осіб із супутньою соматичною патологією, саме зменшення крововтрати часто є тим чинником, який визначає безпеку раннього післяопераційного періоду.

Не менш важливим є аналіз тривалості окремих етапів операції. Загальна тривалість втручання в основній групі становила 180 хв, тобто була зіставною зі стандартною МІЗМТСХ, але удвічі меншою, ніж у контрольній групі (360 хв) [196]. Це означає, що запропонована методика не «розплачується» за свою інноваційність додатковою часовою ціною. Навпаки, суттєве скорочення тривалості операційного доступу (30 хв проти 60 хв у групах порівняння і контролю) та ушивання рани (10 хв проти 40–45 хв) вказує, що основна відмінність полягає не стільки в загальному хронометражі, скільки в менший травматичності доступу та завершального етапу [196]. Це опосередковано підтверджує й менший обсяг крововтрати.

Водночас інтерпретація тривалості госпіталізації потребує обережності. У нашому матеріалі вона не була найкоротшою саме в основній групі, що, ймовірно, відображає особливості локальної організації післяопераційного нагляду, етапність освоєння нової технології та консервативну тактику спостереження в ранній фазі клінічної апробації. Отже, госпіталізацію не слід трактувати як головний критерій переваги чи недоліку методу. Значно більш інформативними виявилися крововтрата, ускладнення, функціональне відновлення і рентгенологічні показники корекції.

Ранні клінічні результати також є переконливими. Ранній клінічний ефект також мав чіткий кількісний вимір: зменшення болю після операції в основній групі становило 4 [4; 4] бали за VAS, у групі порівняння — 3 [3; 4] бали, у контрольній — 2 [1; 2] бали. У поєднанні з

рентгенометричними показниками — приростом міжтілової висоти на +10 [9; 11] мм, редукцією зміщення до 5 [5; 5] % і поліпшенням SVA до 5 [4; 6] см — це свідчить, що авторська методика забезпечує не лише меншу травматичність, а й більш повноцінну функціональну реконструкцію сегмента. [196]. Цю різницю не можна пояснити лише варіацією вихідної болючості. Вона є логічним наслідком поєднання меншої тканинної травми, відсутності вираженого пошкодження паравертебральних м'язів, кращого відновлення міжтілової висоти та ефективнішої непрямої декомпресії. Аналогічно слід тлумачити й динаміку ODI. Хоча абсолютні зміни індексу інвалідності в різних групах не завжди дають однозначно лінійну картину через малі підгрупи та відмінності початкового стану, у поєднанні з іншими параметрами вони підтверджують кращу ранню функціональну адаптацію після авторської методики [196].

Окремої уваги заслуговує рентгенологічна ефективність. Після операції у пацієнтів основної групи відзначено редукцію зміщення з 20 [20; 25] % до 5 [5; 5] %, збільшення міжхребцевого простору на 10 [9; 11] мм та покращення SVA з 10 [8; 11] см до 5 [4; 6] см [196]. Саме це поєднання (редукція трансляції, відновлення міжтілової висоти, поліпшення глобального сагітального вирівнювання) дозволяє говорити, що авторська методика дозволяє не лише стабілізувати сегмент, а й реконструювати його функціональну геометрію. Якщо зіставити це з біомеханічними результатами, стає зрозуміло, чому така корекція досягається без різкого зростання ризику механічних ускладнень: кейдж розвантажує задню систему і забезпечує адекватну передню опору.

Ускладнення як індикатор біологічної «ціни» хірургічної технології. Одним із найпереконливіших аргументів на користь запропонованої методики є структура ускладнень. У структурі ускладнень основна група продемонструвала найсприятливіший профіль: не зареєстровано випадків післяопераційної кровотечі, ліквореї, венозної тромбоемболії, атрофії паравертебральних м'язів, ушкодження твердої мозкової оболонки,

ушкодження невральних структур, розхитування гвинтів, мальпозиції конструкції чи неповноцінного спондилодезу; зафіксовано лише 1 повторну операцію. Для порівняння, у групі стандартної МІЗМТСХ атрофія паравертебральних м'язів спостерігалася у 10 із 11 пацієнтів (90,9 %), післяопераційна кровотеча — у 3 (27,3 %), ушкодження твердої мозкової оболонки — у 2 (18,2 %), ушкодження невральних структур — у 2 (18,2 %), тоді як у контрольній групі атрофія м'язів становила 12,5 %, післяопераційна кровотеча — 12,5 %, розхитування гвинтів — 12,5 %, мальпозиція металоконструкції — 12,5 %. [196]. Зафіксовано одну повторну операцію. У групі стандартної МІЗМТСХ та контрольній групі профіль ускладнень був суттєво менш сприятливим.

Найбільш показовим є показник атрофії паравертебральних м'язів. В основній групі вона не спостерігалась, тоді як у групі порівняння її частота була максимально високою [196]. Звісно, під час інтерпретації цього факту слід враховувати різну технічну сутність способів, невеликий розмір вибірки і особливості локальної діагностики м'язових змін, однак навіть за цих умов різниця настільки виразна, що її не можна ігнорувати. Вона прямо вказує: авторський спосіб справді реалізує переваги мінімально інвазивної ідеології, а не лише формально використовує менший шкірний доступ. Збереження м'язового футляра — це не косметичний ефект, а один із головних чинників зменшення післяопераційного болю, кращого функціонального відновлення і нижчого ризику хронізації симптомів.

Відсутність післяопераційних кровотеч і ліквореї в основній групі також є істотною. По суті, це відображає більшу керованість операційного процесу, меншу агресивність доступу та кращу відповідність методу анатомічним і механічним особливостям патології. Якщо метод забезпечує відновлення висоти, редукцію зміщення й стабілізацію при меншій травматичності, то це означає, що в ньому правильно вибудуваний компроміс між достатністю втручання та його безпечністю. Саме такий компроміс і є критерієм зрілої хірургічної технології.

З клінічної точки зору особливо цінним є те, що в основній групі було менше грубих механічних ускладнень, пов'язаних із фіксацією: не спостерігали розхитування гвинтів, мальпозицій конструкцій, неповноцінного спондилодезу [196]. Ці дані добре узгоджуються з результатами біомеханічного моделювання, яке показало розвантаження задньої системи при застосуванні дистракційного кейджа. Отже, між доклінічним етапом і клінічною фазою існує внутрішня узгодженість: модель передбачила менше перевантаження гвинтової системи, а клініка продемонструвала відсутність або мінімальну частоту відповідних ускладнень.

Певної обережності потребує трактування корінцевих симптомів у ранньому післяопераційному періоді. Транзиторні парестезії, гіпестезії або біль під час рухів стопи реєструвалися і в основній групі, однак їхня тривалість та вираженість були обмеженими [196]. Навіть у конвенційній когорті транзиторний післяопераційний радикуліт реєстрували у 4 із 19 пацієнтів (21,1 %), післяопераційну кровотечу — також у 4 із 19 (21,1 %), ліквореєю — у 1 із 19 (5,3 %), а ознаки атрофії паравертебральних м'язів у пізнішому періоді — у 11 із 19 (57,9 %). Це дозволяє конкретизувати, що рання неврологічна й м'язово-тканинна реакція після втручання має власний часовий профіль і не зводиться лише до формального факту декомпресії. Це спостереження свідчить, що навіть технічно вдала операція щодо спондилолістезу не усуває миттєво всіх проявів попередньої нейрокомпресії. Частина симптомів регресує поступово, у міру відновлення корінцевої провідності, зменшення набряку та адаптації тканин до нових анатомічних співвідношень. Тому оцінюючи клінічну ефективність методу, потрібно відрізняти ранню транзиторну симптоматику від справжніх стійких післяопераційних неврологічних ускладнень.

Одержані результати добре вкладаються в логіку сучасних міжнародних досліджень, але водночас мають низку власних відмінностей і доповнень. Систематичні огляди та метааналізи, присвячені порівнянню MIS-підходів з відкритими методиками, демонструють типову закономірність: мінімально

інвазивні операції асоціюються з меншою крововтратою, меншим ушкодженням м'яких тканин і часто — з кращим раннім функціональним відновленням, хоча не завжди забезпечують принципову перевагу за віддаленими клінічними результатами [49, 64]. Результати нашого власного дослідження розвивають цю тезу далі: не будь-який MIS-доступ автоматично гарантує оптимальний результат, якщо не розв'язано проблему достатньої міжтілової опори та корекції сагітального профілю.

У цьому аспекті авторська методика є кроком уперед порівняно зі стандартною MIZMTCX. Вона дозволяє зберегти переваги мінімально інвазивного доступу і водночас зменшити притаманні йому обмеження, пов'язані з установкою малих статичних кейджів. Саме тому більш виражене відновлення міжхребцевого простору і покращення сагітального вирівнювання в основній групі є закономірними. Ці спостереження співзвучні даним метааналізів щодо застосування розширюваних кейджів (англ. expandable cages), у яких автори вказують на кращу корекцію дискової висоти та, в окремих роботах, меншу частоту «просідання» (англ. subsidence) порівняно зі статичними імплантатами [204, 205]. Водночас, переваги розширюваних кейджів не завжди автоматично конвертуються у беззаперечну клінічну перевагу за всіма показниками. Саме тому цінність нашого дослідження полягає у поєднанні радіологічних, біомеханічних та клінічних даних: воно показує, за рахунок яких механізмів може виникати клінічна вигода.

Корисним є також зіставлення з сучасними роботами щодо вибору хірургічного доступу. У багатонаціональному дослідженні P. Pereira та співавт. було продемонстровано, що як передньобічні, так і задні малоінвазивні підходи можуть бути ефективними за спондилолістезу, але профіль ризиків і технічні обмеження у них різний [199]. Передньобічні доступи дозволяють добре відновлювати висоту і лордоз, проте несуть специфічні ризики з боку судин, черевних структур або поперекового сплетення. Задні MIS-методики краще інтегровані в звичну нейрохірургічну

логіку, але технічно обмежені щодо великого імплантату. Запропонований у нашому дослідженні спосіб частково долає саме цю слабку ланку заднього малоінвазивного підходу — дефіцит простору для введення достатньо потужного міжтілового імплантату. Це робить авторську методику конкурентоспроможною альтернативою без переходу до антеролатерального доступу.

Не менш важливим є зіставлення з сучасними класифікаційними підходами. Огляди K. Rangwalla та співавт. і подальші роботи наголошують, що дегенеративний спондилолістез слід класифікувати не лише за ступенем трансляції, а й з урахуванням параметрів глобального й сегментарного сагітального профілю, стабільності, вираженості стенозу та клінічного фенотипу [201, 202]. Наші результати прямо підтверджують доцільність такого багатовимірного підходу. Методика, яка одночасно впливає на трансляцію, міжтілову висоту, локальний лордоз, SVA і неврологічні симптоми, природно потребує і багатовимірної системи оцінки результату.

Узагальнюючи всі отримані результати, можна стверджувати, що основна перевага авторського способу полягає не в одному окремому показнику, а в новому балансі між травматичністю операції та достатністю реконструкції. У нейрохірургії (вертебрології) часто доводиться обирати між двома крайнощами: або більш радикальна реконструкція з більшою хірургічною травмою, або менш травматичний доступ із неповною геометричною корекцією. Розроблений спосіб МІЗМТСХ із дистракційними кейджами демонструє, що цей компроміс не є фатальним. Достатньо правильно сконструйований імплантат та правильно вибудуваний операційний алгоритм дозволяють поєднати малотравматичність із повноцінною міжтіловою підтримкою.

Саме з цієї точки зору слід трактувати сукупність отриманих переваг: меншу крововтрату, коротший етап доступу, коротший етап ушивання, відсутність вираженого м’язового ушкодження, кращу ранню динаміку болю, суттєве відновлення міжтілового простору, покращення сагітального

вирівнювання та сприятливий профіль ускладнень [196]. Кожний із цих показників окремо важливий, але лише разом вони формують якісно новий тип результату. Це вже не просто «варіант MIS-PLIF», а реконструктивна технологія з оптимізованою біомеханікою та зниженою біологічною ціною.

Особливу вагу цей висновок має в умовах української системи охорони здоров'я, де хірургічні технології мають оцінюватися не лише за теоретичною ефективністю, а й за реалістичною відтворюваністю, ресурсною доцільністю та безпечністю. Ускладнені логістичні умови, дефіцит окремих медичних виробів і необхідність раціонального використання ресурсів підсилюють значення методик, здатних забезпечити клінічний ефект із меншими витратами хірургічної агресії [195, 196]. Авторська методика МІЗМТСХ цілком відповідає цій логіці: вона не вимагає відмови від звичного заднього доступу, але істотно розширює його реконструктивні можливості.

Разом із тим варто зважати і на певні обмеження дослідження. Найочевиднішим із них є невеликий розмір вибірки, особливо в основній групі клінічної апробації. Це не нівелює значення отриманих даних, але означає, що результати слід розглядати як доказ реалістичності та ранньої клінічної переваги, а не як остаточний вердикт щодо всіх аспектів довгострокової ефективності. Другою особливістю є одноцентровий характер клінічного етапу. З одного боку, це забезпечило однорідність підходів, але з іншого — потребує подальшого зовнішнього підтвердження в інших клінічних середовищах.

Третьою обставиною є ранній характер частини клінічних оцінок. Для аналізу переваг щодо формування повноцінного кісткового блоку, віддаленої стабільності, суміжносегментарних змін та довготривалої збереженості сагітальної корекції необхідні довші терміни спостереження. Проте саме для цього й був потрібний поточний етап: він дозволив довести, що новий спосіб є механічно обґрунтованим, технічно здійсненним і клінічно перспективним. Такий етап є підґрунтям переходу до масштабніших проспективних лонгітюдних досліджень.

Четвертим нюансом є необхідність стандартизації окремих критеріїв відбору пацієнтів і подальшого уточнення показань. Уже теперішні результати свідчать, що найбільшу користь методика може мати у пацієнтів із симптомним дегенеративним спондилолістезом, нейрокомпресійними розладами, потребою у відновленні міжтілової висоти та корекції сегментарної геометрії. Однак у подальших дослідженнях варто точніше визначити, для яких морфотипів спондилолістезу, ступенів нестабільності, характеристик кісткової тканини та параметрів таза ця технологія є оптимальною.

Одержані результати мають кілька рівнів значущості. На теоретичному рівні уточнено патогенетичну модель дегенеративного поперекового спондилолістезу як поєднання нейрокомпресії, сегментарної нестабільності та порушення сагітальної геометрії. На методологічному рівні продемонстровано ефективність трансляційного підходу, коли клінічні спостереження, біометрія, моделювання, аналіз напружень та клінічна апробація інтегруються в єдину дослідницьку траєкторію. На прикладному рівні створено й обґрунтовано новий спосіб МІЗМТСХ із використанням дистракційних кейджів, який може бути використано у нейрохірургічній (вертебрологічній) практиці для зменшення операційної травми та підвищення якості корекції.

Практична цінність дослідження полягає також у визначенні критеріїв ефективності авторського способу. До них доцільно віднести: мінімізацію інтраопераційної крововтрати; скорочення травматичності доступу; відсутність грубого ушкодження паравертебральних м’язів; значиме відновлення міжхребцевого простору; редукцію аксіальної трансляції; покращення параметрів SVA і тазового балансу; регрес больового синдрому та неврологічного дефіциту; низьку частоту механічних і інфекційних ускладнень [195, 196]. Саме багатокомпонентність цих критеріїв відрізняє сучасне бачення результату від застарілої одновимірної оцінки лише за фактом фіксації або декомпресії.

Важливо й те, що сформовано основу для подальшої раціоналізації підходів до лікування дегенеративного спондилолістезу. Показано, що біомеханічно обґрунтована інженерна модифікація імплантату може змінити не лише техніку операції, а й її клінічні наслідки. Це відкриває перспективи для наступних досліджень — від порівняння різних режимів дистракції і форм кейджів до розробки алгоритмів індивідуального вибору імплантату за даними передопераційної спондилографії, КТ та МРТ.

Запропонований спосіб МІЗМТСХ із використанням дистракційних кейджів — це методика, яка природно випливає з патогенезу захворювання і відповідає сучасним вимогам до хірургії дегенеративного спондилолістезу. Вона базується на розумінні того, що успішне лікування повинно одночасно усунути нейрокомпресію, стабілізувати сегмент, відновити міжтілову опору, покращити сагітальний профіль і зробити все це з мінімально можливою операційною травмою. Саме в такій багатовекторності й полягає її головна перевага.

Послідовність отриманих доказів є внутрішньо несуперечливою. Клініко-морфологічний етап показав значення стенозу та неврологічного дефіциту. Біометричний етап довів важливість сегментарного лордозу, тазових параметрів і SVA як індикаторів функціонального стану хребта. Біомеханічне моделювання підтвердило можливість ефективного відновлення передньої опори без патологічного перевантаження суміжних сегментів. Результати аналізу напружено-деформованого стану дозволи засвідчити, що дистракційний кейдж бере на себе основний компресивний компонент навантаження та розвантажує задню систему. У клінічній апробації продемонстровано, що це механічне рішення трансформується у меншу крововтрату, кращу ранню динаміку болю, кращу корекцію міжтілової висоти й сприятливий профіль ускладнень [195, 196, 203–205].

Звідси випливає й головний підсумковий висновок: для пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом оптимальною є така стабілізація, яка відновлює фізіологічні механічні взаємовідношення у

сегменті при мінімальній хірургічній агресії. Саме це і забезпечує розроблений спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів.

Окремо слід підкреслити методологічне значення проведеного дослідження для подальших фундаментальних і прикладних досліджень у галузі нейрохірургії хребта. У більшості клінічних праць нові технології оцінюють за принципом «до/після», обмежуючись описом кількох клінічних показників та коротким переліком ускладнень. У виконаній роботі реалізовано іншу, продуктивнішу схему: спочатку визначено клінічну проблему в її морфологічному та неврологічному вимірах; далі — встановлено, які саме параметри найкраще відображають функціональний стан сегмента; потім перевірено можливість цільового впливу на ці параметри в біомеханічній моделі; після цього проаналізовано розподіл напружень у системі фіксації; і лише тоді проведено клінічну апробацію. Така послідовність дає підстави вважати запропонований підхід еталонним для розробки інноваційних вертебрологічних технологій.

Зазначена логіка особливо цінна тим, що вона мінімізує ризик випадкових або хибно інтерпретованих висновків. Якщо новий імплантат демонструє кращий клінічний результат, але не має зрозумілого механічного обґрунтування, завжди залишається сумнів щодо відтворюваності ефекту. Якщо ж біомеханічна модель підтверджує раціональність конструкції, а клінічна апробація демонструє результати, які узгоджуються з модельними даними, то виникає якісно інший рівень доказовості. Саме це реалізовано у нашому дослідженні: механічне розвантаження задньої системи, передбачене моделлю, підтверджується низькою частотою механічних ускладнень; здатність кейджа відновлювати міжтілову висоту, закладена конструктивно, реалізується у клінічному збільшенні міжхребцевого простору; очікуване зменшення травматичності доступу збігається зі зменшенням крововтрати та відсутністю атрофії паравертебральних м’язів.

Ще один важливий методологічний аспект полягає у виборі критеріїв оцінки. Показано, що для повноцінної характеристики ефективності лікування дегенеративного спондилолістезу недостатньо обмежуватися лише одним із блоків показників — наприклад, тільки клінічними скаргами, тільки рентгенометрією або тільки частотою ускладнень. Найбільш інформативним же є комплексний підхід, який охоплює: 1) неврологічні та больові прояви; 2) функціональні шкали; 3) інтраопераційні показники травматичності; 4) рентгенологічні індикатори реконструкції сегмента; 5) механічну надійність системи у ранньому та середньому періоді. Саме така система критеріїв дозволяє уникати однобічних висновків, коли формально добра стабілізація супроводжується високою біологічною ціною або, навпаки, мала травматичність поєднується з неповною реконструкцією сегмента.

Практичне значення цих міркувань виходить за межі лише обраного напрямку. Фактично запропоновано модель того, як мають оцінюватися нові технології у нейрохірургії хребта: через поєднання клінічної доцільності, біомеханічної обґрунтованості та організаційної реалістичності. Саме це робить отримані результати цінними не лише для конкретної категорії пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом, а й для ширшого кола задач, пов’язаних із удосконаленням малоінвазивних способів міжтілової стабілізації.

Перспективи подальших досліджень спрямовані в кількох взаємодоповнювальних напрямах. Перший напрям — клінічний. Необхідним є розширення вибірки пацієнтів із накопиченням достатньої кількості спостережень для стратифікованого аналізу залежно від рівня ураження, ступеня зміщення, типу стенозу, показників кісткової щільності, величини тазових параметрів та супутнього ожиріння. Це дозволить точніше окреслити клінічний фенотип пацієнта, для якого застосування дистракційного кейджа є максимально доцільним.

Другий напрям — радіолого-біомеханічний. Доцільно поглибити вивчення питання, як саме варіювання розмірів кейджа, режиму його

розкриття, позиціонування у міжтіловому просторі та поєднання з різними схемами транспедикулярної фіксації впливають на відновлення локального лордозу, величину «просадки» (англ. subsidence), ризик ротаційної нестабільності та навантаження на суміжні сегменти. Такі дослідження можуть лягти в основу індивідуалізованого передопераційного планування, коли геометрія імплантату добирається не емпірично, а відповідно до конкретного морфотипу пацієнта.

Третій напрям — функціонально-реабілітаційний. Зменшення травматичності операції відкриває можливість для оптимізації післяопераційних маршрутів пацієнта: ранньої вертикалізації, скорочення обсягу анальгетичної підтримки, персоналізованих програм реабілітації, а в перспективі — і для перегляду критеріїв стаціонарного лікування. Оскільки в нашому матеріалі тривалість госпіталізації, відображала не лише особливості методу, а й обережну тактику спостереження на етапі його клінічної апробації, у подальших дослідженнях важливо дослідити, якою мірою вдосконалення періопераційного менеджменту дозволить повністю реалізувати переваги малоінвазивної технології.

Четвертий напрям — науково-організаційний. Запропонований спосіб може стати основою для формування локальних клінічних протоколів або алгоритмів вибору методу хірургічного лікування дегенеративного спондилолістезу. Йдеться не про жорстку стандартизацію, а про розробку практичних критеріїв, які допомагають визначити, коли доцільно використовувати саме малоінвазивну задню міжтілову стабілізацію з дистракційним кейджем, а коли слід віддати перевагу іншій реконструктивній стратегії. У цьому сенсі досягнуто не лише науковий результат, а й підґрунтя для наступного етапу — впровадження в клінічну практику з подальшим аудитом ефективності.

Висновки до розділу 4

1. Дегенеративний спондилолістез поперекового відділу хребта слід розглядати як комплексне захворювання, у структурі якого поєднуються нейрокомпресійні розлади, сегментарна нестабільність та порушення сагітальної геометрії, тому ефективне хірургічне лікування має одночасно вирішувати завдання декомпресії, стабілізації та реконструкції міжтілової опори.

2. Вивчення розмірів хребтового каналу та динаміки неврологічних порушень показало, що клінічний результат операції визначається не лише усуненням стенозу, а й відновленням анатомо-біомеханічних взаємовідношень у хребтовому руховому сегменті.

3. Визначення сегментарного лордозу, параметрів хребтово-тазового балансу та сагітального контуру хребта дало змогу обґрунтувати їх роль як інтегральних показників функціонального стану хребта, придатних для оцінки як вихідної тяжкості патології, так і повноти післяопераційної корекції.

4. Біомеханічне моделювання та аналіз напружено-деформованого стану системи «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж» довели, що дистракційний кейдж забезпечує ефективну передню міжтілову підтримку, приймає на себе основний компресивний компонент навантаження та зменшує перевантаження задньої системи фіксації.

5. Розроблений власний спосіб МІЗМТСХ із використанням дистракційних кейджів усуває технічне обмеження стандартної малоінвазивної міжтілової стабілізації, пов’язане з неможливістю введення достатньо потужного імплантату через вузький доступ, та дозволяє поєднати мінімальну травматичність із повноцінною реконструкцією сегмента.

6. Розроблена авторська методика асоціюється з меншою інтраопераційною крововтратою, коротшими етапами доступу та ушивання рани, значним відновленням міжхребцевого простору, покращенням параметрів сагітального вирівнювання, вираженим зменшенням болю та

сприятливим профілем ускладнень, що свідчить про її клінічну доцільність і перспективність для подальшого впровадження.

7. Сукупність одержаних результатів дозволяє вважати, що малоінвазивна задня міжтілова стабілізація хребців із використанням дистракційних кейджів є патогенетично обґрунтованим, біомеханічно вивіреним і клінічно перспективним напрямом удосконалення хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом.

За матеріалами розділу опубліковано:

1. Stognii AV, Piatykop BO, Yaresko OV, Popuyskapka KO, Pidgaiska OO, Karpinsky MY. Study of stress distribution in a model of posterior intervertebral spondylodesis of the lumbar spine (PEEK implant and distraction cage) [Ukrainian: Вивчення розподілу напружень моделі заднього міжхребцевого спондилодезу поперекового відділу хребта (імплантат PEEK і дистракційний кейдж)]. Trauma [Ukrainian: Травма] [Internet]. 2022;23[6]:47–55. Available from: https://www.mif-ua.com/archive/article/52502 DOI: 10.22141/1608-1706.6.23.2022.923.

2. Stognii AV, Piatykop VO, Babalian IO. Substantiation and development of an optimal method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2025;31[2]:55–64. Available from: https://theunj.org/article/view/322446 DOI: 10.25305/unj.322446.

3. Stognii AV, Piatykop VO, Efficacy of minimally invasive posterior interbody stabilization with distraction cages in lumbar spondylolisthesis. Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine, Inter Collegas [Internet], https://doi.org/10.35339/ic.2025.12.3

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальне науково-прикладне завдання нейрохірургії, яке полягає у підвищенні ефективності хірургічного лікування пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами шляхом біомеханічного обґрунтування, розробки та клінічної апробації способу малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів.

1. З'ясовано, що традиційне хірургічне лікування дегенеративного спондилолістезу поперекового відділу хребта забезпечує статистично значуще розширення хребтового каналу та регрес нейрокомпресійної симптоматики. У конвенційній когорті (n=19) передньозадній діаметр центрального каналу збільшувався з 7,5 [7,2; 7,7] мм до 11,4 [11,0; 11,9] мм, площа дурального мішка — з 86 [79; 96] мм² до 140 [130; 149] мм², висота латерального рецесу — з 2,8 [2,5; 3,0] мм до 4,5 [4,2; 4,8] мм (в усіх випадках $p<0,001$). Через 6 міс після операції частота нейрогенної переміжної кульгавості зменшувалася зі 100,0 % до 10,5 %, радикулопатії/корінцевого болю — зі 100,0 % до 26,3 %, чутливих порушень — зі 100,0 % до 21,1 % ($p<0,001$); регрес парезів нижньої кінцівки з 42,1 % до 10,5 % мав характер вираженої позитивної тенденції ($p=0,070$).

2. У пацієнтів конвенційної когорти (n=19) після операції/через 6 міс сегментарний лордоз зростав з 9 [8; 10]° до 12 [10; 13]°, поперековий лордоз — з 42 [40; 44]° до 47 [44; 50]°, sacral slope — з 30 [29; 32]° до 33 [32; 34]°, тоді як pelvic tilt зменшувався з 28 [24; 30]° до 25 [22; 28]°, a sagittal vertical axis — з 10 [8; 12] см до 6 [6; 7] см; у всіх випадках $p<0,001$. Встановлено, що відновлення локальної та глобальної сагітальної геометрії має безпосереднє функціональне значення і повинно розглядатися як одна з цільових кінцевих точок операції.

3. Щодо відновлення рівня сегментарного лордозу, при використанні дистракційних кейджів за даними біомеханічної моделі L3-S1 при

вертикальному навантаженні 700 Н кейдж створює передумови для відновлення сегментарного лордозу, параметрів хребтово-тазового балансу та сагітального контуру хребта. Клінічно це підтверджено в основній групі (n=5): відсоток зміщення зменшувався з 20 [20; 25] % до 5 [5; 5] %, медіана корекції SVA становила 5 [4; 5] см, а міжхребцевий простір збільшувався на 10 [10; 11] мм. Для показників SVA, PT, SS та відсотка зміщення у внутрішньогруповому аналізі отримано односпрямований ефект (p=0,062).

4. В системі «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж» новий імплантат забезпечує біомеханічно сприятливий перерозподіл навантаження. Порівняно з моделлю PEEK напруження на нижній площині тіла L5 становило 40,7 МПа проти 40,2 МПа, а в тілі S1 — 14,5 МПа проти 13,5 МПа, тобто критичного зростання навантаження на замикальні пластинки не відбулося. Напруження в зоні входу гвинтів у S1 зменшувалося з 35,7 до 17,8 МПа, а у вузлах кріплення гвинтів зі стрижнями — з 80,8 до 72,2 МПа. Дистракційний кейдж перебирає на себе значну частину осьового навантаження, підсилює передню міжтілову опору та зменшує ризик перевантаження задньої системи фіксації.

5. Розроблено та обґрунтовано власний спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням титанового дистракційного кейджа, який вводять через обмежений доступ у колабованому стані з подальшою дистракцією in situ. Запропонований спосіб усуває ключове технічне обмеження стандартної MIS-PLIF (неможливість введення імплантату достатнього реконструктивного потенціалу через вузький операційний коридор) і забезпечує кероване відновлення міжтілової висоти, непряму декомпресію, покращення форамінального резерву та редукцію аксіальної трансляції без непропорційного збільшення операційної травматичності.

6. Використання авторського способу в клініці підтверджує його переваги порівняно зі стандартною MIS-PLIF та іншими способами міжтілового спондилодезу. В основній групі (n=5) тривалість доступу

становила 30 [30; 30] хв проти 60 [60; 60] хв та 60 [60; 90] хв, тривалість ушивання — 10 [10; 10] хв проти 40 [40; 40] хв та 45 [40; 50] хв, інтраопераційна крововтрата — 100 [100; 100] мл проти 200 [200; 275] мл та 475 [415; 563] мл ($p<0,001$). Зменшення болю за VAS було найбільшим — 4 [4; 4] бали проти 3 [3; 3] і 2 [1; 2] балів ($p=0,005$); післяопераційно не зареєстровано кровотечі, ліквореї, атрофії паравертебральних м'язів, ушкодження твердої мозкової оболонки, ушкодження невральних структур, розхитування гвинтів, мальпозиції металоконструкцій та неповноцінного спондилодезу. Отримані результати обґрунтовують клінічну доцільність подальшого впровадження авторської методики.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. У пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом рішення про хірургічне лікування слід приймати не лише за наявністю рентгенологічно підтвердженого лістезу, а за сукупністю трьох критеріїв: нейрокомпресійних проявів; ознак сегментарної нестабільності й стенозу; неефективності повноцінного курсу консервативного лікування тривалістю щонайменше 6–12 міс.

2. Комплексне передопераційне планування має включати: МРТ для оцінки ступеня стенозу й компресії невральних структур; КТ та рентгенографію у функціональних проекціях для аналізу кісткової анатомії; розрахунок PI, PT, SS, SVA, LL, SL; визначення відсотка зміщення, висоти міжхребцевого простору й форамінального резерву.

3. Авторський спосіб МІЗМТСХ із дистракційним кейджем доцільно використовувати передусім у пацієнтів із одно- або домінантно однорівневим дегенеративним спондилолістезом L4–L5 чи L5–S1 I–II ступеня та в ретельно відібраних випадках III ступеня, коли необхідно одночасно забезпечити декомпресію, редукцію лістезу, відновлення висоти диска та покращення локального і глобального сагітального балансу через обмежений доступ. Запропоновану методику не слід розглядати як механічну заміну будь-якому випадку стандартної MIS-PLIF. Її найбільша перевага реалізується тоді, коли вузький малоінвазивний доступ обмежує можливість введення імплантату звичайного розміру, а клінічна ситуація вимагає реконструктивного ефекту, більшого, ніж може забезпечити статичний кейдж.

4. Під час операції необхідно дотримуватися послідовності технічних етапів: виконання малоінвазивного доступу; достатній реліз дуговідросткових суглобів і міжтілового простору; ретельна підготовка дискового ложа зі збереженням кортикальних замикальних пластинок; введення кейджа у колабованому стані через мікрофорамінальний коридор; поетапна дистракція in situ під рентгенологічним контролем; завершальна транспедикулярна

фіксація з редукцією аксіальної трансляції. Інтраопераційною ціллю має бути не максимальна, а функціонально доцільна корекція. Варто прагнути до зменшення відсотка зміщення, збільшення висоти міжхребцевого простору, покращення форамінального резерву та наближення показників PT, SS, SVA і сегментарного лордозу до передопераційно розрахованих цільових значень. Для мінімізації неврологічних ускладнень слід уникати надмірної тракції дурального мішка та корінців. Перевага колабованого введення кейджа з подальшою дистракцією in situ має використовуватися як засіб зменшення обсягу маніпуляції в хребтовому каналі.

5. У пацієнтів із факторами ризику неспроможності фіксації (зниженою щільністю кісткової тканини, несприятливою геометрією S1, вираженим зсувним навантаженням на рівні L5–S1) доцільно заздалегідь планувати посилення транспедикулярної опори, зміну траєкторії проведення гвинтів або аугментаційні рішення за індивідуальними показаннями.

6. Післяопераційний контроль слід проводити за єдиним протоколом: оцінювання болю за VAS у ранньому післяопераційному періоді; оцінювання неврологічного статусу до виписки; контрольна рентгенографія у ранні строки; повторне оцінювання ODI у віддаленому періоді; МРТ або КТ — за наявності клінічних підстав або сумніву щодо формування кісткового блоку.

7. Як критерії ефективності й безпеки авторського способу слід використовувати шість взаємопов’язаних блоків: анатомічний, біомеханічний, клінічний, операційний, безпековий і трансляційний.

8. Спосіб може бути рекомендований для впровадження у відділеннях нейрохірургії та нейровертебрології, які володіють технікою MIS-PLIF, мають досвід роботи з транспедикулярною фіксацією та забезпечені можливістю повноцінного рентгенологічного контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. O'Sullivan K, O'Keeffe M, Forster BB, Qamar SR, van der Westhuizen A, O'Sullivan PB. Managing low back pain in active adolescents. Best Pract Res Clin Rheumatol. 2019 Feb;33[1]:102–21. DOI: 10.1016/j.berh.2019.02.005.

2. Zhang GY, Incze MA. I Am Worried I Have Sciatica-What Do I Need to Know? JAMA Intern Med. 2024 Jan 1;184[1]:122. DOI: 10.1001/jamainternmed.2023.5990.

3. Beutler WJ, Fredrickson BE, Murtland A, Sweeney CA, Grant WD, Baker D. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis: 45-year follow-up evaluation. Spine (Phila Pa 1976). 2003 May 15;28[10]:1027–35; discussion 1035. DOI: 10.1097/01.BRS.0000061992.98108.A0.

4. Rajaee SS, Bae HW, Kanim LEA, Delamarter RB. Spinal fusion in the United States: analysis of trends from 1998 to 2008. Spine (Phila Pa 1976). 2012 Jan 1;37[1]:67–76. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31820cccfb.

5. Yang F, Xie B, Zhang H, Li T, Mao J, Chen Z, et al. Return to flight duty (RTFD) after posterior lumbar spine surgery for symptomatic lumbar disc herniation (LDH) and lumbar isthmic spondylolisthesis (LIS) in Chinese military pilots. BMC Musculoskelet Disord. 2024 Jan 20;25[1]:81. DOI: 10.1186/s12891-024-07175-w.

6. Ashworth E, Baxter D, Gibb CI, Wilson M, Bull AMJ. Injuries in Fatalities of Dismounted Blast: Identification of Four Mechanisms of Head and Spine Injury. J Neurotrauma. 2024 July;41[13–14]:e1678–84. DOI: 10.1089/neu.2023.0289.

7. Nekhlopochyn O, Verbov V, Tsymbaliuk I, Cheshuk I, Vorodi M. The choice of classification to determine the optimal tactics for treatment of the thoracolumbar junction traumatic injuries. Pol Merkur Lekarski. 2024;52[1]:104–11. DOI: 10.36740/Merkur202401116.

8. Ferrari S, Vanti C, Pellizzer M, Dozza L, Monticone M, Pillastrini P. Is there a relationship between self-efficacy, disability, pain and sociodemographic

characteristics in chronic low back pain? A multicenter retrospective analysis. Arch Physiother. 2019;9:9. DOI: 10.1186/s40945-019-0061-8.

9. Brusko GD, Wang MY. Endoscopic Lumbar Interbody Fusion. Neurosurg Clin N Am. 2020 Jan;31[1]:17–24. DOI: 10.1016/j.nec.2019.08.002.

10. Cloward RB. The treatment of ruptured lumbar intervertebral discs by vertebral body fusion. I. Indications, operative technique, after care. J Neurosurg. 1953 Mar;10[2]:154–68. DOI: 10.3171/jns.1953.10.2.0154.

11. Steffee AD, Sitkowski DJ. Posterior lumbar interbody fusion and plates. Clin Orthop Relat Res. 1988 Feb;227:99–102.

12. Willems P, Hoebink E, van Royen B. Richtlijn: Geïnstrumenteerde Spinale Wervelkolomchirurgie. 2017.

13. Vanti C, Ferrari S, Guccione AA, Pillastrini P. Lumbar spondylolisthesis: STATE of the art on assessment and conservative treatment. Arch Physiother. 2021 Aug 9;11[1]:19. DOI: 10.1186/s40945-021-00113-2.

14. Shamrock AG, Donnally III CJ, Varacallo M. Lumbar Spondylolysis And Spondylolisthesis. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 [cited 2022 Sept 16]. Available from: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448122/

15. Warner WC, de Mendonça RGM. Adolescent Spondylolysis: Management and Return to Play. Instr Course Lect. 2017 Feb 15;66:409–13.

16. Donaldson LD. Spondylolysis in elite junior-level ice hockey players. Sports Health. 2014 July;6[4]:356–9. DOI: 10.1177/1941738113519958.

17. Gagnet P, Kern K, Andrews K, Elgafy H, Ebraheim N. Spondylolysis and spondylolisthesis: A review of the literature. J Orthop. 2018 June;15[2]:404–7. DOI: 10.1016/j.jor.2018.03.008.

18. Bydon M, Alvi MA, Goyal A. Degenerative Lumbar Spondylolisthesis: Definition, Natural History, Conservative Management, and Surgical Treatment. Neurosurg Clin N Am. 2019 July;30[3]:299–304. DOI: 10.1016/j.nec.2019.02.003.

19. Shadani A, Mohseni Bandpei MA, Rahmani N, Bassampour SA. A Comparison of the Abdominal and Lumbar Multifidus Muscle Size in Patients With

Lumbar Spondylolisthesis and Healthy Patients at Rest and During Contraction Using Ultrasonography. J Manipulative Physiol Ther. 2018 Oct;41[8]:691–7. DOI: 10.1016/j.jmpt.2018.07.001.

20. А.М В, Я.В Ф. Больові синдроми при рІзних видах нестабільності у поперековому відділі хребта. Травма [Internet]. 2020 [cited 2022 Sept 16];21[4]:28–32. Available from: https://cyberleninka.ru/article/n/bolovi-sindromi-pri-riznih-vidah-nestabilnosti-u-poperekovomu-viddili-hrebta

21. Chan AK, Sharma V, Robinson LC, Mummaneni PV. Summary of Guidelines for the Treatment of Lumbar Spondylolisthesis. Neurosurg Clin N Am. 2019 July;30[3]:353–64. DOI: 10.1016/j.nec.2019.02.009.

22. Caelers IJMH, Rijkers K, van Hemert WLW, de Bie RA, van Santbrink H. [Lumbar spondylolisthesis; common, but surgery is rarely needed]. Ned Tijdschr Geneeskd. 2019 Sept 24;163:D3769.

23. Ishimoto Y, Yoshimura N, Muraki S, Yamada H, Nagata K, Hashizume H, et al. Association of Lumbar Spondylolisthesis With Low Back Pain and Symptomatic Lumbar Spinal Stenosis in a Population-based Cohort: The Wakayama Spine Study. Spine (Phila Pa 1976). 2017 June 1;42[11]:E666–71. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001960.

24. Ferrari S, Striano R, Lucking E, Pillastrini P, Monticone M, Vanti C. Does the awareness of having a lumbar spondylolisthesis influence self-efficacy and kinesiophobia? A retrospective analysis. Arch Physiother. 2019;9:16. DOI: 10.1186/s40945-019-0070-7.

25. de Moraes Vieira EB, de Góes Salvetti M, Damiani LP, de Mattos Pimenta CA. Self-efficacy and fear avoidance beliefs in chronic low back pain patients: coexistence and associated factors. Pain Manag Nurs. 2014 Sept;15[3]:593–602. DOI: 10.1016/j.pmn.2013.04.004.

26. Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. J Spinal Disord. 1992 Dec;5[4]:390–6; discussion 397. DOI: 10.1097/00002517-199212000-00002.

27. Hsu H-C, Chang C-J, Tung H-H, Wang T-J. Disability, emotional distress and well-being among patients with lumbar spondylolisthesis. J Clin Nurs. 2019 Nov;28[21–22]:3866–78. DOI: 10.1111/jocn.14992.

28. Sengupta DK, Herkowitz HN. Degenerative spondylolisthesis: review of current trends and controversies. Spine (Phila Pa 1976). 2005 Mar 15;30[6 Suppl]:S71-81. DOI: 10.1097/01.brs.0000155579.88537.8e.

29. Denard PJ, Holton KF, Miller J, Fink HA, Kado DM, Marshall LM, et al. Back pain, neurogenic symptoms, and physical function in relation to spondylolisthesis among elderly men. Spine J. 2010 Oct;10[10]:865–73. DOI: 10.1016/j.spinee.2010.07.004.

30. Kreiner DS, Baisden J, Mazanec DJ, Patel RD, Bess RS, Burton D, et al. Guideline summary review: an evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of adult isthmic spondylolisthesis. Spine J. 2016 Dec;16[12]:1478–85. DOI: 10.1016/j.spinee.2016.08.034.

31. Lafian AM, Torralba KD. Lumbar Spinal Stenosis in Older Adults. Rheum Dis Clin North Am. 2018 Aug;44[3]:501–12. DOI: 10.1016/j.rdc.2018.03.008.

32. Denard PJ, Holton KF, Miller J, Fink HA, Kado DM, Yoo JU, et al. Lumbar spondylolisthesis among elderly men: prevalence, correlates, and progression. Spine (Phila Pa 1976). 2010 May 1;35[10]:1072–8. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181bd9e19.

33. He L-C, Wang Y-XJ, Gong J-S, Griffith JF, Zeng X-J, Kwok AWL, et al. Prevalence and risk factors of lumbar spondylolisthesis in elderly Chinese men and women. Eur Radiol. 2014 Feb;24[2]:441–8. DOI: 10.1007/s00330-013-3041-5.

34. Jacobsen S, Sonne-Holm S, Rovsing H, Monrad H, Gebuhr P. Degenerative lumbar spondylolisthesis: an epidemiological perspective: the Copenhagen Osteoarthritis Study. Spine (Phila Pa 1976). 2007 Jan 1;32[1]:120–5. DOI: 10.1097/01.brs.0000250979.12398.96.

35. Farfan HF. The pathological anatomy of degenerative spondylolisthesis. A cadaver study. Spine (Phila Pa 1976). 1980 Oct;5[5]:412–8. DOI: 10.1097/00007632-198009000-00004.

36. Chen J-C, Chan WP, Katz JN, Chang WP, Christiani DC. Occupational and personal factors associated with acquired lumbar spondylolisthesis of urban taxi drivers. Occup Environ Med. 2004 Dec;61[12]:992–8. DOI: 10.1136/oem.2003.011775.

37. Kalichman L, Kim DH, Li L, Guermazi A, Berkin V, Hunter DJ. Spondylolysis and spondylolisthesis: prevalence and association with low back pain in the adult community-based population. Spine (Phila Pa 1976). 2009 Jan 15;34[2]:199–205. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31818edcfd.

38. Sakai T, Sairyo K, Takao S, Nishitani H, Yasui N. Incidence of lumbar spondylolysis in the general population in Japan based on multidetector computed tomography scans from two thousand subjects. Spine (Phila Pa 1976). 2009 Oct 1;34[21]:2346–50. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181b4abbe.

39. Kalichman L, Hunter DJ. Diagnosis and conservative management of degenerative lumbar spondylolisthesis. Eur Spine J. 2008 Mar;17[3]:327–35. DOI: 10.1007/s00586-007-0543-3.

40. Belfi LM, Ortiz AO, Katz DS. Computed tomography evaluation of spondylolysis and spondylolisthesis in asymptomatic patients. Spine (Phila Pa 1976). 2006 Nov 15;31[24]:E907-910. DOI: 10.1097/01.brs.0000245947.31473.0a.

41. Cai T, Yang L, Cai W, Guo S, Yu P, Li J, et al. Dysplastic spondylolysis is caused by mutations in the diastrophic dysplasia sulfate transporter gene. Proc Natl Acad Sci U S A. 2015 June 30;112[26]:8064–9. DOI: 10.1073/pnas.1502454112.

42. Tower SS, Pratt WB. Spondylolysis and associated spondylolisthesis in Eskimo and Athabascan populations. Clin Orthop Relat Res. 1990 Jan;[250]:171–5.

43. Vogt MT, Rubin DA, Palermo L, Christianson L, Kang JD, Nevitt MC, et al. Lumbar spine listhesis in older African American women. Spine J. 2003 Aug;3[4]:255–61. DOI: 10.1016/s1529-9430(03)00024-x.

44. Wang YXJ, Káplár Z, Deng M, Leung JCS. Lumbar degenerative spondylolisthesis epidemiology: A systematic review with a focus on gender-specific and age-specific prevalence. J Orthop Translat. 2017 Oct;11:39–52. DOI: 10.1016/j.jot.2016.11.001.

45. Joo P, Ge L, Mesfin A. Surgical Management of the Lumbar Spine in Rheumatoid Arthritis. Global Spine J. 2020 Sept;10[6]:767–74. DOI: 10.1177/2192568219886267.

46. Khashab M, AlMaeen BN, Elkhalifa M. Scoliosis Associated with Lumbar Spondylolisthesis: Spontaneous Resolution and Seven-Year Follow-Up. Cureus. 2020 Feb 6;12[2]:e6904. DOI: 10.7759/cureus.6904.

47. Srivastava A, Bayley E, Boszczyk BM. The management of high-grade spondylolisthesis and co-existent late-onset idiopathic scoliosis. Eur Spine J. 2016 Oct;25[10]:3027–31. DOI: 10.1007/s00586-014-3519-0.

48. Kim DH, Lim CH, Heo JY, Jang YJ, Choi YS. Feasibility of nerve stimulator as a supplemental aid for lumbar transforaminal epidural block. Clin Orthop Surg. 2014 Sept;6[3]:324–8. DOI: 10.4055/cios.2014.6.3.324.

49. Ravindra VM, Senglaub SS, Rattani A, Dewan MC, Härtl R, Bisson E, et al. Degenerative Lumbar Spine Disease: Estimating Global Incidence and Worldwide Volume. Global Spine J. 2018 Dec;8[8]:784–94. DOI: 10.1177/2192568218770769.

50. Lurie J, Tomkins-Lane C. Management of lumbar spinal stenosis. BMJ. 2016 Jan 4;352:h6234. DOI: 10.1136/bmj.h6234.

51. Devine JG, Schenk-Kisser JM, Skelly AC. Risk factors for degenerative spondylolisthesis: a systematic review. Evid Based Spine Care J. 2012 May;3[2]:25–34. DOI: 10.1055/s-0031-1298615.

52. Wáng YXJ, Deng M, Griffith JF, Kwok AWL, Leung JC, Ahuja AT, et al. Lumbar Spondylolisthesis Progression and De Novo Spondylolisthesis in Elderly Chinese Men and Women: A Year-4 Follow-up Study. Spine (Phila Pa 1976). 2016 July 1;41[13]:1096–103. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001507.

53. Matsunaga S, Sakou T, Morizono Y, Masuda A, Demirtas AM. Natural history of degenerative spondylolisthesis. Pathogenesis and natural course of the slippage. Spine (Phila Pa 1976). 1990 Nov;15[11]:1204–10. DOI: 10.1097/00007632-199011010-00021.

54. Matsunaga S, Ijiri K, Hayashi K. Nonsurgically managed patients with degenerative spondylolisthesis: a 10- to 18-year follow-up study. J Neurosurg. 2000 Oct;93[2 Suppl]:194–8. DOI: 10.3171/spi.2000.93.2.0194.

55. Enyo Y, Yoshimura N, Yamada H, Hashizume H, Yoshida M. Radiographic natural course of lumbar degenerative spondylolisthesis and its risk factors related to the progression and onset in a 15-year community-based cohort study: the Miyama study. J Orthop Sci. 2015 Nov;20[6]:978–84. DOI: 10.1007/s00776-015-0759-8.

56. Qin R, Wu T, Liu H, Zhou B, Zhou P, Zhang X. Minimally invasive versus traditional open transforaminal lumbar interbody fusion for the treatment of low-grade degenerative spondylolisthesis: a retrospective study. Sci Rep. 2020 Dec 14;10[1]:21851. DOI: 10.1038/s41598-020-78984-x.

57. Karsy M, Bisson EF. Surgical Versus Nonsurgical Treatment of Lumbar Spondylolisthesis. Neurosurg Clin N Am. 2019 July;30[3]:333–40. DOI: 10.1016/j.nec.2019.02.007.

58. Tenny S, Gillis CC. Spondylolisthesis. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 [cited 2022 Sept 23]. Available from: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK430767/

59. Bouras T, Korovessis P. Management of spondylolysis and low-grade spondylolisthesis in fine athletes. A comprehensive review. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2015 July;25 Suppl 1:S167-175. DOI: 10.1007/s00590-014-1560-7.

60. Villavicencio AT, Serxner BJ, Mason A, Nelson EL, Rajpal S, Faes N, et al. Unilateral and bilateral pedicle screw fixation in transforaminal lumbar interbody fusion: radiographic and clinical analysis. World Neurosurg. 2015 Apr;83[4]:553–9. DOI: 10.1016/j.wneu.2014.12.012.

61. Zhang C-M, Li H-Y, Li S-S, Zhu Z, Yang K, Sun T-S. [Dynesys and posterior decompression and fusion internal fixation for the treatment of lumbar degenerative diseases: a systematic review]. Zhongguo Gu Shang. 2018 June 25;31[6]:569–76. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.06.017.

62. Schulte TL, Ringel F, Quante M, Eicker SO, Muche-Borowski C, Kothe R. Surgery for adult spondylolisthesis: a systematic review of the evidence. Eur Spine J. 2016 Aug;25[8]:2359–67. DOI: 10.1007/s00586-015-4177-6.

63. Virk S, Qureshi S, Sandhu H. History of Spinal Fusion: Where We Came from and Where We Are Going. HSS J. 2020 July;16[2]:137–42. DOI: 10.1007/s11420-020-09747-7.

64. Mobbs RJ, Phan K, Malham G, Seex K, Rao PJ. 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 Dec;1[1]:2–18. DOI: 10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05.

65. Harms J, Rolinger H. [A one-stager procedure in operative treatment of spondylolistheses: dorsal traction-reposition and anterior fusion (author's transl)]. Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1982 June;120[3]:343–7. DOI: 10.1055/s-2008-1051624.

66. Badlani N, Yu E, Kreitz T, Khan S, Kurd MF. Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (TLIF). Clin Spine Surg. 2020 Mar;33[2]:62–4. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000902.

67. de Kunder SL, Rijkers K, Caelers IJMH, de Bie RA, Koehler PJ, van Santbrink H. Lumbar Interbody Fusion: A Historical Overview and a Future Perspective. Spine (Phila Pa 1976). 2018 Aug;43[16]:1161–8. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002534.

68. Karikari IO, Isaacs RE. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: a review of techniques and outcomes. Spine (Phila Pa 1976). 2010 Dec 15;35[26 Suppl]:S294-301. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182022ddc.

69. Yan D, Pei F, Li J, Soo C. Comparative study of PILF and TLIF treatment in adult degenerative spondylolisthesis. Eur Spine J. 2008 Oct;17[10]:1311–6. DOI: 10.1007/s00586-008-0739-1.

70. Liu J, Deng H, Long X, Chen X, Xu R, Liu Z. A comparative study of perioperative complications between transforaminal versus posterior lumbar interbody fusion in degenerative lumbar spondylolisthesis. Eur Spine J. 2016 May;25[5]:1575–80. DOI: 10.1007/s00586-015-4086-8.

71. Choy WJ, Abi-Hanna D, Cassar LP, Hardcastle P, Phan K, Mobbs RJ. History of Integral Fixation for Anterior Lumbar Interbody Fusion (ALIF): The Hartshill Horseshoe. World Neurosurg. 2019 Sept;129:394–400. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.06.134.

72. Bertagnoli R, Vazquez RJ. The Anterolateral TransPsoatic Approach (ALPA): a new technique for implanting prosthetic disc-nucleus devices. J Spinal Disord Tech. 2003 Aug;16[4]:398–404. DOI: 10.1097/00024720-200308000-00012.

73. Pawar AY, Hughes AP, Sama AA, Girardi FP, Lebl DR, Cammisa FP. A Comparative Study of Lateral Lumbar Interbody Fusion and Posterior Lumbar Interbody Fusion in Degenerative Lumbar Spondylolisthesis. Asian Spine J. 2015 Oct;9[5]:668–74. DOI: 10.4184/asj.2015.9.5.668.

74. Norton RP, Bianco K, Klifto C, Errico TJ, Bendo JA. Degenerative Spondylolisthesis: An Analysis of the Nationwide Inpatient Sample Database. Spine (Phila Pa 1976). 2015 Aug 1;40[15]:1219–27. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000987.

75. García-Ramos CL, Valenzuela-González J, Baeza-Álvarez VB, Rosales-Olivarez LM, Alpízar-Aguirre A, Reyes-Sánchez A. Lumbar degenerative spondylolisthesis II: treatment and controversies. Acta Ortop Mex. 2020 Dec;34[6]:433–40.

76. Foley KT, Lefkowitz MA. Advances in minimally invasive spine surgery. Clin Neurosurg. 2002;49:499–517.

77. Patel AA, Zfass-Mendez M, Lebwohl NH, Wang MY, Green BA, Levi AD, et al. Minimally Invasive Versus Open Lumbar Fusion: A Comparison of Blood Loss, Surgical Complications, and Hospital Course. Iowa Orthop J. 2015;35:130–4.

78. Arts MP, Wolfs JF, Kuijlen JM, de Ruiter GC. Minimally invasive surgery versus open surgery in the treatment of lumbar spondylolisthesis: study protocol of a multicentre, randomised controlled trial (MISOS trial). BMJ Open. 2017 Nov 12;7[11]:e017882. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-017882.

79. Gopinath P. Lumbar segmental instability: Points to ponder. J Orthop. 2015 Dec;12[4]:165–7. DOI: 10.1016/j.jor.2015.09.005.

80. Lewandrowski K-U, Soriano-Sánchez J-A, Zhang X, Ramírez León JF, Soriano Solis S, Rugeles Ortíz JG, et al. Regional variations in acceptance, and utilization of minimally invasive spinal surgery techniques among spine surgeons: results of a global survey. J Spine Surg. 2020 Jan;6[Suppl 1]:S260–74. DOI: 10.21037/jss.2019.09.31.

81. Lewandrowski K-U, Soriano-Sánchez J-A, Zhang X, Ramírez León JF, Soriano Solis S, Rugeles Ortíz JG, et al. Surgeon motivation, and obstacles to the implementation of minimally invasive spinal surgery techniques. J Spine Surg. 2020 Jan;6[Suppl 1]:S249–59. DOI: 10.21037/jss.2019.08.02.

82. Lin E-Y, Kuo Y-K, Kang Y-N. Effects of three common lumbar interbody fusion procedures for degenerative disc disease: A network meta-analysis of prospective studies. Int J Surg. 2018 Dec;60:224–30. DOI: 10.1016/j.ijsu.2018.11.009.

83. Modi HN, Shrestha U. Comparison of Clinical Outcome and Radiologic Parameters in Open TLIF Versus MIS-TLIF in Single- or Double-Level Lumbar Surgeries. Int J Spine Surg. 2021 Oct;15[5]:962–70. DOI: 10.14444/8126.

84. Seng C, Siddiqui MA, Wong KPL, Zhang K, Yeo W, Tan SB, et al. Five-year outcomes of minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: a matched-pair comparison study. Spine (Phila Pa 1976). 2013 Nov 1;38[23]:2049–55. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182a8212d.

85. Yang Y, Liu Z-Y, Zhang L-M, Pang M, Chhantyal K, Wu W-B, et al. Microendoscopy-Assisted Minimally Invasive Versus Open Transforaminal Lumbar Interbody Fusion for Lumbar Degenerative Diseases: 5-Year Outcomes. World Neurosurg. 2018 Aug;116:e602–10. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.05.049.

86. Kim CH, Easley K, Lee J-S, Hong J-Y, Virk M, Hsieh PC, et al. Comparison of Minimally Invasive Versus Open Transforaminal Interbody Lumbar Fusion. Global Spine J. 2020 Apr;10[2 Suppl]:143S-150S. DOI: 10.1177/2192568219882344.

87. Kim CH, Lee C-H, Kim KP. How High Are Radiation-related Risks in Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Compared With Traditional Open Surgery?: A Meta-analysis and Dose Estimates of Ionizing Radiation. Clin Spine Surg. 2016 Mar;29[2]:52–9. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000351.

88. Hammad A, Wirries A, Ardeshiri A, Nikiforov O, Geiger F. Open versus minimally invasive TLIF: literature review and meta-analysis. J Orthop Surg Res. 2019 July 22;14[1]:229. DOI: 10.1186/s13018-019-1266-y.

89. Xie Q, Zhang J, Lu F, Wu H, Chen Z, Jian F. Minimally invasive versus open Transforaminal lumbar Interbody fusion in obese patients: a meta-analysis. BMC Musculoskelet Disord. 2018 Jan 17;19[1]:15. DOI: 10.1186/s12891-018-1937-6.

90. Mh W, Nk D, Yy L, Cy L, Cc C, Cs S, et al. Comparison of minimally invasive spine surgery using intraoperative computed tomography integrated navigation, fluoroscopy, and conventional open surgery for lumbar spondylolisthesis: a prospective registry-based cohort study. PubMed [Internet]. [cited 2024 July 19]; Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28412560/

91. Li A, Li X, Zhong Y. Is minimally invasive superior than open transforaminal lumbar interbody fusion for single-level degenerative lumbar diseases: a meta-analysis. J Orthop Surg Res. 2018 Sept 20;13[1]:241. DOI: 10.1186/s13018-018-0941-8.

92. Lei F, Li Z, He W, Tian X, Zheng L, Kang J, et al. Total and hidden blood loss between open posterior lumbar interbody fusion and transforaminal lumbar interbody fusion by Wiltse approach. Medicine (Baltimore). 2020 May;99[20]:e19864. DOI: 10.1097/MD.0000000000019864.

93. Ntoukas V, Müller A. Minimally invasive approach versus traditional open approach for one level posterior lumbar interbody fusion. Minim Invasive Neurosurg. 2010 Feb;53[1]:21–4. DOI: 10.1055/s-0030-1247560.

94. Miller DL, Balter S, Dixon RG, Nikolic B, Bartal G, Cardella JF, et al. Quality improvement guidelines for recording patient radiation dose in the medical record for fluoroscopically guided procedures. J Vasc Interv Radiol. 2012 Jan;23[1]:11–8. DOI: 10.1016/j.jvir.2011.09.004.

95. Sembrano JN, Yson SC, Theismann JJ. Computer Navigation in Minimally Invasive Spine Surgery. Curr Rev Musculoskelet Med. 2019 Dec;12[4]:415–24. DOI: 10.1007/s12178-019-09577-z.

96. Xu Y-F, Le X-F, Tian W, Liu B, Li Q, Zhang G-L, et al. Computer-assisted, minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: One surgeon's learning curve A STROBE-compliant article. Medicine (Baltimore). 2018 July;97[27]:e11423. DOI: 10.1097/MD.0000000000011423.

97. Kumar A, Merrill RK, Overley SC, Leven DM, Meaike JJ, Vaishnav A, et al. Radiation Exposure in Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: The Effect of the Learning Curve. Int J Spine Surg. 2019 Jan;13[1]:39–45. DOI: 10.14444/6006.

98. Kim HS, Wu PH, Lee YJ, Kim DH, Jang IT. Technical Considerations of Uniportal Endoscopic Posterolateral Lumbar Interbody Fusion: A Review of Its Early Clinical Results in Application in Adult Degenerative Scoliosis. World Neurosurg. 2021 Jan;145:682–92. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.05.239.

99. Ahn Y, Youn MS, Heo DH. Endoscopic transforaminal lumbar interbody fusion: a comprehensive review. Expert Rev Med Devices. 2019 May;16[5]:373–80. DOI: 10.1080/17434440.2019.1610388.

100. Morgenstern C, Yue JJ, Morgenstern R. Full Percutaneous Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Using the Facet-sparing, Trans-Kambin Approach. Clin Spine Surg. 2020 Feb;33[1]:40–5. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000827.

101. Zhang Y-W, Xia W-H, Gao W-C, Xiao X, Xiao Y, Gong F-P. Direct foraminoplasty in endoscope-assisted transforaminal lumbar interbody fusion for the treatment of lumbar disc herniation. J Int Med Res. 2020 Jan;48[1]:300060519875372. DOI: 10.1177/0300060519875372.

102. Lv Y, Chen M, Wang S-L, Qin R-J, Ma C, Ding Q-R, et al. Endo-TLIF versus MIS-TLIF in 1-segment lumbar spondylolisthesis: A prospective randomized pilot study. Clin Neurol Neurosurg. 2022 Jan;212:107082. DOI: 10.1016/j.clineuro.2021.107082.

103. Schistad EI, Bjorland S, Røe C, Gjerstad J, Vetti N, Myhre K, et al. Five-year development of lumbar disc degeneration-a prospective study. Skeletal Radiol. 2019 June;48[6]:871–9. DOI: 10.1007/s00256-018-3062-x.

104. Kapetanakis S, Chaniotakis C, Kazakos C, Papathanasiou JV. Cauda Equina Syndrome Due to Lumbar Disc Herniation: a Review of Literature. Folia Med (Plovdiv). 2017 Dec 20;59[4]:377–86. DOI: 10.1515/folmed-2017-0038.

105. Kuligowski T. Prevalence of Lumbar Segmental Instability in Young Individuals with the Different Types of Lumbar Disc Herniation-Preliminary Report. Int J Environ Res Public Health. 2022 July 31;19[15]:9378. DOI: 10.3390/ijerph19159378.

106. Takahashi M, Iwamoto K, Kuzuyama M, Inami H, Matsumoto Y, Ueda S, et al. Incidence of spinal instability among patients with discogenic low back pain with different backgrounds. J Phys Ther Sci. 2021 Aug;33[8]:601–5. DOI: 10.1589/jpts.33.601.

107. Wang Y, Huang K. Research progress of diagnosing methodology for lumbar segmental instability: A narrative review. Medicine (Baltimore). 2022 Jan 7;101[1]:e28534. DOI: 10.1097/MD.0000000000028534.

108. Tanishima S, Mihara T, Ogawa S, Takeda C, Fujiwara S, Nagashima H. Bilateral facet effusion is a risk factor for segmental instability with cervical injury without vertebral fracture. Sci Rep. 2021 June 15;11[1]:12531. DOI: 10.1038/s41598-021-91981-y.

109. Zencica P, Chaloupka R, Hladíková J, Krbec M. [Adjacent segment degeneration after lumbosacral fusion in spondylolisthesis: a retrospective radiological and clinical analysis]. Acta Chir Orthop Traumatol Cech. 2010 Apr;77[2]:124–30.

110. Schnake KJ, Rappert D, Storzer B, Schreyer S, Hilber F, Mehren C. [Lumbar fusion-Indications and techniques]. Orthopade. 2019 Jan;48[1]:50–8. DOI: 10.1007/s00132-018-03670-w.

111. Adogwa O, Elsamadicy AA, Han JL, Cheng J, Karikari I, Bagley CA. Do measures of surgical effectiveness at 1 year after lumbar spine surgery accurately predict 2-year outcomes? J Neurosurg Spine. 2016 Dec;25[6]:689–96. DOI: 10.3171/2015.8.SPINE15476.

112. Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. J Spinal Disord. 1992 Dec;5[4]:383–9; discussion 397. DOI: 10.1097/00002517-199212000-00001.

113. Studnicka K, Ampat G. Lumbar Stabilization. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 [cited 2022 Sept 25]. Available from: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562179/

114. Kirkaldy-Willis WH, Farfan HF. Instability of the lumbar spine. Clin Orthop Relat Res. 1982 May;[165]:110–23.

115. Schneider G, Pearcy MJ, Bogduk N. Abnormal motion in spondylolytic spondylolisthesis. Spine (Phila Pa 1976). 2005 May 15;30[10]:1159–64. DOI: 10.1097/01.brs.0000162400.06685.37.

116. Beazell JR, Mullins M, Grindstaff TL. Lumbar instability: an evolving and challenging concept. J Man Manip Ther. 2010 Mar;18[1]:9–14. DOI: 10.1179/106698110X12595770849443.

117. Fraerman AP, П ФА, Yarikov AV, Викторович ЯА, Kotelnikov AO, O KA, et al. Lumbar spine segmental instability in degenerative spine conditions. Science and Innovations in Medicine [Internet]. 2020 Oct 20 [cited 2022 Sept 25];5[3]:164–9. Available from: https://doi.org/10.35693/2500-1388-2020-5-3-164-169 DOI: 10.35693/2500-1388-2020-5-3-164-169.

118. Warren JM, Hey LA, Mazzoleni AP. A finite element study of the relationship between upper body weight and the loads experienced by the human lumbosacral spine, and fusion instrumentation, in a standing upright posture. Biomedical Engineering Advances [Internet]. 2021 Dec 1 [cited 2022 Sept 25];2:100023. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667099221000232 DOI: 10.1016/j.bea.2021.100023.

119. Wu PH, Kim HS, Jang I-T. Intervertebral Disc Diseases PART 2: A Review of the Current Diagnostic and Treatment Strategies for Intervertebral Disc Disease. Int J Mol Sci. 2020 Mar 20;21[6]:E2135. DOI: 10.3390/ijms21062135.

120. Wu Q, Huang JH. Intervertebral Disc Aging, Degeneration, and Associated Potential Molecular Mechanisms. J Head Neck Spine Surg. 2017;1[4]:555569. DOI: 10.19080/JHNSS.2017.01.555569.

121. Modic MT, Steinberg PM, Ross JS, Masaryk TJ, Carter JR. Degenerative disk disease: assessment of changes in vertebral body marrow with MR imaging. Radiology. 1988 Jan;166[1 Pt 1]:193–9. DOI: 10.1148/radiology.166.1.3336678.

122. Neyra HT, Quesada JMD, Sáez HT, Sáez LT. Relations between disc degeneration and lumbar instability. Revista Cubana de Ortopedia y Traumatología [Internet]. 2018 [cited 2022 Sept 25];32[2]:1–16. Available from: https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDARTICULO=87535

123. Lewin T. Osteoarthritis in lumbar synovial joints. A morphologic study. Acta orthopaedica Scandinavica Supplementum [Internet]. 1964 [cited 2022 Sept 25]; Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14208931/ DOI: 10.3109/ort.1964.35.suppl-73.01.

124. Iguchi T, Nishida K, Ozaki T, Kitagawa A, Tsumura N, Kakutani K, et al. Grade three disc degeneration is a critical stage for anterior spondylolisthesis in lumbar spine. Eur Spine J. 2012 Nov;21[11]:2134–9. DOI: 10.1007/s00586-012-2288-x.

125. Iii WS, Orías AAE, Shifflett GD, Lee JYB, Siemionow K, Gandhi S, et al. Image-Based Markers Predict Dynamic Instability in Lumbar Degenerative Spondylolisthesis. Neurospine. 2020 Mar;17[1]:221–7. DOI: 10.14245/ns.1938440.220.

126. Natarajan RN, Andersson GB. The influence of lumbar disc height and cross-sectional area on the mechanical response of the disc to physiologic loading. Spine (Phila Pa 1976). 1999 Sept 15;24[18]:1873–81. DOI: 10.1097/00007632-199909150-00003.

127. Iguchi T, Ozaki T, Chin T, Tsumura N, Kanemura A, Kasahara K, et al. Intimate relationship between instability and degenerative signs at L4/5 segment examined by flexion-extension radiography. Eur Spine J. 2011 Aug;20[8]:1349–54. DOI: 10.1007/s00586-011-1793-7.

128. Rahyussalim AJ, Zufar MLL, Kurniawati T. Significance of the Association between Disc Degeneration Changes on Imaging and Low Back Pain: A Review Article. Asian Spine J. 2020 Apr;14[2]:245–57. DOI: 10.31616/asj.2019.0046.

129. Fujiwara A, Tamai K, An HS, Kurihashi T, Lim TH, Yoshida H, et al. The relationship between disc degeneration, facet joint osteoarthritis, and stability of the degenerative lumbar spine. J Spinal Disord. 2000 Oct;13[5]:444–50. DOI: 10.1097/00002517-200010000-00013.

130. Lee J-S, Kim K-W. Bone mineral densities of the vertebral body and intertransverse fusion mass after instrumented intertransverse process fusion. Spine (Phila Pa 1976). 2010 Oct 1;35[21]:E1106-1110. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181e1a275.

131. Nori S, Shiraishi T, Aoyama R, Ninomiya K, Yamane J, Kitamura K, et al. Posterior spinal cord shift does not affect surgical outcomes after muscle-preserving selective laminectomy. J Clin Neurosci. 2018 Apr;50:226–31. DOI: 10.1016/j.jocn.2018.01.067.

132. Campbell RC, Mobbs RJ, Lu VM, Xu J, Rao PJ, Phan K. Posterolateral Fusion Versus Interbody Fusion for Degenerative Spondylolisthesis: Systematic

Review and Meta-Analysis. Global Spine J. 2017 Aug;7[5]:482–90. DOI: 10.1177/2192568217701103.

133. Patel DV, Yoo JS, Karmarkar SS, Lamoutte EH, Singh K. Interbody options in lumbar fusion. J Spine Surg. 2019 June;5[Suppl 1]:S19–24. DOI: 10.21037/jss.2019.04.04.

134. Du L, Sun X-J, Zhou T-J, Li Y-C, Chen C, Zhao C-Q, et al. The role of cage height on the flexibility and load sharing of lumbar spine after lumbar interbody fusion with unilateral and bilateral instrumentation: a biomechanical study. BMC Musculoskelet Disord. 2017 Nov 21;18[1]:474. DOI: 10.1186/s12891-017-1845-1.

135. Boktor J, Ninan T, Pockett R, Collins I, Sultan A, Koptan W. Lumbar fusion for lytic spondylolisthesis: Is an interbody cage necessary? J Craniovertebr Junction Spine. 2018 June;9[2]:101–6. DOI: 10.4103/jcvjs.JCVJS_20_18.

136. Lee CK, Langrana NA. Lumbosacral spinal fusion. A biomechanical study. Spine (Phila Pa 1976). 1984 Sept;9[6]:574–81. DOI: 10.1097/00007632-198409000-00007.

137. Lin PM, Cautilli RA, Joyce MF. Posterior lumbar interbody fusion. Clin Orthop Relat Res. 1983 Nov;[180]:154–68.

138. Zhang Z, Li H, Fogel GR, Liao Z, Li Y, Liu W. Biomechanical Analysis of Porous Additive Manufactured Cages for Lateral Lumbar Interbody Fusion: A Finite Element Analysis. World Neurosurg. 2018 Mar;111:e581–91. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.12.127.

139. Safaee MM, Tenorio A, Haddad AF, Wu B, Hu SS, Tay B, et al. Anterior Lumbar Interbody Fusion With Cage Retrieval for the Treatment of Pseudarthrosis After Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: A Single-Institution Case Series. Oper Neurosurg (Hagerstown). 2021 Jan 13;20[2]:164–73. DOI: 10.1093/ons/opaa303.

140. Fogel GR, Parikh RD, Ryu SI, Turner AWL. Biomechanics of lateral lumbar interbody fusion constructs with lateral and posterior plate fixation: laboratory investigation. J Neurosurg Spine. 2014 Mar;20[3]:291–7. DOI: 10.3171/2013.11.SPINE13617.

141. Campbell PG, Cavanaugh DA, Nunley P, Utter PA, Kerr E, Wadhwa R, et al. PEEK versus titanium cages in lateral lumbar interbody fusion: a comparative analysis of subsidence. Neurosurg Focus. 2020 Sept;49[3]:E10. DOI: 10.3171/2020.6.FOCUS20367.

142. Massaad E, Fatima N, Kiapour A, Hadzipasic M, Shankar GM, Shin JH. Polyetheretherketone Versus Titanium Cages for Posterior Lumbar Interbody Fusion: Meta-Analysis and Review of the Literature. Neurospine. 2020 Mar;17[1]:125–35. DOI: 10.14245/ns.2040058.029.

143. Schnake KJ, Fleiter N, Hoffmann C, Pingel A, Scholz M, Langheinrich A, et al. PLIF surgery with titanium-coated PEEK or uncoated PEEK cages: a prospective randomised clinical and radiological study. Eur Spine J. 2021 Jan;30[1]:114–21. DOI: 10.1007/s00586-020-06642-x.

144. Zhu H, Zhong W, Zhang P, Liu X, Huang J, Liu F, et al. Biomechanical evaluation of autologous bone-cage in posterior lumbar interbody fusion: a finite element analysis. BMC Musculoskelet Disord. 2020 June 13;21[1]:379. DOI: 10.1186/s12891-020-03411-1.

145. Wang L, Kang J, Shi L, Fu J, Li D, Guo Z, et al. Investigation into factors affecting the mechanical behaviours of a patient-specific vertebral body replacement. Proc Inst Mech Eng H. 2018 Apr;232[4]:378–87. DOI: 10.1177/0954411918754926.

146. Tan Y, Tanaka M, Sonawane S, Uotani K, Oda Y, Fujiwara Y, et al. Comparison of Simultaneous Single-Position Oblique Lumbar Interbody Fusion and Percutaneous Pedicle Screw Fixation with Posterior Lumbar Interbody Fusion Using O-arm Navigated Technique for Lumbar Degenerative Diseases. J Clin Med. 2021 Oct 26;10[21]:4938. DOI: 10.3390/jcm10214938.

147. Kim M-C, Chung H-T, Cho J-L, Kim D-J, Chung N-S. Subsidence of polyetheretherketone cage after minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion. J Spinal Disord Tech. 2013 Apr;26[2]:87–92. DOI: 10.1097/BSD.0b013e318237b9b1.

148. Olivares-Navarrete R, Gittens RA, Schneider JM, Hyzy SL, Haithcock DA, Ullrich PF, et al. Osteoblasts exhibit a more differentiated phenotype and increased bone morphogenetic protein production on titanium alloy substrates than on poly-ether-ether-ketone. Spine J. 2012 Mar;12[3]:265–72. DOI: 10.1016/j.spinee.2012.02.002.

149. D'Souza M, Macdonald NA, Gendreau JL, Duddleston PJ, Feng AY, Ho AL. Graft Materials and Biologics for Spinal Interbody Fusion. Biomedicines. 2019 Sept 26;7[4]:E75. DOI: 10.3390/biomedicines7040075.

150. Goulet JA, Senunas LE, DeSilva GL, Greenfield ML. Autogenous iliac crest bone graft. Complications and functional assessment. Clin Orthop Relat Res. 1997 June;[339]:76–81. DOI: 10.1097/00003086-199706000-00011.

151. Heary RF, Schlenk RP, Sacchieri TA, Barone D, Brotea C. Persistent iliac crest donor site pain: independent outcome assessment. Neurosurgery. 2002 Mar;50[3]:510–6; discussion 516-517. DOI: 10.1097/00006123-200203000-00015.

152. Hu MW, Liu ZL, Zhou Y, Shu Y, Chen CL, Yuan X. Posterior lumbar interbody fusion using spinous process and laminae. J Bone Joint Surg Br. 2012 Mar;94[3]:373–7. DOI: 10.1302/0301-620X.94B3.27629.

153. Wang L, Malone KT, Huang H, Zhang Z, Zhang Z, Zhang L, et al. Biomechanical Evaluation of a Novel Autogenous Bone Interbody Fusion Cage for Posterior Lumbar Interbody Fusion in a Cadaveric Model. Spine (Phila Pa 1976). 2014 May 15;39[11]:E684–92. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000291.

154. Lin B, Yu H, Chen Z, Huang Z, Zhang W. Comparison of the PEEK cage and an autologous cage made from the lumbar spinous process and laminae in posterior lumbar interbody fusion. BMC Musculoskelet Disord. 2016 Aug 30;17[1]:374. DOI: 10.1186/s12891-016-1237-y.

155. Phan K, Rao PJ, Kam AC, Mobbs RJ. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion for treatment of degenerative lumbar disease: systematic review and meta-analysis. Eur Spine J. 2015 May;24[5]:1017–30. DOI: 10.1007/s00586-015-3903-4.

156. Mobbs RJ, Sivabalan P, Li J. Technique, challenges and indications for percutaneous pedicle screw fixation. J Clin Neurosci. 2011 June;18[6]:741–9. DOI: 10.1016/j.jocn.2010.09.019.

157. Tian N-F, Wu Y-S, Zhang X-L, Xu H-Z, Chi Y-L, Mao F-M. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: a meta-analysis based on the current evidence. Eur Spine J. 2013 Aug;22[8]:1741–9. DOI: 10.1007/s00586-013-2747-z.

158. Hu W, Tang J, Wu X, Zhang L, Ke B. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar fusion: a systematic review of complications. Int Orthop. 2016 Sept;40[9]:1883–90. DOI: 10.1007/s00264-016-3153-z.

159. Joseph JR, Smith BW, La Marca F, Park P. Comparison of complication rates of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion and lateral lumbar interbody fusion: a systematic review of the literature. Neurosurg Focus. 2015 Oct;39[4]:E4. DOI: 10.3171/2015.7.FOCUS15278.

160. Lee D-Y, Park Y-J, Song S-Y, Jeong S-T, Kim D-H. Risk Factors for Posterior Cage Migration after Lumbar Interbody Fusion Surgery. Asian Spine J. 2018 Feb;12[1]:59–68. DOI: 10.4184/asj.2018.12.1.59.

161. Comer GC, Behn A, Ravi S, Cheng I. A Biomechanical Comparison of Shape Design and Positioning of Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Cages. Global Spine J. 2016 Aug;6[5]:432–8. DOI: 10.1055/s-0035-1564568.

162. Walter C, Baumgärtner T, Trappe D, Frantz S, Exner L, Mederake M. Influence of Cage Design on Radiological and Clinical Outcomes in Dorsal Lumbar Spinal Fusions: A Comparison of Lordotic and Non-Lordotic Cages. Orthop Surg. 2021 May;13[3]:863–75. DOI: 10.1111/os.12872.

163. Cho W, Wu C, Mehbod AA, Transfeldt EE. Comparison of cage designs for transforaminal lumbar interbody fusion: a biomechanical study. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2008 Oct;23[8]:979–85. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2008.02.008.

164. Yu Y, Li W, Yu L, Qu H, Niu T, Zhao Y. Population-based design and 3D finite element analysis of transforaminal thoracic interbody fusion cages. J Orthop Translat. 2020 Mar;21:35–40. DOI: 10.1016/j.jot.2019.12.006.

165. Cao Y, Liu F, Wan S, Liang Y, Jiang C, Feng Z, et al. Biomechanical evaluation of different surgical procedures in single-level transforaminal lumbar interbody fusion in vitro. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2017 Nov;49:91–5. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2017.08.011.

166. Cheng BC, Swink I, Yusufbekov R, Birgelen M, Ferrara L, Lewandrowski K-U, et al. Current Concepts of Contemporary Expandable Lumbar Interbody Fusion Cage Designs, Part 1: An Editorial on Their Biomechanical Characteristics. Int J Spine Surg. 2020 Dec;14[s3]:S63–7. DOI: 10.14444/7128.

167. Zhao Y, Liang Y, Mao K. Radiographic and clinical outcomes following MIS-TLIF in patients with adult lumbar degenerative scoliosis. J Orthop Surg Res. 2018 Apr 19;13[1]:93. DOI: 10.1186/s13018-018-0764-7.

168. Zhang H, Hao D, He B, Zhao Q, Wang X, Liu T, et al. [Application of modified direction-changeable lumbar Cage in transforaminal lumbar interbody fusion]. Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi. 2019 Apr 15;33[4]:410–5. DOI: 10.7507/1002-1892.201806125.

169. Zhang H, Hao D, Sun H, He S, Wang B, Hu H, et al. Biomechanical effects of direction-changeable cage positions on lumbar spine: a finite element study. Am J Transl Res. 2020;12[2]:389–96.

170. Zhang H, Jiang Y, Wang B, Zhao Q, He S, Hao D. Direction-changeable lumbar cage versus traditional lumbar cage for treating lumbar spondylolisthesis: A retrospective study. Medicine (Baltimore). 2018 Feb;97[7]:e9984. DOI: 10.1097/MD.0000000000009984.

171. Горбатюк КІ, Ольхов ВМ, Кириченко ВВ, Майструк ДС, Лемешов ОС. Порівняння клінічних результатів відкритої і малоінвазивної декомпресії та стабілізації при стенозі поперекового відділу хребта. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2018;[1]:35–40. Available from: https://theunj.org/article/view/90415 DOI: 10.25305/unj.90415.

172. Капшук ІО, Педаченко ЮЄ. Хірургічне лікування дегенеративного стенотичного ураження поперекового відділу хребта. Власний досвід застосування малоінвазивної методики. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2024 Mar 30;30[1]:26–36. Available from: https://theunj.org/article/view/294404 DOI: 10.25305/unj.294404.

173. Слинько ЄІ, Деркач ЮВ. Порівняння ефективності ендоскопічного та відкритого трансторакального видалення пухлин тіл грудних хребців. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2020 Sept 20;26[3]:38–43. Available from: https://theunj.org/article/view/204079 DOI: 10.25305/unj.204079.

174. Тарасенко ОМ. Трансформамінальна ендоскопічна мікродискектомія в лікуванні пацієнтів із грижами міжхребцевих дисків у поперековому відділі хребта. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2025 June 30;31[2]:37–43. Available from: https://theunj.org/article/view/318996 DOI: 10.25305/unj.318996.

175. Нехлопочин ОС, Васильєва ІГ, Чопик НГ, Вербов ВВ, Чешук ЄВ, Вороді МВ. Оцінка ефективності комбінованої терапії вітамінами D3 та K2 щодо зниження ризику імплантат-асоційованих ускладнень і поліпшення стабільності спондилодезу. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2025 June 30;31[2]:10–27. Available from: https://theunj.org/article/view/320680 DOI: 10.25305/unj.320680.

176. Мезенцев А, Петренко Д, Демченко Д. Результати хірургічного лікування істмічного спондилолістезу з великим ступенем зсуву. Ортопедія, травматологія та протезування [Internet]. 2025 June 29;[2]:58–65. Available from: https://otp-journal.com.ua/article/view/333893 DOI: 10.15674/0030-59872025258-65.

177. Радченко В, Скіданов А. Зміни в паравертебральних м'язах пацієнтів із дегенеративними захворюваннями поперекового відділу хребта. Ортопедія, травматологія та протезування [Internet]. 2018;[3]:50–6. Available

from: https://otp-journal.com.ua/article/view/143208 DOI: 10.15674/0030-59872018350-56.

178. Thinking D. Шкала болю [Internet]. DoctorThinking. 2021 [cited 2024 July 26]. Available from: https://doctorthinking.org/2021/01/pain-scale/

179. Kgomotso EL, Hellum C, Fagerland MW, Solberg T, Brox JI, Storheim K, et al. Decompression alone or with fusion for degenerative lumbar spondylolisthesis (Nordsten-DS): five year follow-up of a randomised, multicentre, non-inferiority trial. BMJ. 2024 Aug 7;386:e079771. DOI: 10.1136/bmj-2024-079771.

180. Zhang Z, Fogel GR, Liao Z, Sun Y, Sun X, Liu W. Biomechanical evaluation of four surgical scenarios of lumbar fusion with hyperlordotic interbody cage: A finite element study. Biomed Mater Eng. 2018;29[4]:485–97. DOI: 10.3233/BME-181004.

181. Srinivas GR, Kumar MN, Deb A. Adjacent Disc Stress Following Floating Lumbar Spine Fusion: A Finite Element Study. Asian Spine J [Internet]. 2017 Aug 31;11[4]:538–47. Available from: http://asianspinejournal.org/journal/view.php?doi=10.4184/asj.2017.11.4.538 DOI: 10.4184/asj.2017.11.4.538.

182. Ben-Hatira F, Saidane K, Mrabet A. A finite element modeling of the human lumbar unit including the spinal cord. JBiSE [Internet]. 2012;05[03]:146–52. Available from: https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=18107 DOI: 10.4236/jbise.2012.53019.

183. Aroeira R, Pertence A, Kemmoku D, Greco M. Three-dimensional geometric model of the middle segment of the thoracic spine based on graphical images for finite element analysis. Research on Biomedical Engineering. 2017 June 1;33. DOI: 10.1590/2446-4740.08916.

184. Tyndyka MA, Barron V, McHugh PE, O'Mahoney D. Generation of a finite element model of the thoracolumbar spine. Acta Bioeng Biomech. 2007;9[1]:35–46.

185. Nishida N, Ohgi J, Jiang F, Ito S, Imajo Y, Suzuki H, et al. Finite Element Method Analysis of Compression Fractures on Whole-Spine Models Including the Rib Cage. Computational and Mathematical Methods in Medicine [Internet]. 2019 [cited 2026 Mar 12];2019[1]:8348631. Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2019/8348631 DOI: 10.1155/2019/8348631.

186. Nakashima D, Kanchiku T, Nishida N, Ito S, Ohgi J, Suzuki H, et al. Finite element analysis of compression fractures at the thoracolumbar junction using models constructed from medical images. Exp Ther Med [Internet]. 2018 Apr [cited 2026 Mar 12];15[4]:3225–30. Available from: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5841061/ DOI: 10.3892/etm.2018.5848.

187. Lim K-M, Park T-H, Lee S-J, Park S-J. Design and Biomechanical Verification of Additive Manufactured Composite Spinal Cage Composed of Porous Titanium Cover and PEEK Body. Applied Sciences. 2019 Oct 11;9:4258. DOI: 10.3390/app9204258.

188. Yahya R, Mazlan H, Shuib S, Abdullah H. Biomechanical Analysis of Spinal Fusion Cage for Lumbar Vertebrae. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019 Nov 30;8:6859–63. DOI: 10.35940/ijrte.D5206.118419.

189. Tatsuya S, Yonezawa I, Todo M, Takano H, Kaneko K. Biomechanical Effects of Implant Materials on Posterior Lumbar Interbody Fusion: Comparison of Polyetheretherketone and Titanium Spacers Using Finite Element Analysis and Considering Bone Density. Journal of Biomedical Science and Engineering. 2018 Jan 1;11:45–59. DOI: 10.4236/jbise.2018.114005.

190. Jalil M, Mazlan H, Todo M. Biomechanical Comparison of Polymeric Spinal Cages Using Ct Based Finite Element Method. International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics. 2017 Apr 1;7. DOI: 10.17706/ijbbb.2017.7.2.110-117.

191. Boccaccio A, Pappalettere C. Mechanobiology of Fracture Healing: Basic Principles and Applications in Orthodontics and Orthopaedics. In 2011. DOI: 10.5772/19420.

192. Lesso A, Ledesma E, Daza-Benítez L, Arroyo R. Mechanical Characterization of Femoral Cartilage Under Unicompartimental Osteoarthritis. 2014 Jan 1;4:239–46.

193. Kong WZ, Goel VK. Ability of the finite element models to predict response of the human spine to sinusoidal vertical vibration. Spine (Phila Pa 1976). 2003 Sept 1;28[17]:1961–7. DOI: 10.1097/01.BRS.0000083236.33361.C5.

194. Mobbs R, Loganathan A, Yeung V, Rao P. Indications for Anterior Lumbar Interbody Fusion. Orthopaedic surgery. 2013 Aug 1;5:153–63. DOI: 10.1111/os.12048.

195. Stognii AV, Piatykop BO, Yaresko OV, Popuyskapka KO, Pidgaiska OO, Karpinsky MY. Study of stress distribution in a model of posterior intervertebral spondylodesis of the lumbar spine (PEEK implant and distraction cage) [Ukrainian: Вивчення розподілу напружень моделі заднього міжхребцевого спондилодезу поперекового відділу хребта (імплантат PEEK і дистракційний кейдж)]. Trauma [Ukrainian: Травма] [Internet]. 2022;23[6]:47–55. Available from: https://www.mif-ua.com/archive/article/52502 DOI: 10.22141/1608-1706.6.23.2022.923.

196. Stognii AV, Piatykop VO, Babalian IO. Substantiation and development of an optimal method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2025;31[2]:55–64. Available from: https://theunj.org/article/view/322446 DOI: 10.25305/unj.322446.

197. Matz PG, Meagher RJ, Lamer T, Tontz WL, Annaswamy TM, Cassidy RC, et al. Guideline summary review: An evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of degenerative lumbar spondylolisthesis. Spine J. 2016 Mar;16[3]:439–48. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.11.055.

198. Samuel AM, Moore HG, Cunningham ME. Treatment for Degenerative Lumbar Spondylolisthesis: Current Concepts and New Evidence. Curr Rev Musculoskelet Med. 2017 Dec;10[4]:521–9. DOI: 10.1007/s12178-017-9442-3.

199. Pereira P, Park Y, Arzoglou V, Charles YP, Krutko A, Senker W, et al. Anterolateral versus posterior minimally invasive lumbar interbody fusion surgery for spondylolisthesis: comparison of outcomes from a global, multicenter study at 12-months follow-up. Spine J. 2023 Oct;23[10]:1494–505. DOI: 10.1016/j.spinee.2023.05.013.

200. Nedelea D-G, Vulpe DE, Gherghiceanu F, Capitanu BS, Dragosloveanu S, Stoica IC. Surgical and non-surgical management of spondylolisthesis: a comprehensive review. J Med Life. 2025 Mar;18[3]:196–207. DOI: 10.25122/jml-2025-0039.

201. Rangwalla K, Filley A, El Naga A, Gendelberg D, Baldwin A, Maziad A, et al. Degenerative lumbar spondylolisthesis: review of current classifications and proposal of a novel classification system. Eur Spine J. 2024 May;33[5]:1762–72. DOI: 10.1007/s00586-023-07818-x.

202. Li Y, Zhao C, Wu Y, Zhu S, Liu H, Xu S. Development and validation of a novel classification for characterizing degenerative spondylolisthesis of lumbar spine. Sci Rep. 2025 July 1;15[1]:21413. DOI: 10.1038/s41598-025-06298-x.

203. Calvachi-Prieto P, McAvoy MB, Cerecedo-Lopez CD, Lu Y, Chi JH, Aglio LS, et al. Expandable Versus Static Cages in Minimally Invasive Lumbar Interbody Fusion: A Systematic Review and Meta-Analysis. World Neurosurg. 2021 July;151:e607–14. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.04.090.

204. Kucharzyk DW, Budimir D, Waldorff EI, Shum LC, Vannabouathong C. The effect of expandable versus static lordotic interbody implants in minimally invasive spine surgery: patient reported outcomes, sagittal alignment, and restoration of disc height and foraminal height. J Spine Surg. 2023 Mar 30;9[1]:39–53. DOI: 10.21037/jss-22-55.

205. Lee S, Kim JG, Kim H-J. Comparison of surgical outcomes between lumbar interbody fusions using expandable and static cages: a systematic review and

meta-analysis. Spine J. 2023 Nov;23[11]:1593–601. DOI: 10.1016/j.spinee.2023.07.012.

206. Павлова ЮО, Федорович ОБ, Передерій АВ, Тимрук-Скоропад КА. Розроблення української версії індексу неповносправності Освестрі – міжкультурна адаптація та валідизація інструмента. Український журнал медицини, біології та спорту [Internet]. 2021 [cited 2024 July 26];6[3]:300–9. Available from: https://jmbs.com.ua/pdf/6/3/jmbs0-2021-6-3-300.pdf

ДОДАТОК А
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Stognii AV, Piatykop BO, Yaresko OV, Popuyskapka KO, Pidgaiska OO, Karpinsky MY. Study of stress distribution in a model of posterior intervertebral spondylodesis of the lumbar spine (PEEK implant and distraction cage) [Ukrainian: Вивчення розподілу напружень моделі заднього міжхребцевого спондилодезу поперекового відділу хребта (імплантат PEEK і дистракційний кейдж)]. Trauma [Ukrainian: Травма] [Internet]. 2022;23[6]:47–55. Available from: https://www.mif-ua.com/archive/article/52502 DOI: 10.22141/1608-1706.6.23.2022.923.

2. Stognii AV, Piatykop VO, Babalian IO. Substantiation and development of an optimal method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis. Ukrainian Neurosurgical Journal [Internet]. 2025;31[2]:55–64. Available from: https://theunj.org/article/view/322446 DOI: 10.25305/unj.322446.

3. Stognii AV, Piatykop VO, Efficacy of minimally invasive posterior interbody stabilization with distraction cages in lumbar spondylolisthesis. Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine, Inter Collegas [Internet], https://doi.org/10.35339/ic.2025.12.3

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Stognii A. Engineering and mathematical modeling of stress-strain state in the "transpedicular structure – spinal motor segment – distraction cage" system in context of degenerative lumbar spondylolisthesis neurosurgery. Щорічна конференція Української асоціації нейрохірургів з міжнародною участю «Нейрохірургія сучасності — технології та мистецтво». Україна, Львів, 7–

9 вересня 2023 року. Збірка наукових робіт. С. 39 https://rimononline.in.ua/neuro070923

5. Stognii A. Operative treatment of spondylolisthesis of the lumbar spine with minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages. VIII Ukrainian Winter Neurosurgical Meeting (UWNM). Ukraine, Bukovel, March 13–15, 2023. Abstract book. P. 40. https://rimononline.in.ua/uwnm2023

6. Stognii A. Substantiation and development of an own method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis, X Ukrainian Winter Neurosurgical Meeting (UWNM). Ukraine, Bukovel, February 20–22, 2023. Abstract book. P. 77 https://rimononline.in.ua/uwnm2025

ДОДАТОК Б
МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні використано комплекс взаємодоповнювальних методологічних засобів, які охоплювали клінічні, інструментальні, функціональні, біомеханічні, хірургічні, статистичні та етико-організаційні підходи.

1. Дизайн та організація дослідження. Виконано клінічне проспективне порівняльне контрольоване одноцентрове інтервенційне дослідження з подальшим обсерваційним етапом. Дослідження виконано на клінічній базі кафедри нейрохірургії Харківського національного медичного університету в умовах нейрохірургічного відділення № 2 КНП ХОР «Обласна клінічна лікарня».

2. Клінічні методи. Проведено нейрохірургічне та загальноклінічне обстеження пацієнтів із дегенеративним спондилолістезом поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами. Оцінено скарги, анамнестичні дані, неврологічний статус, вираженість радикулярного больового синдрому, наявність нейрогенної переміжної кульгавості, сегментарних чутливих порушень і периферичного парезу.

3. Інструментальні та променеві методи. Використано рентгенографію, рентгенівську комп'ютерну томографію та магнітно-резонансну томографію. На їхній підставі визначено тип і ступінь лістезу, сагітальний розмір хребтового каналу, висоту міжхребцевого простору, висоту форамінального отвору, відсоток зміщення хребця та інші морфометричні показники ураженого сегмента.

4. Функціональні, лабораторні та консультативні засоби. До стандартного обстеження включено електронейроміографію, електрокардіографію, загальноклінічний аналіз крові, загальний аналіз сечі, біохімічний аналіз крові, а також консультації суміжних фахівців за показаннями.

5. Оціночні шкали та рентгенометричний аналіз. Інтенсивність болю визначено за візуально-аналоговою шкалою (VAS), функціональні обмеження — за індексом неповносправності Освестрі (ODI). Для оцінювання функціонального стану хребта та спіно-тазового балансу виконано рентгенометричне визначення pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope, sagittal vertical axis, загального поперекового та сегментарного лордозу.

6. Біомеханічні методи. Біомеханічне моделювання методом скінченних елементів. Для аналізу використано модель попереково-крижового відділу L3–S1 з порівнянням стандартної міжтілової опори з PEEK та нового дистракційного кейджа. Оцінено можливості відновлення сегментарного лордозу, параметрів хребтово-тазового балансу та проаналізовано напружено-деформований стан у системі «транспедикулярна конструкція — хребтовий руховий сегмент — дистракційний кейдж».

7. Хірургічно-технологічні засоби. У клінічній частині дослідження застосовано порівняння авторської методики малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням титанового дистракційного кейджа та традиційної MIS-PLIF, а також інших способів міжтілового спондилодезу. Передопераційне планування передбачало розрахунок обсягу необхідної інтраопераційної корекції лордозу та відновлення сагітального балансу.

8. Засоби динамічного спостереження. Стан пацієнтів оцінено інтраопераційно, у ранньому післяопераційному періоді, через 6 і 12 місяців після операції та надалі. На 1-шу післяопераційну добу проведено контрольне рентгенологічне обстеження для оцінювання обсягу корекції та основних біомеханічних показників; на 30-ту добу — контрольну МРТ, клініко-неврологічний огляд, повторне визначення VAS і ODI.

9. Статистичні засоби. Систематизацію матеріалу та логіко-статистичний аналіз виконано за критичного рівня значущості $p<0,05$. Через ненормальний розподіл даних використано непараметричні методи. Центральну тенденцію описано за допомогою медіани, варіативність — за

нижнім і верхнім квартилями; для порівняння кількісних показників застосовано критерій Манна-Уїтні, для частотних показників — точний критерій Фішера.

10. Етичні та організаційні засоби. Під час виконання дослідження дотримано принципів біоетики та біомедицини; роботу схвалено комісією з етики та біоетики Харківського національного медичного університету (протокол № 7 від 10.10.2017). Усі учасники надали письмову інформовану згоду; конфіденційність персональних даних забезпечували кодуванням та дотриманням деонтологічних норм.

Табл. Б.1.

Коротка структурна схема методологічних засобів дослідження

Блок	Основні засоби	Що оцінювали
Клінічний	Нейрохірургічний і загальноклінічний огляд	Біль, неврологічний дефіцит, кульгавість, парез
Візуалізаційний	Рентгенографія, КТ, МРТ	Тип і ступінь лістезу, стеноз, висота диска, форамінальний резерв
Функціональний	VAS, ODI, ЕНМГ, ЕКГ	Біль, функціональний стан, нейром'язові та супутні показники
Біомеханічний	Метод скінченних елементів, модель L3–S1	Лордоз, спіно-тазовий баланс, НДС системи
Статистичний	Me [LQ; UQ], Манна—Уїтні, точний Фішера	Міжгрупові відмінності та достовірність результатів
Етичний	Інформована згода, протокол комісії з етики	Етична прийнятність і конфіденційність



Рис. Б.1. Візуальна аналогова шкала оцінки інтенсивності болю (за [178]**)**

ODI версія 2.1а

Ця анкета була розроблена для отримання інформації про те, як проблеми з Вашою спиною (або ногами) впливають на Ваше повсякденне життя.

Будь ласка, дайте відповідь на всі запитання кожного розділу. Позначте лише один варіант відповіді в кожному розділі, який найбільш точно описує Ваш стан сьогодні.

Розділ 1. Інтенсивність болю
- Зараз я не відчуваю болю.
- Зараз я відчуваю дуже слабкий біль.
- Зараз я відчуваю помірний біль.
- Зараз я відчуваю досить сильний біль.
- Зараз я відчуваю дуже сильний біль.
- Зараз я маю найсильніший біль, який лиш можна уявити.

Розділ 2. Догляд за собою (вмивання, одягання тощо)
- Я можу нормально доглядати себе, не відчуваючи при цьому додаткового болю.
- Я можу нормально доглядати себе, проте це дуже болісно.
- Мені боляче доглядати себе, я повільний та обережний.
- Мені потрібна деяка допомога, проте я справляюся з особистою гігієною.
- Мені потрібна щоденна допомога з більшістю речей, пов'язаних із доглядом за собою.
- Я не можу одягнутися, мені важко митися, я залишаюся в ліжку.

Розділ 3. Піднімання предметів
- Я можу піднімати важкі предмети без додаткового болю.
- Я можу піднімати важкі предмети, але це підсилює біль.
- Біль заважає мені піднімати важкі предмети з підлоги, але я можу впоратися з цим, якщо вони зручно розміщені, наприклад на столі.
- Біль заважає мені піднімати важкі предмети з підлоги, але я можу впоратися з підніманням предметів від легкої до середньої тяжкості, якщо вони зручно розміщені.
- Я можу піднімати лише дуже легкі предмети.
- Я не можу піднімати та носити взагалі нічого.

Розділ 4. Ходьба
- Біль не заважає мені пройти будь-яку відстань.
- Біль заважає мені пройти відстань, більшу ніж 1,5 кілометри.
- Біль заважає мені пройти відстань, більшу ніж 500 метрів.
- Біль заважає мені пройти відстань, більшу ніж 100 метрів.
- Я можу ходити лише використовуючи палицю чи милиці.
- Я майже увесь час перебуваю в ліжку і до туалету мені потрібно повзти.

Розділ 5. Сидіння
- Я можу сидіти в будь-якому кріслі скільки завгодно часу.
- Я можу скільки завгодно сидіти у своєму улюбленому кріслі.
- Біль заважає мені сидіти понад 1 годину.
- Біль заважає мені сидіти більше ніж пів години.
- Біль заважає мені сидіти більше ніж 10 хвилин.
- Біль цілком заважає мені сидіти.

Розділ 6. Стояння
- Я можу стояти скільки завгодно часу без посилення болю.
- Я можу стояти скільки завгодно часу, але це підсилює біль.
- Біль заважає мені стояти понад 1 годину.
- Біль заважає мені стояти більше ніж пів години.
- Біль заважає мені стояти більше ніж 10 хвилин.
- Біль заважає мені стояти взагалі.

Розділ 7. Сон
- Біль ніколи не порушує мій сон.
- Біль час від часу порушує мій сон.
- Через біль я сплю менше ніж 6 годин.
- Через біль я сплю менше ніж 4 години.
- Через біль я сплю менше ніж 2 години.
- Через біль я не сплю взагалі.

Розділ 8. Статеве життя (якщо є)
- Моє статеве життя є нормальним і не викликає додаткового болю.
- Моє статеве життя є нормальним, але викликає додатковий біль.
- Моє статеве життя майже нормальне, але є дуже болісним.
- Моє статеве життя дуже обмежене через біль.
- Моє статеве життя майже відсутнє через біль.
- Біль заважає мені мати статеве життя взагалі.

Розділ 9. Соціальне життя
- Моє соціальне життя є нормальним і не викликає жодного додаткового болю.
- Моє соціальне життя є нормальним, але підсилює рівень болю.
- Біль не має суттєвого впливу на моє соціальне життя, за винятком обмеження моєї участі в активних заняттях (наприклад, спорт тощо).
- Біль обмежує моє соціальне життя, я не виходжу часто з дому.
- Через біль моє соціальне життя обмежується лише домом.
- Через біль я не маю соціального життя.

Розділ 10. Поїздки
- Я можу їздити куди завгодно без болю.
- Я можу їздити куди завгодно, але це підсилює біль.
- Біль сильний, але я справляюся з поїздками тривалістю понад 2 години.
- Біль обмежує поїздку до 1 години.
- Через біль я можу здійснювати короткі найнеобхідніші поїздки тривалістю не більше ніж 30 хвилин.
- Через біль я не можу подорожувати, за винятком поїздок, пов'язаних з лікуванням.

Рис. А.2. Українськомовна шкала індексу неповносправності Освестрі (ODI), за [206]

ДОДАТОК В
АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ДУ Інститут неврології, психіатрії та наркології імені П.В. Волошина Національної академії медичних наук України, член-кореспондент НАМН України, професор
Ігор Лінський

«06» 10 2025 р.

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Найменування пропозиції (метод профілактики, діагностики, лікування, пристрій, форма організаційної роботи та ін.)
Спосіб малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації хребців із використанням дистракційних кейджів у пацієнтів зі спондилолістезом поперекового відділу хребта.
2. Ким і коли запропоновано
Стогній А.В., П'ятикоп В.О., Бабалян Ю.О.; 2023-2025 рр.
3. Джерело інформації
Stognii A.V., Piatykop V.O., Babalian I.O. Substantiation and development of an optimal method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis. Ukrainian Neurosurgical Journal. 2025;31(2):55-64. DOI: 10.25305/unj.322446.
4. Де і коли впроваджено
У ДУ Інститут неврології, психіатрії та наркології імені П.В. Волошина Національної академії медичних наук України.
5. Результати застосування методу за період 2022-2025 рр..
6. Ефективність впровадження за критеріями, висловленими в джерелі інформації (п. 3)
Впровадження сприяє підвищенню ефективності лікування пацієнтів із поперековим спондилолістезом шляхом поліпшення корекції сегментарних взаємовідношень, оптимізації передопераційного планування та оцінки безпеки й клінічних результатів малоінвазивної стабілізації з дистракційними кейджами.

Відповідальний(і) за впровадження к.м.н., доцент завідувач відділу відділу функціональної нейрохірургії з групою патоморфології Посохов Микола Федорович

(дата) (підпис)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Генеральний директор
КОМУНАЛЬНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСНОЇ РАДИ «ЦЕНТР СЕРЦЕВО-СУДИННИХ ТА ЦЕРЕБРОВАСКУЛЯРНИХ ПАТОЛОГІЙ»

Віктор ЛЕЩЕНКО

«11» 02 2026 р.

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Найменування пропозиції (метод профілактики, діагностики, лікування, пристрій, форма організаційної роботи та ін.)
Малоінвазивна задня міжтілова стабілізація хребців із використанням дистракційних кейджів у пацієнтів зі спондилолістезом поперекового відділу хребта.

2. Ким і коли запропоновано
Стогній А.В., П'ятикоп В.О., Бабалян Ю.О.; авторський спосіб оформлено патентною заявкою № a202302383 від 18.05.2023 р., опубліковано у 2025 р.

3. Джерело інформації (інформаційний лист, звіт про НДР, дисертація, монографія, з'їзди, конгреси, конференції, семінари тощо)
Наукова стаття, дисертація.

4. Джерело інформації
Stognii AV, Piatykop VO, Babalian IO. Substantiation and development of an optimal method of minimally invasive posterior interbody stabilization of vertebrae using distraction cages in patients with lumbar spondylolisthesis. Ukrainian Neurosurgical Journal. 2025;31(2):55–64. DOI: 10.25305/unj.322446.
Стогній А.В. Вдосконалення лікування спондилолістезів поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами: дисертація. Харків: Харківський національний медичний університет; 2026.

5. Де і коли впроваджено
У КНП ХОР «Центр серцево-судинних та цереброваскулярних патологій», 2025–2026 рр.

6. Результати застосування методу за період
2025–2026 рр.

7. Ефективність впровадження за критеріями, висловленими в джерелі інформації (п. 3)
Використання методики сприяє зменшенню операційної травматичності та інтраопераційної крововтрати, покращенню декомпресії невральних структур, відновленню висоти міжхребцевого простору, сегментарного лордозу та показників сагітального балансу у пацієнтів із дегенеративним поперековим спондилолістезом.

Відповідальний(і) за впровадження: керівник профільного структурного підрозділу / уповноважений лікар

Медичний директор з терапевтичного стаціонару (підпис) Тетяна УСТИМЕНКО

"Medical Cluster of Transcarpathia (Zakarpattia)" – a regional medical infrastructure ecosystem
("Medical Clusters Network" NGO)
Kapushanska Street, 32A
Uzhhorod-88018, Ukraine
tel. +38 098 757 93 76
m@kalmykov.info
http://kalmykov.info/en/

«Медичний кластер Закарпаття» — регіональна медична інфраструктурна екосистема
(ГО «Мережа медичних кластерів»)
вул. Капушанська, 32А
Ужгород–88018, Україна
тел. +38 098 757 93 76
m@kalmykov.info
http://kalmykov.info/uk

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Голова Громадської організації
«Мережа медичних кластерів»,
д. мед. н., доцент

О. О. Калмиков

«30» січня 2026 р.

ГРОМАДСЬКА ОРГАНІЗАЦІЯ "МЕРЕЖА МЕДИЧНИХ КЛАСТЕРІВ" код 45147983 УКРАЇНА, м. УЖГОРОД

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів, отриманих в дисертаційному дослідженні,
в науково-дослідницьку діяльність.

Пропозиція для впровадження: лікування спондилолістезів шляхом впровадження малоінвазивної задньої міжтілової стабілізації з можливістю одномоментної дистракції та редукції аксіальної трансляції з використанням передопераційно скомбінованих міжтілових титанових кейджів з можливістю їх дистракції in situ та транспедикулярного металоспондилодезу.

Автори: Манукян Володимир Антонійович [UA], Стогній Артем Володимирович [UA]

Джерело інформації: Патент на винахід. МПК A61F2/44, A61B17/70. Міжтіловий титановий кейдж. Манукян Володимир Антонійович [UA], Стогній Артем Володимирович [UA]. Заяв. a202302383, 18.05.2023. Опубл. 20.11.2024, бюл. № 47/2024.

Установа, в якій проведено впровадження: Науково-дослідний інститут доказової медицини (Товариство з обмеженою відповідальністю «Калмиков Консалтинг»). 61002, м. Харків, вул. Мироносицька, 43.

Термін впровадження: 2022–2026 рр.

Форма впровадження: включено до науково-дослідницьких, дослідно-конструкторських та технологічних робіт, а також консалтингової діяльності НДІ доказової медицини щодо розробки та впровадження підходів до діагностики, лікування, профілактики ускладнень та реабілітації пацієнтів зі спондилолістезами поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами.

Ефективність впровадження: у науковій діяльності — підвищення ефективності формування доказової бази застосування субстанцій, виробів медичного призначення, обладнання і апаратури, а також технологій діагностики, лікування, профілактики й реабілітації щодо пацієнтів зі спондилолістезами поперекового відділу хребта з нейрокомпресійними розладами.

Зауваження, пропозиції: рекомендовано впроваджувати у науково-дослідницьку діяльність.

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 14:59:09 24.03.2026

Назва файлу з підписом: Diss_Stogniy_signed.pdf
Розмір файлу з підписом: 7.8 МБ

Назва файлу без підпису: Diss_Stogniy_signed.verified.pdf
Розмір файлу без підпису: 7.8 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: СТОГНІЙ АРТЕМ ВОЛОДИМИРОВИЧ
П.І.Б.: СТОГНІЙ АРТЕМ ВОЛОДИМИРОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 3233507475
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 14:34:37 24.03.2026
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000029B98D0183204807
Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301
Серійний номер носія особистого ключа: 011
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Кваліфікований
Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAdES enveloped)
Формат підпису: З позначкою часу від ЕП (CAdES-T)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2026.02.19 13:00