



БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЕРЕДНЕЙ БРЮШНОЙ СТЕНКИ И ЕЁ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ БОЛЬШИХ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ВЕНТРАЛЬНЫХ ГРЫЖАХ

О.В. Галимов^{1, 2}, М.Р. Бакеев^{1, 2}, В.О. Ханов^{1, 2}, Ф.Р. Нагаев^{1, 2}, Н.Д. Аллаяров^{1, 2}

¹Башкирский государственный медицинский университет, ул. Ленина, д. 3, г. Уфа, 450008, Россия

²Клиника Башкирского государственного медицинского университета, ул. Шафиева, д. 2, г. Уфа, 450096, Россия

Резюме. Актуальность. Большие послеоперационные вентральные грыжи составляют серьёзную проблему современной хирургии и требуют совершенствования предоперационного планирования. Выполнение сепарационных ретромукулярных протезирующих герниопластик при гигантских и сложных вентральных грыжах ассоциировано со значительным травматизмом, большими рисками осложнений. Изучение особенностей биомеханики передней брюшной стенки может позволить улучшить результаты оперативного лечения пациентов с большими послеоперационными вентральными грыжами. *Цель:* разработать и внедрить в клиническую практику биомеханическую реконструктивную герниопластику с целью лечения пациентов с большими послеоперационными вентральными грыжами. *Материалы и методы.* Для разработки теоретической модели реконструкции передней брюшной стенки с учётом особенностей биомеханики была создана геометрическая модель брюшной полости на основании данных компьютерной томографии. Для моделирования физической стабильной линии сшивания грыжевого дефекта применены законы классической механики, интерпретирующие соотношение между напряжением тела и его деформацией. Представленная физико-математическая модель позволяет определить оптимальные расстояния растяжений для обеих сторон мышечно-апоневротических компонентов передней брюшной стенки, при которых силы упругой деформации будут уравнивать друг друга. Для обоснования созданной концепции было проведено проспективное одноцентровое исследование с участием 74 пациентов с большими послеоперационными вентральными грыжами. В первую группу вошли 33 пациента, которым использовалась модель биомеханической реконструкции, а вторую группу составили 41 пациент, которым данный алгоритм не применялся. *Результаты.* Обе группы не имели статистически значимых различий на дооперационном этапе, а параметрические характеристики грыж были сопоставимы ($p > 0,05$). Выполнение биомеханической реконструкции передней брюшной стенки позволило снизить количество двусторонних ($p < 0,001$) и увеличить количество односторонних задних сепарационных пластик ($p = 0,014$) в первой группе, по сравнению со второй. Также отмечается сокращение времени оперативного вмешательства ($p = 0,021$), сроков госпитализации ($p = 0,037$) и количества осложнений ($p = 0,682$) в первой группе, по сравнению со второй. *Заключение.* Использование биомеханической реконструктивной герниопластики позволяет учитывать анатомо-физиологические особенности передней брюшной стенки, что находит отражение в создании стабильной линии сшивания грыжевого дефекта. Полученные теоретические преимущества экстраполируются в удовлетворительных клинических результатах, демонстрирующих снижение травматизма герниопластики больших послеоперационных вентральных грыж.

Ключевые слова / Keywords [MeSH]: вентральная грыжа / Hernia, Ventral [D006555]; послеоперационная грыжа / Incisional Hernia [D000069290]; герниопластика / Herniorrhaphy [D059685]; хирургическая сетка / Surgical Mesh [D013526]; реконструктивные хирургические процедуры / Reconstructive Surgical Procedures [D019651]; брюшная стенка / Abdominal Wall [D034941]; биомеханические явления / Biomechanical Phenomena [D001696]; теоретические модели / Models, Theoretical [D008962]; математические модели / Models, Cardiovascular [D008955]; предоперационная подготовка / Preoperative Care [D011300]; проспективные исследования / Prospective Studies [D011446]; результат лечения / Treatment Outcome [D016896]; продолжительность госпитализации / Length of Stay [D007902]; послеоперационные осложнения / Postoperative Complications [D013997]; время операции / Operative Time [D061646]; прочность на растяжение / Tensile Strength [D013718]; конечно-элементный анализ / Finite Element Analysis [D020542]; поверхностные свойства / Surface Properties [D013499].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.

Соответствие нормам этики. Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно требовалось.

Для цитирования: Галимов О.В., Бакеев М.Р., Ханов В.О., Нагаев Ф.Р., Аллаяров Н.Д. Биомеханическая реконструкция передней брюшной стенки и её математическое моделирование при больших послеоперационных вентральных грыжах. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2026;16(1):56-67. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2026.1.CLIN.6>

BIOMECHANICAL RECONSTRUCTION OF THE ANTERIOR ABDOMINAL WALL AND ITS MATHEMATICAL MODELING IN LARGE INCISIONAL HERNIAS

Oleg V. Galimov^{1,2}, Marat R. Bakeev^{1,2}, Vladislav O. Khanov^{1,2}, Farit R. Nagaev^{1,2}, Nail' D. Allayarov^{1,2}

¹Bashkir State Medical University, st. Lenina, 3, Ufa, 450008, Russia

²Clinic of Bashkir State Medical University, st. Shafieva, 2, Ufa, 450096, Russia

Abstract. Large incisional hernias are a serious problem in modern surgery. Performing separation retromuscular prosthetic hernioplasty for complex ventral hernias is associated with significant injury and high risks of complications. Studying the biomechanics of the anterior abdominal wall may improve the results of surgical treatment of patients with large postoperative ventral hernias. *Objective:* to develop and substantiate, using mathematical modeling, an algorithm for performing biomechanical reconstructive hernioplasty for large incisional hernias. *Materials and methods.* The theoretical basis of the biomechanical reconstruction was a geometric model of the anterior abdominal wall, formed after transformations, taking into account the restoration of the true size of the abdominal cavity. To create a physically stable line of approximation of a hernial defect, the laws of classical mechanics describing the relationship between body stress and its deformation are used. The presented physico-mathematical model makes it possible to determine the optimal stretching distances for both sides of the muscular-aponeurotic sides of the anterior abdominal wall, at which the forces of elastic deformation will balance each other. To substantiate the presented concept, a prospective single-center study was conducted involving 74 patients with large postoperative ventral hernias. The first group included 33 patients for whom the biomechanical reconstruction model was applied, and the second group consisted of 41 patients for whom this algorithm was not applied. *Results.* Both groups had no statistically significant differences at the preoperative stage, and the parametric characteristics of hernias were comparable ($p>0.05$). Biomechanical reconstruction of the anterior abdominal wall made it possible to reduce the number of bilateral ($p<0.001$) and increase the number of unilateral posterior separation procedures ($p=0.014$) in the first group, compared with the second. There was also a reduction in the time of surgery ($p=0.021$), the length of hospitalization ($p=0.037$) and the number of complications ($p=0.682$) in the first group, compared with the second. *Conclusion.* The use of biomechanical reconstructive hernioplasty makes it possible to take into account the anatomical and physiological features of the anterior abdominal wall, which is reflected in the creation of a stable suturing line of the hernial defect.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. This research received no external funding.

Compliance with ethical principles. The authors confirm that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it necessary.

Cite as: Galimov O.V., Bakeev M.R., Khanov V.O., Nagaev F.R., Allayarov N.D. Biomechanical reconstruction of the anterior abdominal wall and its mathematical modeling in large incisional hernias. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health.* 2026;16(1):56-67. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2026.1.CLIN.6>

ВВЕДЕНИЕ

Грыжи передней брюшной стенки предстают актуальной проблемой современной медицины и хирургии. Послеоперационные вентральные грыжи (ПОВГ) занимают лидирующие позиции среди всех поздних послеоперационных осложнений в абдоминальной хирургии, частота возникновения которых достигает 30% спустя два года после выполнения лапаротомии [1]. Длительное грыженосительство и наличие обширной операционной раны могут приводить к формированию больших и гигантских ПОВГ, оперативное лечение которых составляет серьёзную практическую задачу и требует тщательной предоперационной подготовки. Потеря домена брюшной полости может выступать дополнительным отягощающим фактором для реконструктивной операции на передней брюшной стенке [2]. Одной из самых эффективных и доказанных методик протезирующей герниопластики при ПОВГ является операция с ретромускулярной установкой сетчатого эндопротеза и восстановлением белой линии живота (операция Rives-Stoppa) [3]. Технические трудности при грыжесечениях больших ПОВГ привели к созданию сепарационных методик, заключающихся в разделении компонентов передней брюшной стенки и увеличении их мобильности,

благодаря чему достигается аппроксимация краев грыжевых ворот и полноценная абдоминальная реконструкция [4]. Однако, несмотря на развитие и совершенствование ретромускулярных методик, герниопластики не всегда удаётся достичь восстановления белой линии живота, вследствие чего применяются операции «отчаяния» по типу мостовидных bridge-пластик [5]. В ряде ситуаций чрезмерное натяжение тканей вдоль линии шва приводит к разрыву апоневроза с возникновением гематом послеоперационной раны, требующих повторных ревизионных процедур, а возникающие поздние инфекционные осложнения увеличивают сроки госпитализации и количество рецидивов ПОВГ [6].

В настоящее время совершенно очевидно, что герниопластика большой ПОВГ должна быть чётко спланирована. Для комплексной оценки состояния тканей передней брюшной стенки активно применяются методы визуализации с помощью компьютерной томографии (КТ). Послойное исследование грыжи и окружающих её тканей с использованием КТ-герниоабдонометрии позволяет прогнозировать объём герниопластики и определять необходимость применения сепарационных методик диссекции [7]. Существующие на данный момент индексы сепарации позволяют достоверно оценивать

возможность первичного фасциального закрытия грыжевого дефекта без широкой латеральной мобилизации ретромускулярного пространства [8]. При этом окончательное решение о выполнении сепарационной пластики принимается интраоперационно, а чрезмерный объём диссекции увеличивает травматизм операции. В то же время КТ-герниоабдоминометрия в состоянии покоя не даёт полноценной информации об истинном объёме брюшной полости и наличии возможной рубцовой контрактуры мышц передней брюшной стенки. Брюшная полость является динамически изменяющимся замкнутым пространством, которое может менять свою геометрическую конфигурацию в зависимости от положения тела и напряжения мышц брюшного пресса. Следующий этап в развитии реконструктивных герниопластик должен быть направлен на изучение биомеханических особенностей передней брюшной стенки при больших ПОВГ, а полученные первые клинические результаты уже свидетельствуют о перспективе данного направления [9].

В состоянии анатомической и физиологической целостности правая и левая стороны передней брюшной стенки создают взаимоперпендикулярные векторы сил упругого натяжения, ось симметрии для которых проходит через срединную линию – белую линию живота. Потеря медиальной точки фиксации для влагалищ прямых мышц живота после лапаротомий приводит к дисбалансу мышечного тонуса. Ткани передней брюшной стенки при наличии ПОВГ также характеризуются асимметрией векторов сил натяжения. В связи с чем главной задачей при реконструктивной протезирующей герниопластике больших ПОВГ является восстановление медиальной точки фиксации для влагалищ прямых мышц живота с одинаковым натяжением контрлатеральных мышечно-сухожильных групп, за счёт чего будет достигаться стабильность линии аппроксимации грыжевых ворот. Более того, имеются данные, что сбалансированное натяжение тканей оказывает благоприятное влияние на синтетическую и пролиферативную активность фибробластов, укрепляющих послеоперационный рубец [10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ: разработка и обоснование биомеханической концепции реконструктивной герниопластики при больших ПОВГ с использованием математического моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическая основа математической модели биомеханической реконструкции передней брюшной стенки основана на создании геометрически и физически стабильной передней брюшной стенки. Для демонстрации данной концепции необходимо рассмотреть поперечный КТ-срез брюшной полости и грыжи в сечении, соответствующем наибольшей ширине грыжевых ворот. Данная область является местом с максимальным поперечным расстоянием между двумя наиболее отдалёнными точками грыжевого дефекта брюшной стенки, за счёт чего принципы биомеханической реконструкции будут выполняться и в областях с меньшими размерами дефекта. На поперечном сечении пространства брюшной полости и грыжевого дефекта имеют конфигурации окружностей типа эллипса. При этом справедливо можно заметить, что истинная площадь брюшной полости на данном срезе соответствует сумме вышеописанных площадей. Представленное допущение обосновано тем, что в процессе реконструктивной герниопластики содержимое грыжевого мешка вправляется в брюшную полость, в связи с чем изменяется её общий объём, рассматриваемый нами в качестве интеграла всех площадей поперечных сечений. Геометрическое представление сечения брюшной полости после реконструктивных изменений также будет соответствовать эллипсу, но уже с большей площадью. Для определения нового значения площади брюшной полости необходимо найти сумму площадей эллипсов грыжевого мешка и брюшной полости до реконструкции. Мышечно-сухожильные элементы передней брюшной стенки в норме формируют замкнутый контур, соответствующий длине окружности брюшной полости на поперечном сечении. Стоит отметить, что между периметром и площадью эллипса нет прямой зависимости, поэтому сумма площадей грыжевого мешка и остаточной брюшной полости, образующих истинную площадь на поперечном сечении, будет формировать пространство с размером наружного контура зависящего от величины его полуосей. Таким образом, после геометрических реконструкций, мы можем определить длину эллипса (по формуле С. Рамануджана), описывающего форму истинной брюшной полости. Все вышеописанные математические преобразования представлены на рисунке 1.

Для определения новых значений полуосей необходимо уточнить, что на поперечном сечении брюшной полости горизонтальный размер имеет более фиксированные значения, чем вертикальный.

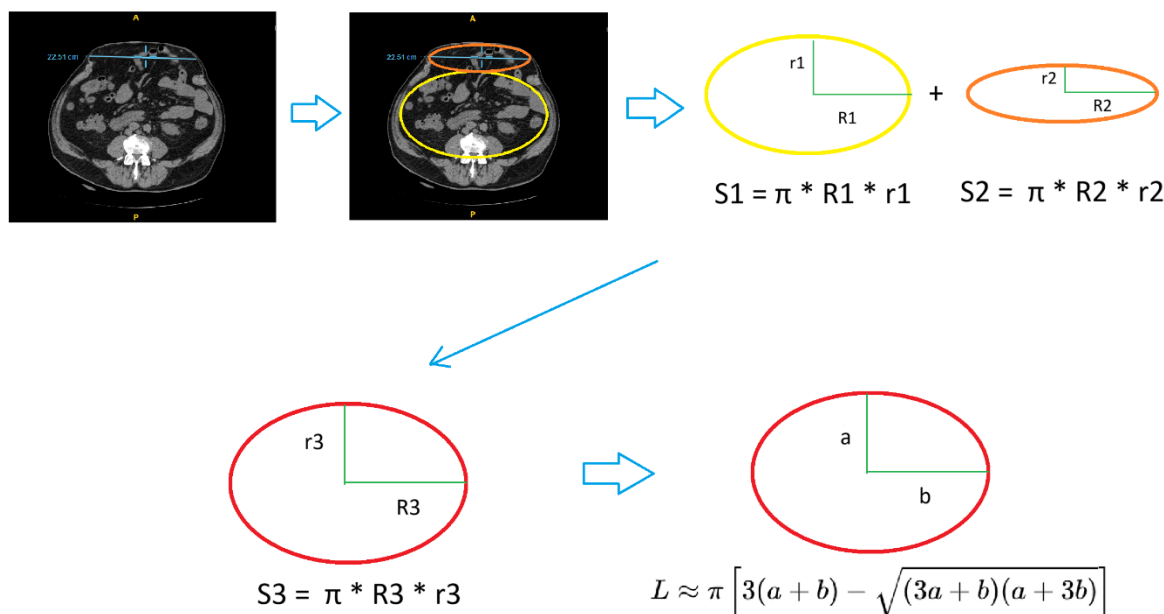


Рисунок 1. Геометрические преобразования поперечной конфигурации брюшной полости после операции герниопластики: R – радиус большей полуоси, r – радиус меньшей полуоси, S – площадь эллипса поперечного сечения брюшной полости, L – периметр эллипса, описывающего истинные границы брюшной полости

Figure 1. Geometric transformations of the transverse configuration of the abdominal cavity after hernioplasty surgery: R is the radius of the larger semi-axis, r is the radius of the smaller semi-axis, S is the area of the ellipse of the abdominal cross-section, L is the perimeter of the ellipse describing the true boundaries of the abdominal cavity

Данное явление обусловлено как анатомическими особенностями строения костных структур (таз, реберная дуга, позвоночник), так и физиологическими (при вправлении грыжевого содержимого увеличивается объём по переднему краю пространства брюшной полости, а боковые отделы живота остаются «малоподвижны»). В связи с этим горизонтальная полуось брюшной полости имеет фиксированное значение $R1 \approx R3$ (допущение, что $R1 = R3 = b$). При вычислении суммы площадей можно определить параметр r3:

$$\begin{aligned} S1 + S2 &= S3, \\ \pi (R1 \times r1 + R2 \times r2) &= \pi (R3 \times r3), \\ r3 &= (R1 \times r1 + R2 \times r2) / R3, \end{aligned}$$

откуда следует, что:

$$a = (R1 \times r1 + R2 \times r2) / R1.$$

Следующим этапом необходимо определить длины мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки с обеих сторон от грыжевого дефекта. Точкой начала отсчёта для измерения расстояния кривых на геометрической модели нами выбрана сагиттальная плоскость с прохождением через центр позвонка на соответствующем уровне. При этом стоит сразу отметить, что сторона с меньшей длиной мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки является менее подвижной, что обусловлено рубцовой деформацией тканей и контрактурой мышц. Данное явление наглядно демонстрируется при выполнении КТ-абдоминометрии с пробой Вальсальвы (в состоянии мышечного напряжения живота), при которой сме-

щение менее длинной половины мышц будет короче, а более длинной, соответственно, больше. Полученные кривые линии мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки с обеих сторон необходимо спроецировать с сохранением размерности на рассчитанный эллипс, отражающий истинный размер брюшной полости с учётом восстановления его анатомической целостности. После геометрической реконструкции живота становится доступным измерение нового расстояния между наиболее отдалёнными точками мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки, которое будет соответствовать истинному размеру дефекта ПОВГ (рис. 2).

Следующим этапом необходимо определить точку на линии дефекта передней брюшной стенки, в которой силы мышечного натяжения и упругой деформации обеих сторон будут уравнивать друг друга. С этой целью нами рассмотрена физическая составляющая биомеханики передней брюшной стенки с применением законов классической механики, в частности обобщенного закона Гука для изотропных тел в пространстве. В качестве главной деформации при растяжении принята продольная деформация вдоль продольной оси боковых мышц живота, а поперечная и вертикальная деформации, согласно принципу суперпозиции, сведены к нулю. Визуализация направлений векторов деформаций в точке аппроксимации мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки отражена на рисунке 3.

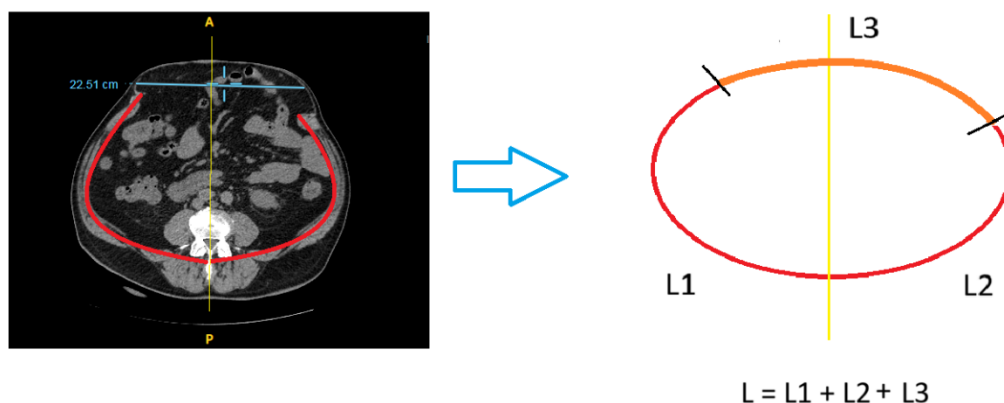


Рисунок 2. Графическое распределение мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки и грыжевого дефекта после геометрической реконструкции: L1 – длина правой половины мышечно-апоневротических структур живота, L2 – длина левой половины мышечно-апоневротических структур живота, L3 – дефект тканей передней брюшной стенки после восстановления геометрии брюшной полости

Figure 2. Graphical distribution of the musculoskeletal elements of the anterior abdominal wall and hernial defect after geometric reconstruction: L1 is the length of the right half of the muscular-aponeurotic structures of the abdomen, L2 is the length of the left half of the muscular-aponeurotic structures of the abdomen, L3 is the defect of the tissues of the anterior abdominal wall after restoration of the geometry of the abdominal cavity

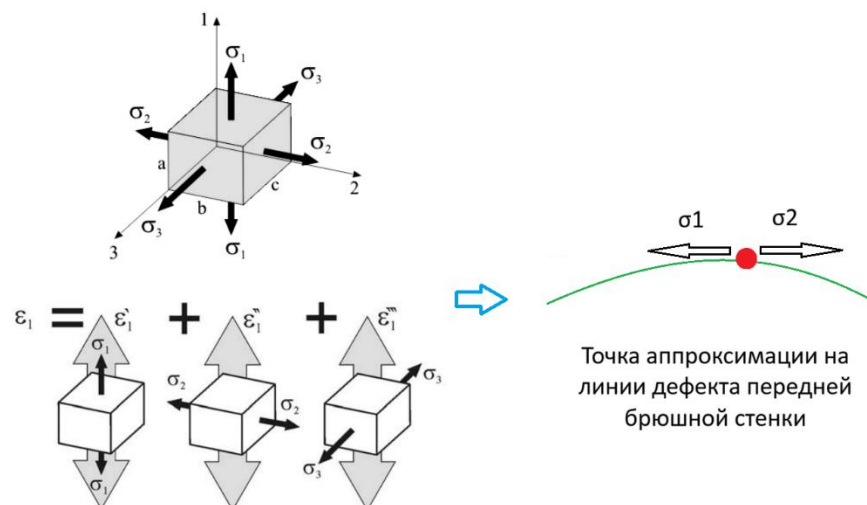


Рисунок 3. Адаптация обобщенного закона Гука для изотропных тел в пространстве при восстановлении белой линии живота с учётом принципа суперпозиции векторов напряжений: σ – напряжение мышц при пластическом растяжении, ϵ – относительная продольная деформация вдоль вектора напряжения

Figure 3. Adaptation of the generalized Hooke's law for isotropic bodies in space when restoring the white line of the abdomen, taking into account the principle of superposition of stress vectors: σ is muscle tension during plastic stretching, ϵ is the relative longitudinal deformation along the stress vector

Продольная деформация вдоль вектора напряжения будет описываться следующей формулой:

$$\epsilon = \sigma / E,$$

где E – модуль Юнга.

Вместе с тем при сопоставлении двух наиболее удалённых точек мышечно-сухожильных элементов обеих сторон на линии грыжевого дефекта необходимо добиться равенства значений напряжений (σ_1 и σ_2) в точке аппроксимации, с учётом того, что модуль Юнга будет одинаковым. Стоит отметить, что принятие равенства модуля Юнга для обеих сторон передней брюшной стенки выступает важным и вынужденным физическим допущением. Послеопера-

ционные изменения тканей передней брюшной стенки в области грыжи, а также наличие боковых рубцов могут изменять механические характеристики мышечно-сухожильных элементов живота. Однако с позиций восстановительной герниопластики требуется иссечение всех рубцово-изменённых тканей, ограничивающих подвижность мышц передней брюшной стенки, при этом создаются условия для их физиологического сокращения и растяжения. В связи с этим после этапа мобилизации ретромулярного пространства в рамках представленной концепции справедлива формула $E_1 \approx E_2$. «Идеализация» параметров деформации мышечных групп передней брюшной стенки позволяет представить

точную математическую модель необходимой оперативной реконструкции, поэтому нами принято положение о том, что $E_1 = E_2$.

С другой стороны, относительное продольное растяжение можно выразить через формулу относительного удлинения, т.е. $\epsilon = \Delta l / L$, где Δl – абсолютное удлинение тела, L – исходная длина тела. Если $\sigma_1 = \sigma_2$, значит $\epsilon_1 \times E = \epsilon_2 \times E$, откуда следует:

$$\Delta l_1 / L_1 = \Delta l_2 / L_2;$$

$$\Delta l_1 / \Delta l_2 = L_1 / L_2.$$

Таким образом, отношение длин обеих сторон мышечно-сухожильных элементов передней брюшной стенки позволяет определить соотношения расстояний деформаций для каждой стороны, при которой напряжения мышц будут уравнивать друг друга, равно как и силы упругого натяжения в точке аппроксимации. Определение точки на линии дефекта достигается за счёт соотношения расстояний деформации с каждой стороны (рис. 4).

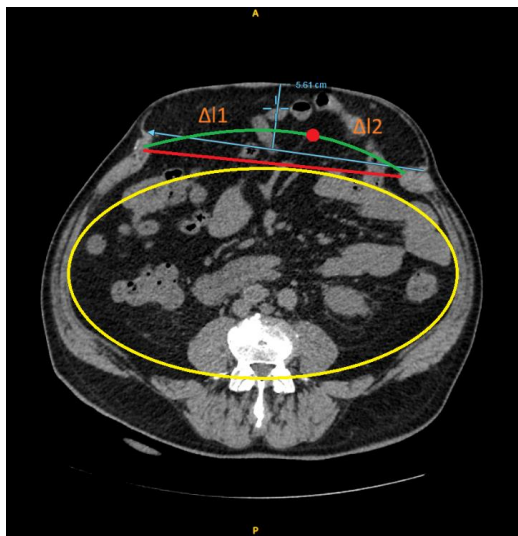


Рисунок 4. КТ-интерпретация биомеханической реконструкции передней брюшной стенки при большой ПОВГ с нахождением точки аппроксимации: Δl_1 – длина растяжения правой половины мышечно-сухожильных структур, Δl_2 – длина растяжения левой половины мышечно-сухожильных структур

Figure 4. CT interpretation of the biomechanical reconstruction of the anterior abdominal wall with large incisional hernia with finding the approximation point: Δl_1 is the length of stretching of the right half of the musculoskeletal structures, Δl_2 is the length of stretching of the left half of the musculoskeletal structures

В то же время стоит сразу отметить, что у пациентов с наличием боковых послеоперационных рубцов (после множественного дренирования живота, закрытия стом, трансректальных и параректальных разрезов) данная математическая модель не будет применима и потребует определения соотношения показателей E_1 и E_2 . Отсутствие равенства модулей Юнга диктует необходимость интраоперационного определения прочностных характеристик мышечно-

сухожильных элементов передней брюшной стенки, при этом также необходимо достичь соответствия натяжений контрлатеральных сторон с учётом их деформируемости. При этом за «нулевую» точку отсчёта можно принять соотношения деформаций, рассчитанных с учётом $E_1 = E_2$, увеличивая размер диссекции тканей до достижения необходимого сопоставления сторон.

Расчёт параметра соотношений длин мышечно-сухожильных элементов даёт информацию о том, в каких пределах необходимо производить растяжение тканей с обеих сторон от грыжевого дефекта при операции герниопластики. Важной особенностью данной концепции является достижение физиологического баланса натяжения тканей, рассчитанного с учётом особенностей биомеханики передней брюшной стенки. В практическом плане представленная концепция требует определения мышечного сопротивления при аппроксимации грыжевых ворот в рассчитанной точке биомеханической стабильности на максимальной ширине грыжевых ворот. При этом выполняется мобилизация ретромускулярного пространства, а при необходимости проводится сепарация компонентов до достижения беспрепятственного сопоставления каждой из сторон передней брюшной стенки на рассчитанные значения расстояний удлинения.

Для обоснования данной концепции нами было проведено проспективное наблюдательное одноцентровое когортное исследование на базе хирургического отделения Клиники БГМУ с участием 74 пациентов с большими и гигантскими ПОВГ, которым требовалось выполнение протезирующей герниопластики за период с сентября 2024 года по сентябрь 2025 года. Все пациенты подписали информированное добровольное согласие на участие в исследовании, а также обнародование обезличенных данных результатов лечения в медицинской и научно-образовательной литературе. Критериями включения в исследование являлись: согласие пациента на участие в исследовании, наличие большой срединной ПОВГ (с шириной грыжевых ворот более 10 см), возраст от 18 до 70 лет. Критерии исключения: отсутствие согласия на участие, рецидивная ПОВГ, наличие длительного анамнеза курения (≥ 10 пачко-лет), наличие морбидного ожирения, наличие ущемленной ПОВГ. Распределение пациентов не было рандомизировано и выполнялось по хронологическому принципу по мере внедрения метода в клиническую практику. Больные были госпитализированы в плановом порядке после комплексного предварительного обследования на амбулаторном этапе. Стратификация пациентов выполнялась в соответствии с актуальными рекомендациями Европейского герниологического общества

(Muysoms F. и соавт., 2009), а все ПОВГ имели среднюю локализацию. Всем пациентам выполнялась предоперационная КТ-герниоабдоминометрия. Во всех случаях проводилась открытая операция с ретромускулярной установкой сетчатого эндопротеза. Сетчатые эндопротезы, применявшиеся для укрепления дефекта передней брюшной стенки, были унифицированы как по материалу (полипропилен), так и по размеру пор (макропористые). Размеры имплантируемого сетчатого эндопротеза соответствовали размеру мобилизованного пространства передней брюшной стенки. Тактика лечения пациентов в послеоперационном периоде также имела единый стандартизированный характер в соответствии с актуальными отечественными и международными герниологическими рекомендациями. Для фиксации «ранних» послеоперационных осложнений срок наблюдения за пациентами ограничивался 30-ю днями с момента выполнения операции. Все операции выполнялись тремя врачами-хирургами, владеющими всеми методами ретромускулярной протезирующей герниопластики, с опытом работы более 10 лет, а также использующих стандартизированные и валидированные техники оперативных вмешательств в герниологии. Все хирурги выполняли операции как с применением биомеханической реконструкции, так и без нее.

Математические модели были реализованы и экстраполированы на КТ-изображения с использованием графических редакторов Microsoft Visual Studio и RadiAnt Viewer. Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакетов программного обеспечения Microsoft Office 2024 и SPSS (IBM SPSS Statistics 27). Для определения нормальности распределения количественных параметров исследуемых групп использовали критерий Shapiro-Wilk. При нормальном распределении исследуемых количественных показателей применяли t-критерий Student, а при отсутствии нормального распределения использовали U-критерий Mann-Whitney. Для определения уровня статистической достоверности переменных с малыми выборками применялся точный тест Fisher. Количественные показатели представлены в виде абсолютных значений с указанием процентов. Уровень статистической достоверности принимался значимым при значениях $p < 0,05$. Проведение множественного сравнения параметров проводилось с учётом поправки Holm-Bonferroni.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа результатов применения биомеханической реконструктивной герниопластики все пациенты были разделены на две группы. В первую группу вошли 33 пациента, которым выполнялась

герниопластика с биомеханическим компонентом. Вторую группу составил 41 пациент, которым была выполнена герниопластика без учёта биомеханики передней брюшной стенки. Все пациенты имели сохранный соматический статус, а имеющиеся сопутствующие хронические заболевания были корригированы на догоспитальном этапе. Все показатели на дооперационном этапе имели нормальное распределение. Предоперационные данные опытной и контрольной групп отражены в таблице 1.

Таблица 1. Данные пациентов перед оперативным лечением ПОВГ
Table 1. Patient data before surgical treatment of IH

Параметры	Первая группа (n=33)	Вторая группа (n=41)	p-значение
Возраст, лет	64±5,5	67±6,1	0,62
Индекс массы тела, кг/м²	28,5±3,2	30,2±4,3	0,53
Ширина грыжевых ворот, см	16,2±6,1	15,9±5,7	0,29
Количество пациентов с потерей домена брюшной полости, n	13 (39,4%)	16 (39%)	0,26

Как видно из сравнительного анализа, обе группы не имели статистически значимых отличий по индивидуальным показателям пациентов и грыж живота. Среди пациентов с потерей домена брюшной полости в первой группе средний показатель, рассчитанный по формуле Е. Танака и соавт. [8], составил $35,5 \pm 4,1\%$, а во второй группе – $30,3 \pm 2,6\%$ ($p < 0,0001$).

При выполнении предоперационной КТ-герниоабдоминометрии у пациентов первой группы рассчитывались показатели размеров брюшной полости, длин мышечно-апоневротических структур с обеих сторон от грыжевого дефекта, расстояния истинного дефекта ткани передней брюшной стенки. После проведения расчётов были получены соотношения длин растяжений для каждой стороны передней брюшной стенки, что учитывалось при планировании объёма и техники операции герниопластики. Стоит заметить, что ни в одном случае не были получены симметричные показатели деформаций, а ось биомеханической симметрии для грыжевого дефекта всегда была смещена относительно сагиттальной оси тела. Средний показатель соотношения длин растяжений ($\Delta I1/\Delta I2$) составил $0,724 \pm 0,034$.

Интраоперационно после вскрытия и мобилизации ретромускулярного пространства проводилась оценка растяжимости тканей с каждой стороны от грыжевого дефекта (рис. 5).

При выполнении операции Rives-Stoppa экономно иссекался грыжевой мешок с учётом возможности сопоставления краёв грыжевых ворот с каждой стороны на рассчитанные ранее показатели растяжений (ΔI). При отсутствии аппроксимации принималось решение о расширении объёма диссекции с

выполнением задней сепарации TAR (transversus abdominis release) по Y. Novitsky [11]. В то же время после вскрытия задней стенки влагалищ прямых мышц живота и пересечении поперечной мышцы

живота уровень латеральной диссекции проводился исключительно до достижения необходимого значения растяжения (Δl) (рис. 6).

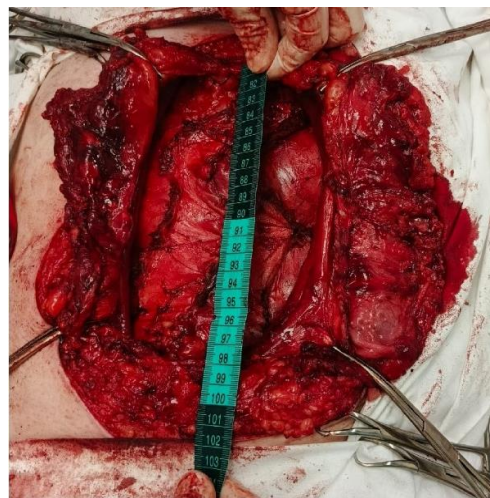
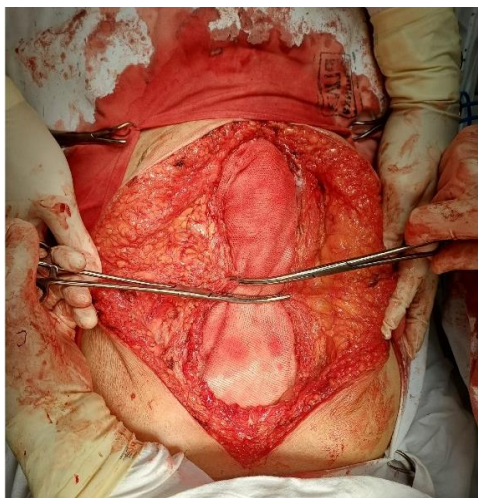


Рисунок 5. Интраоперационное определение натяжения тканей и линии аппроксимации влагалищ прямых мышц живота
Figure 5. Intraoperative determination of tissue tension and the line of approximation of the vaginas of the rectus abdominis muscles

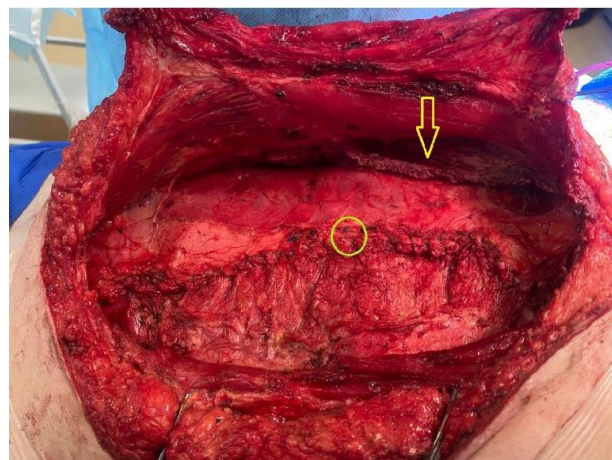
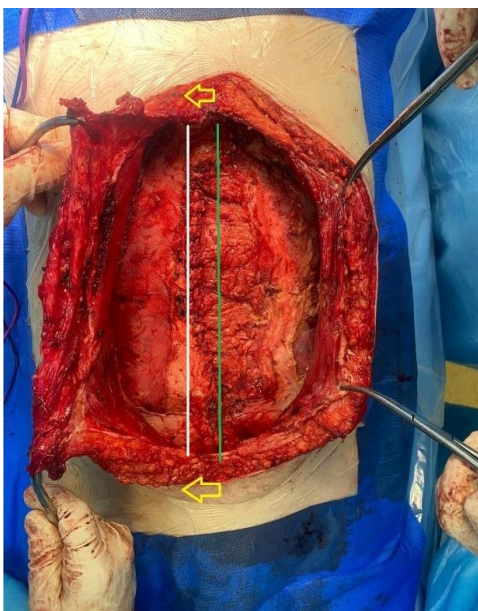


Рисунок 6. Расположение точки аппроксимации относительно срединной линии после выполнения односторонней TAR-сепарации
Figure 6. The location of the approximation point relative to the median line after performing a one-way TAR separation

Окончательный объём герниопластики у пациентов второй группы определялся оперирующим хирургом интраоперационно и зависел от предпочтений, личных «ощущений» врача с учётом оценки клинической ситуации. Интраоперационные результаты обеих групп отражены в таблице 2.

Интраоперационные показатели имели нормальное распределение значений, за исключением объёма кровопотери. Как видно из проведенного анализа, среднее время оперативного вмешательства

в первой группе статистически значительно меньше, чем во второй группе. Данное явление обусловлено статистически значимым меньшим количеством выполненных двусторонних TAR-герниопластик в первой группе. При этом в первой группе также преобладают операции Rives-Stoppa и односторонние TAR-герниопластики, но при сравнении со второй группой статистически значимых отличий не обнаружено. Вследствие уменьшения объёма диссекции сокращается время выполнения

операции, а также её травматизм. Однако статистически значимых отличий по уровню интраоперационной кровопотери получено не было. Стоит также отметить, что в первой группе статистически значимо выше средний показатель потери домена брюшной полости ($p < 0,0001$), в то же время наблюдается большее количество выполненных односторонних TAR-герниопластик, что свидетельствует в пользу выполнения биомеханической реконструкции у пациентов с большими значениями потери домена брюшной полости.

В послеоперационном периоде оценивались ранние хирургические показатели. Средний срок госпитализации в первой группе составил 5 ± 1 день, а во второй группе – 9 ± 2 дня ($p = 0,037$). В первой группе было 2 (6,1%) ранних послеоперационных осложнений, среди которых 1 (3,05%) ретромускулярная гематома передней брюшной стенки, потребовавшая хирургической ревизии (по системе

Clavien-Dindo – III степени), и 1 (3,05%) инфекционное воспаление послеоперационной раны, по поводу которой был проведён курс антибактериальной терапии (по системе Clavien-Dindo – II степени). Во второй группе было зарегистрировано 4 послеоперационных осложнения, среди которых 3 (7,3%) гематомы (по системе Clavien-Dindo – III степени) и 1 (2,4%) инфекционное воспаление послеоперационной раны (по системе Clavien-Dindo – II степени). По послеоперационным показателям наблюдаются отличия между обеими группами, при этом статистически значимо в первой группе меньше средний срок госпитализации ($p = 0,037$). Также в первой группе меньшее количество послеоперационных осложнений, однако данный критерий не имел статистической значимости ($p = 0,682$). Случаев абдоминального компартмент-синдрома не было зарегистрировано ни в одной группе.

Таблица 2. Интраоперационные показатели
Table 2. Intraoperative indicators

Параметры	Первая группа (n=33)	Вторая группа (n=41)	p-значение
Среднее время оперативного вмешательства, минуты	180 ± 30	290 ± 40	$< 0,001$
Объём кровопотери, мл	55 [25; 60]	70 [50; 90]	0,082
Количество операций Rives-Stoppa, n	14 (42,4%)	11 (26,8%)	0,204
Количество односторонних TAR-герниопластик, n	15 (45,5%)	12 (29,3%)	0,163
Количество двусторонних TAR-герниопластик, n	4 (12,1%)	18 (43,9%)	0,003

ОБСУЖДЕНИЕ

Продольное рассечение белой линии живота является «ахиллесовой пятой» срединной лапаротомии, с одной стороны обеспечивающей эффективный и быстрый доступ в брюшную полость, а с другой – нарушающей анатомическую и биомеханическую целостность прямых и боковых мышц живота. Белая линия живота выступает той уникальной областью, где переплетаются сухожильные волокна мышц передней брюшной стенки и формируется зона фиксации влагалищ прямых мышц живота. За счёт переплетения соединительнотканых пучков контрлатеральных сторон формируется дополнительная точка фиксации для мышц, вследствие чего достигается стабильность передней брюшной стенки и её функциональная полноценность [12]. Разрушение белой линии живота приводит к латерализации влагалищ прямых мышц и сокращению боковых мышц, что является закономерным следствием, ведь потеря медиальной точки фиксации неизбежно приведёт к уменьшению длины волокон мышц вследствие их физиологического тонуса. Анатомо-физиологические особенности передней брюшной стенки требуют тщательного и методичного сопоставления краёв апоневроза с целью полного восстановления белой линии живота [13].

Не менее важным аспектом герниопластики, на наш взгляд, является восстановление белой линии живота и создание благоприятных условий в области линии шва для заживления соединительной ткани. Имеются сведения, что отсутствие натяжения тканей при репарации негативно сказывается на функциональной активности фибробластов [14]. Данные клетки перестают адекватно синтезировать коллаген I типа, благодаря чему теряется прочность внеклеточного матрикса и утрачивается механическая целостность рубца [15]. В то же время чрезмерное натяжение в области формирующегося рубца, особенно с преобладанием одной из сторон передней брюшной стенки, может приводить к травматической деформации вплоть до деструкции соединительной ткани. Таким образом, создание благоприятных условий для формирования прочного рубца после герниопластики должно обеспечиваться не только имплантацией сетчатого эндопротеза, но и правильной реконструкцией белой линии живота. Стабильность области линии шва достигается за счёт уравнивания сил натяжения в каждой точке соприкосновения сшиваемых сторон апоневроза. При этом значения модулей сил (напряжений), имеющих противоположное направление, должны быть равны.

Биомеханические реконструкции при вентральных грыжах активно изучаются в ряде исследований крупных учёных и хирургов. В работе Lesch С. и соавт. демонстрируются результаты применения биомеханически рассчитанной герниопластики ПОВГ у 301 пациента в сравнении с результатами традиционных операций протезирующих грыжесечений у 23 220 пациентов. Биомеханическая реконструкция в данном исследовании основана на определении критической прочности передней брюшной стенки после протезирующей герниопластики, рассчитанной с учётом размера грыжевого дефекта, площади и типа имплантируемого сетчатого эндопротеза, прочностных характеристик апоневроза, расположения сетчатого эндопротеза, типа фиксации сетки и используемого шовного материала. Комплексный анализ факторов, влияющих на реконструктивную операцию, позволил авторам определить зависимые переменные, которые могут увеличить прочность и долговечность протезирующей герниопластики. По результатам одногодичного наблюдения авторы установили, что при биомеханической реконструкции передней брюшной стенки наблюдается меньшее количество рецидивов (1,7% против 5,2% в группе контроля, $p=0,0041$), а также снижение частоты встречаемости хронической боли, требующей специфического лечения (4,1% против 12,0% в группе контроля, $p=0,001$). В то же время по количествам осложнений и повторных оперативных вмешательств статистически значимых отличий обнаружено не было [9]. В другом крупном исследовании Nessel R. и соавт. показаны трёхлетние результаты применения биомеханически рассчитанной герниопластики с использованием программного алгоритма HEDI (Hernia Evaluation, Detection, and Imaging) с интегрированным искусственным интеллектом. Использование технологий машинного обучения позволило исследователям определять стабильность тканей передней брюшной стенки и определять области с низкими показателями прочности. Предоперационное КТ-планирование с применением пробы Вальсальвы дополняется анализом искусственного интеллекта зон нестабильности передней брюшной стенки. Результатом применения данного алгоритма предстает «топографическая карта» передней брюшной стенки с грыжевым дефектом. Авторы проанализировали результаты предоперационного планирования с использованием биомеханической реконструкции и моделирования у 198 пациентов с ПОВГ и отметили полезность данной стратегии. Сложные и большие грыжи с потерей домена брюшной полости были успешно оперированы с использованием данного алгоритма в отсутствие применения интраоперационного фасциального вытяжения и предоперационной ботули-

нотерапии. При этом в 82% случаев операции выполнялись открытым способом [16].

Ограничениями настоящего исследования выступают его одноцентровой характер, малый размер выборки, отсутствие рандомизации пациентов, а также непродолжительный срок наблюдения. Но в то же время стоит отметить, что представленная работа демонстрирует первые результаты применения биомеханической реконструктивной герниопластики в клинической практике, которые должны укрепить позиции данной концепции. Принятие того факта, что мышечно-сухожильные элементы передней брюшной стенки являются изотропными телами, выступает вынужденным допущением для создания первичной математической модели и определения её клинической значимости. При этом необходимо дальнейшее изучение механических характеристик тканей живота, что позволит усовершенствовать физико-математическую модель биомеханической реконструкции и повысить её точность. Алгоритм принятия решений в хирургии зачастую не является стандартизированным, а основывается на опыте, личных предпочтениях и особенностях мануальных навыков. Применение биомеханической концепции герниопластики может стать важным инструментом оптимизации хирургической стратегии, ограничивающим чрезмерный объём и травматизм оперативных вмешательств. Выполнение математических расчётов является важным, но достаточно трудоёмким процессом. Будущие исследования в данном направлении должны быть ориентированы на создание компьютерных алгоритмов расчёта параметров биомеханической реконструкции и их программной автоматизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструктивные герниопластики при больших ПОВГ продолжают стремительно развиваться. Несмотря на широкое внедрение синтетических эндопротезов и применение ретромускулярных сепарационных техник имплантации, до сих пор остается актуальным вопрос восстановления белой линии живота и аппроксимации влагалищ прямых мышц. Изучение особенностей биомеханики передней брюшной стенки может позволить улучшить результаты лечения больших и сложных ПОВГ. При этом правильная техника операции грыжесечения должна также базироваться на принципах анатомической и физиологической целостности живота, вследствие чего необходимо учитывать векторы и величину мышечных напряжений контрлатеральных сторон передней брюшной стенки. Представленная в настоящем исследовании биомеханическая реконструкция имеет чёткое математическое и физическое обоснование, а продемонстрированные гео-

метрические модели достаточно точно описывают изменения конфигураций передней брюшной стенки до и после операции. Анализ интра- и послеоперационных данных показал первые удовлетворительные результаты использования данной концепции герниопластики. В дальнейшем необходимо

проведение крупных многоцентровых исследований на больших выборках, что позволит более широко применять принципы биомеханического восстановления передней брюшной стенки в герниологии.

Литература [References]

- 1 Bosanquet D.C., Ansell J., Abdelrahman T., Cornish J., Harries R., Stimpson A., et al. Systematic Review and Meta-Regression of Factors Affecting Midline Incisional Hernia Rates: Analysis of 14,618 Patients. *PLoS One*. 2015 Sep 21;10(9):e0138745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138745>
- 2 Henriksen N.A., Bougard H., Gonçalves M.R., Hope W., Khare R., Shao J., et al. Primary ventral and incisional hernias: comprehensive review. *BJS Open*. 2024 Dec 30;9(1):zrae145. <https://doi.org/10.1093/bjsopen/zrae145>
- 3 Sanders D.L., Pawlak M.M., Simons M.P., Aufenacker T., Balla A., Berger C., et al. Midline incisional hernia guidelines: the European Hernia Society. *Br J Surg*. 2023 Nov 9;110(12):1732-1768. <https://doi.org/10.1093/bjs/znad284>. Erratum in: *Br J Surg*. 2024 Jan 3;111(1):znad349. <https://doi.org/10.1093/bjs/znad349>
- 4 Omar I., Zaimis T., Townsend A., Ismael M., Wilson J., Magee C. Incisional Hernia: A Surgical Complication or Medical Disease? *Cureus*. 2023 Dec 15;15(12):e50568. <https://doi.org/10.7759/cureus.50568>
- 5 Barbosa C.A., Faria M.H.S., Messias B.A. Predictive factors for complexity in abdominal wall hernias: a literature scope review. *Rev Col Bras Cir*. 2024 May 6;51:e20243670. <https://doi.org/10.1590/0100-6991e-20243670-en>
- 6 Harji D., Thomas C., Antoniou S.A., Chandraratan H., Griffiths B., Henniford B.T., et al. A systematic review of outcome reporting in incisional hernia surgery. *BJS Open*. 2021 Mar 5;5(2):zrab006. <https://doi.org/10.1093/bjsopen/zrab006>
- 7 Gandhi J.A., Shinde P.H., Banker A.M., Takalkar Y. Computed tomography for ventral hernia: Need for a standardised reporting format. *J Minim Access Surg*. 2023 Jan-Mar;19(1):175-177. https://doi.org/10.4103/jmas.jmas_34_22
- 8 Tanaka E.Y., Yoo J.H., Rodrigues A.J. Jr, Utiyama E.M., Birolini D., Rasslan S. A computerized tomography scan method for calculating the hernia sac and abdominal cavity volume in complex large incisional hernia with loss of domain. *Hernia*. 2010 Feb;14(1):63-9. <https://doi.org/10.1007/s10029-009-0560-8>
- 9 Lesch C., Nessel R., Adolf D., Hukauf M., Köckerling F., Kallinowski F., et al. STRONGHOLD first-year results of biomechanically calculated abdominal wall repair: a propensity score matching. *Hernia*. 2024 Feb;28(1):63-73. <https://doi.org/10.1007/s10029-023-02897-7>
- 10 Culbertson E.J., Xing L., Wen Y., Franz M.G. Loss of mechanical strain impairs abdominal wall fibroblast proliferation, orientation, and collagen contraction function. *Surgery*. 2011 Sep;150(3):410-7. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2011.06.011>
- 11 Novitsky Y.W., Elliott H.L., Orenstein S.B., Rosen M.J. Transversus abdominis muscle release: a novel approach to posterior component separation during complex abdominal wall reconstruction. *Am J Surg*. 2012 Nov;204(5):709-16. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2012.02.008>
- 12 Gueroult P., Joppin V., Chaumoitte K., Di Bisceglie M., Masson C., Bege T. Linea alba 3D morphometric variability by CT scan exploration. *Hernia*. 2024 Apr;28(2):485-494. <https://doi.org/10.1007/s10029-023-02939-0>
- 13 Hubner P.N.V., Alberti L.R., Carvalho A.C., Soares V.C., Neto C.S., Garcia D.P.C. Morphometric evaluation of the linea alba in fresh corpses. *JPRAS Open*. 2024 Mar 26;40:238-244. <https://doi.org/10.1016/j.jpra.2024.03.005>
- 14 Thankam F.G., Larsen N.K., Varghese A., Bui T.N., Reilly M., Fitzgibbons R.J., et al. Biomarkers and heterogeneous fibroblast phenotype associated with incisional hernia. *Mol Cell Biochem*. 2021 Sep;476(9):3353-3363. <https://doi.org/10.1007/s11010-021-04166-6>
- 15 Thankam F.G., Palanikumar G., Fitzgibbons R.J., Agrawal D.K. Molecular Mechanisms and Potential Therapeutic Targets in Incisional Hernia. *J Surg Res*. 2019 Apr;236:134-143. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.11.037>
- 16 Nessel R., Löffler T., Rinn J., Kallinowski F. Three-year follow-up of the grip concept: an open, prospective, observational registry study on biomechanically calculated abdominal wall repair for complex incisional hernias. *Hernia*. 2024 Jun;28(3):913-924. <https://doi.org/10.1007/s10029-024-03064-2>

Авторская справка

Галимов Олег Владимирович

Д-р мед. наук профессор, заведующий кафедрой хирургических болезней лечебного факультета, Башкирский государственный медицинский университет, Клиника БГМУ.

ORCID 0000-0003-4832-1682; SPIN-код: 8529-5508;

AuthorID: 128022; galimovov@mail.ru

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка, редактирование и окончательное утверждение текста.

Бакеев Марат Радикович

Врач-стажер хирургического отделения Клиники БГМУ, клинический ординатор кафедры хирургических болезней лечебного факультета, Башкирский государственный медицинский университет, Клиника БГМУ.

ORCID 0000-0002-4160-2820; SPIN-код: 6134-0815;

AuthorID: 1209734; m.r.bakeev@bk.ru

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка, подготовка иллюстраций, редактирование текста.

Author's reference

Oleg V. Galimov

Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Surgical Diseases, Medical Faculty, Bashkir State Medical University, Clinic of Bashkir State Medical University.

ORCID 0000-0003-4832-1682; SPIN-код: 8529-5508;

AuthorID: 128022; galimovov@mail.ru

Author's contribution: search and analysis of literature, interpretation of research results, their processing, editing and final approval of the text.

Marat R. Bakeev

Intern Doctor of the Surgery Department, Resident the Department of Surgical Diseases, Medical Faculty, Bashkir State Medical University, Clinic of Bashkir State Medical University.

ORCID 0000-0002-4160-2820; SPIN-код: 6134-0815;

AuthorID: 1209734; m.r.bakeev@bk.ru

Author's contribution: literature search and analysis, interpretation of research results, their processing, preparation of illustrations, text editing.

Ханов Владислав Олегович

Д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры хирургических болезней лечебного факультета, Башкирский государственный медицинский университет, Клиника БГМУ.

ORCID 0000-0002-1880-0968; SPIN-код: 1204-8620;

AuthorID: 661258; khanovv@mail.ru

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка, редактирование текста.

Нагаев Фарит Робертович

Ассистент кафедры общей хирургии с курсами трансплантологии и лучевой диагностики, заведующий хирургическим отделением Клиники БГМУ, Башкирский государственный медицинский университет, Клиника БГМУ.

ORCID 0000-0002-8338-2766; farit.nagaev.85@bk.ru

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка.

Аллаяров Наиль Динисламович

Ассистент кафедры хирургических болезней лечебного факультета, заведующий приемным отделением Клиники БГМУ, Башкирский государственный медицинский университет, Клиника БГМУ.

ORCID 0009-0005-3391-4735; allayarovnd@gmail.com

Вклад автора: интерпретация результатов исследования, их обработка, редактирование текста рукописи.

Vladislav O. Khanov

Dr. Sci. (Med.), Professor the Department of Surgical Diseases, Medical Faculty, Bashkir State Medical University, Clinic of Bashkir State Medical University.

ORCID 0000-0002-1880-0968; SPIN-код: 1204-8620;

AuthorID: 661258; khanovv@mail.ru

Author's contribution: literature search and analysis, interpretation of research results, their processing, text editing.

Farit R. Nagaev

Assistant of the Department of General Surgery, Transplantology and X-ray Diagnostic, Head of the Surgery Department, Bashkir State Medical University, Clinic of Bashkir State Medical University.

ORCID 0000-0002-8338-2766; farit.nagaev.85@bk.ru

Author's contribution: literature search and analysis, interpretation of research results, their processing.

Nail' D. Allayarov

Assistant of the Department of Surgical Diseases, Head of the Emergency Department, Bashkir State Medical University, Clinic of Bashkir State Medical University.

ORCID 0009-0005-3391-4735; allayarovnd@gmail.com.

Author's contribution: interpretation of research results, their processing, text editing.