

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИКСАЦИИ КОСТНЫХ ФРАГМЕНТОВ АППАРАТОМ ВНЕШНЕЙ ФИКСАЦИИ ПРИ ДВУХСТОРОННИХ РОТАЦИОННО-НЕСТАБИЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ТАЗА ТИПА В ПО КЛАССИФИКАЦИИ АО/ASIF

В.Г. Виноградов<sup>1</sup>, В.Л. Лапшин<sup>2</sup>, А.Ю. Красовский<sup>3</sup>, Е.Г. Ангарская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ ВПО «Иркутский государственный медицинский университет» Минздрава России, ректор – д.м.н. профессор И.В. Малов

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, и.о. ректора – профессор А.Д. Афанасьев

<sup>3</sup> Иркутская городская клиническая больница № 3, главный врач – А.И. Кузнецов г. Иркутск

**Цель исследования:** определение стабильности фиксации костных отломков аппаратом внешней фиксации при моделировании двусторонних частично стабильных повреждений таза типа В по классификации АО/ASIF с определением вклада отдельных элементов в стабильность фиксации.

**Материал и методы.** Исследование проводилось на конечно-элементной модели системы «аппарат внешней фиксации – таз», разработанной для программного комплекса MSC Nastran. Формирование перелома лонных и седалищных костей таза в модели осуществлялось путем разрыва в конечно-элементной сетке и уменьшением модуля упругости в подвздошно-крестцовом сочленении с обеих сторон до 35 мм на месте формирования перелома. Нагрузки на модель осуществлялись сверху на тело первого крестцового позвонка с силой 500 Н. Вторая область приложения нагрузки – снизу вверх на крышу вертлужной впадины с силой 250 Н.

В ходе исследования оценивалось влияние отдельных элементов аппаратов внешней фиксации (АВФ) на жесткость фиксации костных отломков. Симметричные элементы удалялись как по отдельности, так и совместно. В результате происходило уменьшение жесткости АВФ и соответствующее увеличение смещения в месте перелома.

**Выводы.** При моделировании частично стабильных повреждений таза, когда имеет место общая ротационная нестабильность в горизонтальной и сагиттальной плоскостях до 35 мм, АВФ обеспечивают высокую стабильность костных фрагментов (до 3 мм) за счет введения костных стержней в крылья подвздошных костей, с обязательным введением стержня в вертикальные ветви лонных костей и усилением передне-нижней штанги между подсистемами. При этом установка передне-верхней штанги и введение костных стержней в тела подвздошных костей не являются обязательными.

**Ключевые слова:** двусторонние частично стабильные повреждения таза, моделирование, аппараты внешней фиксации.

## MODELING OF BONE FRAGMENTS FIXATION WITH AN EXTERNAL FIXATION DEVICE FOR BILATERAL ROTATION UNSTABLE PELVIC INJURIES B TYPE ACCORDING TO AO/ASIF CLASSIFICATION

V.G. Vinogradov<sup>1</sup>, V.L. Lapshin<sup>2</sup>, A.Y. Krasovsky<sup>3</sup>, E.G. Angarskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Medical University, rector – I.V. Malov, MD professor

<sup>2</sup> National Research Irkutsk State Technical University, acting rector – A.D. Afanasiev, professor

<sup>3</sup> Irkutsk City Clinical Hospital N 3, the head doctor – A.I. Kuznetsov

**Objective:** to determine the stability of bone fragments fixation with an external fixation device in the simulation of bilateral partly unstable pelvic injuries of B type according to AO/ASIF classification and to identify the role of different fixation elements in the stability of fixation.

**Material and methods:** the study was performed on the finite element model of a system “an external fixation device – pelvis” developed for a software package MSCNastran. Formation of a fracture of pubic and ischial pelvic bones was accomplished by means of rupture in the finite element network and decrease of elasticity modulus in the ilio-sacral joint on both sides up to 35 mm at the site of a fracture. Loads were carried on top of the body of the first sacral vertebra with a force of 500N. The second area of application of the load was from the bottom-up on the acetabular roof with a force of 250N.

In this study the effect of different elements of an external fixation device on the stiffness of bone fragments fixation was evaluated. Symmetrical elements were removed both separately and together. As a result, the stiffness of a system decreased and the displacement at the fracture site increased.

**Conclusion:** in a model of partly stable pelvic injuries accompanied by general rotation instability in the horizontal and sagittal planes to 35 mm, an external fixation device provided high stability of bone fragments (to 3 mm) due to introduction of bone rods in the iliac wings with the obligatory introduction of the rod in the vertical branches of pubic bones and strengthening the anterior lower bar between the subsystems. What is more, installing the anterior upper bar or introduction of bone rods in the bodies of iliac bone are not necessary.

**Key words:** bilateral partly stable pelvic injuries, modeling, external fixation devices.

Переломы таза относятся к наиболее тяжелым повреждениям опорно-двигательной системы (ОДС) и составляют 5–10% в структуре всех переломов [1, 9, 14]. Одним из наиболее рациональных методов лечения пострадавших является фиксация аппаратами внешней фиксации (АВФ), особенно у пациентов с множественной и сочетанной травмой [3]. Системный подход к чрескостному остеосинтезу подробно освещен в работах многих авторов [2, 10, 11, 16]. Положительными моментами использования АВФ в ранние сроки являются: обезболивание за счет стабилизации костных отломков, уменьшение внутритазового объема, что создает условия для самотампонады поврежденных сосудов, устранение грубых деформаций, профилактика и лечение эмболий.

За последние 10 лет появились работы, касающиеся моделирования АВФ для лечения повреждений костей конечностей [4, 7, 13] и костей таза [6, 12], для оценки биомеханических параметров внутренней и внешней фиксации таза, а также для моделирования введения стержней и построения рамы внешней фиксации [3, 5, 8].

На основании системного подхода к повреждениям таза коллективом авторов Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова разработана концепция нестабильности тазового кольца по амплитуде и направлению смещения костных отломков под воздействием физиологических нагрузок [15].

Однако, на наш взгляд, недостаточно исследованы возможности стабилизации костных отломков в АВФ для достижения возможности использования стержневых аппаратов с минимально необходимым количеством элементов аппарата согласно принципу «необходимого и достаточного».

**Целью исследования** является определение стабильности фиксации костных отломков аппаратом внешней фиксации при моделировании двусторонних частично стабильных повреждений таза типа В по классификации АО/ASIF с определением вклада отдельных элементов на стабильность фиксации.

### Материал и методы

За основу компоновки аппарата взяты наиболее распространенные элементы: костные стержни диаметром 6 мм (stergen 1, 2, 3), стержни для лонных костей (stergen 4) диаметром 5 мм, которые крепятся к секторам (бумерангам). Правая и левая половина аппаратов соединены передне-верхней и передне-нижней штангами (shtanga 1, 2). Костные стержни 1 и 2 введены в гребни подвздошных костей, стержень 3 введен в тело подвздошной кости, стержень 4 введен в вертикальную ветвь лонных костей, сторона (L, R) соответствует рисунку, а не положению тела (рис. 1).

Исследование проводилось на конечно-элементной модели системы «аппарат внешней фиксации – таз», разработанной для программного комплекса MSC Nastran [3].

В качестве конечных элементов (КЭ) использовались: для описания стержневых элементов аппарата внешней фиксации – линейные КЭ; для описания секторов – плоские КЭ постоянной толщины; для описания костных структур – плоские КЭ переменной толщины. Все соединения, как стержневые элементы в костной ткани, так и металлические элементы конструкции между собой, предполагались абсолютно жесткими. В местах переломов предполагалось свободное смещение.

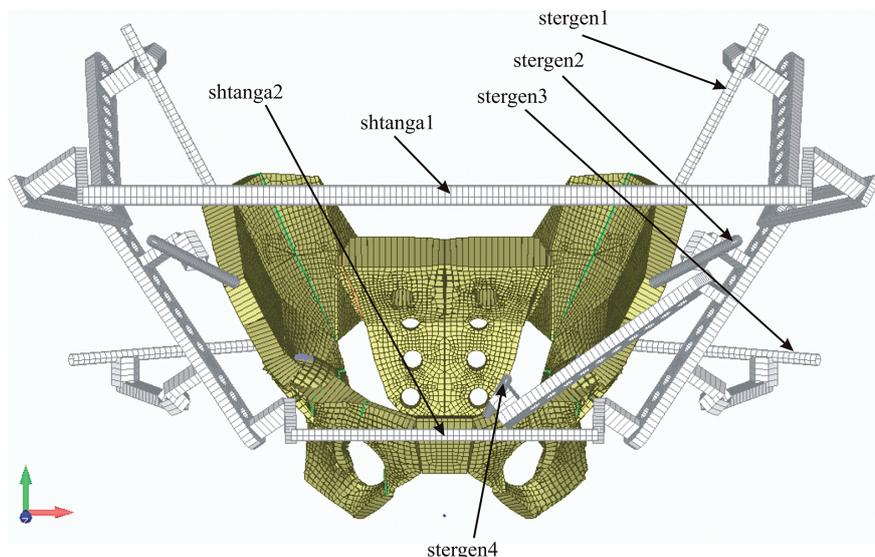


Рис. 1. Обозначение элементов аппарата внешней фиксации

Материал АВФ (сталь) и костная ткань предполагались однородными, изотропными, с модулями упругости для стали  $E=200000$  МПа и для костной ткани  $E=20000$  МПа.

Рассматривался вопрос лечения пострадавших с двусторонними ротационно-нестабильными повреждениями таза тип В (по классификации АО/ASIF), сопровождающимися переломами переднего полукольца и неполным двусторонним разрывом заднего полукольца и диафрагмы таза, при которых имеет место ротационная нестабильность в горизонтальной и сагиттальной плоскостях.

Формирование перелома лонных и седалищных костей таза в модели осуществлялось путем удаления выделенных для этой цели темным цветом конечных элементов и создания разрыва в конечно-элементной сетке (рис. 2).

На модели дополнительная подвижность в местах повреждения таза обеспечивалась путем

уменьшения модуля упругости материала в поврежденной области, что обеспечивало смещение в месте перелома без использования АВФ до 35 мм (при двусторонней закрытой книге). На рисунке 3 представлена ослабленная область модели (конечные элементы выделены белым цветом).

Нагрузки на модель осуществлялись по оси позвоночника сверху вниз на всю плоскость области верхней суставной поверхности тела первого крестцового позвонка с силой 500 Н. Вторая область приложения нагрузки – крыша вертлужной впадины (нагрузки осуществлялись с силой 250 Н). Закрепление всей модели осуществлялось со стороны противоположного тазобедренного сустава.

В качестве примера приводятся результаты расчета смещения по осям X – вертикальное направление, Y – сагиттальное направление, Z – фронтальное направление (рис. 4).

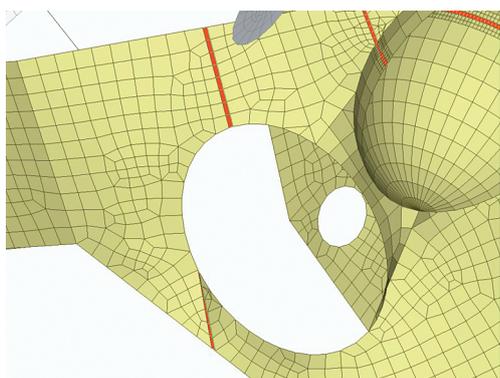


Рис. 2. Место перелома лонной и седалищной костей

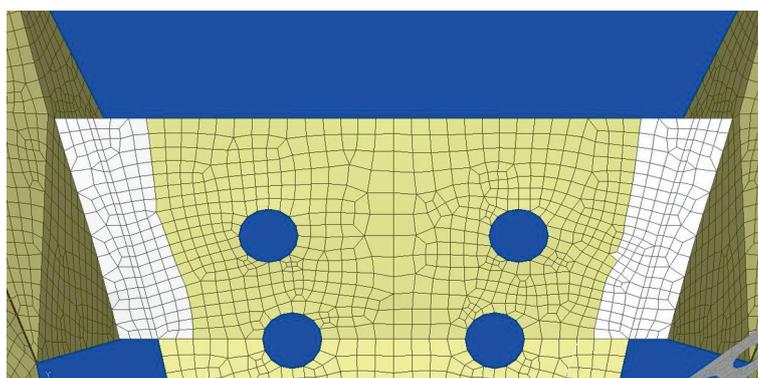


Рис. 3. Ослабленная область подвздошно-крестцовых сочленений

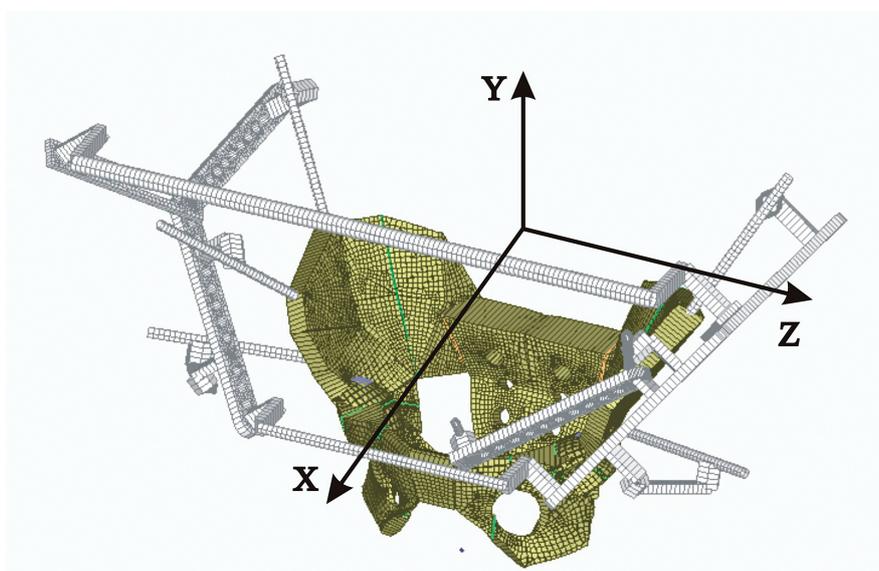


Рис. 4. Оси смещения костных фрагментов

В ходе исследования оценивалось влияние отдельных элементов АВФ на общую жесткость системы. Были исследованы различные конструктивные варианты АВФ, отличающиеся друг от друга отсутствием тех или иных конструктивных элементов. При этом симметричные элементы удалялись как по отдельности, так и совместно. В результате происходило уменьшение жесткости АВФ и соответствующее увеличение смещения в месте перелома.

Определение полного пространственного смещения между верхними краями лонных костей на месте перелома – узлы 42-21491 – показано на рисунке 5.

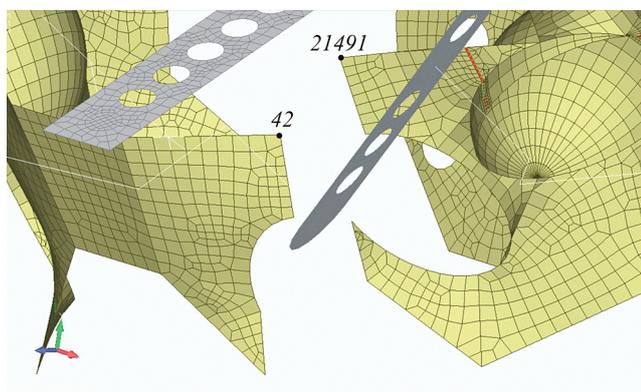


Рис. 5. Смещение в месте перелома

### Результаты

На рисунке 6 представлена диаграмма смещений в месте перелома, на которой показано увеличение смещения в результате удаления

из АВФ отдельных элементов и всего аппарата. Приняты следующие обозначения: исходный АВФ – АВФ в полной компоновке; без АВФ; без shtanga 1 – отсутствует элемент shtanga 1; без shtanga 2 – отсутствует элемент shtanga 2; без sterген 1s – отсутствуют симметрично расположенные элементы sterген 1; без sterген 2s – отсутствуют симметрично расположенные элементы sterген 2; без sterген 3(L) – отсутствует левый элемент sterген 3; без sterген 3(R) – отсутствует правый элемент sterген 3; без sterген 3s – отсутствуют симметрично расположенные элементы sterген 3; без sterген 4 – отсутствует элемент sterген 4.

При анализе диаграммы необходимо отметить, что при введении параметров встречной нагрузки 750 Н со смещенным центром, полное смещение в месте перелома соответствует 33,8 мм вместо 35 мм. При комплектации АВФ по описанной методике смещение костных фрагментов в месте перелома составляет 3 мм, наиболее выражено по оси Z, что соответствует горизонтальной оси. Потеря 1,2 мм смещения от заданного смещения объясняется дополнительной жесткой фиксацией с противоположной стороны от линии перелома костей переднего полукольца.

При более подробном анализе увеличения полного смещения в месте перелома отмечено, что первостепенное влияние на жесткость фиксации костных фрагментов имеют элементы sterген 4 (3,6 мм) и shtanga 2 (2,9 мм). Самую незначительную роль играют элементы shtanga 1 (0,5 мм) и sterген 3 (0,75 мм), особенно левый (L) (рис. 7).

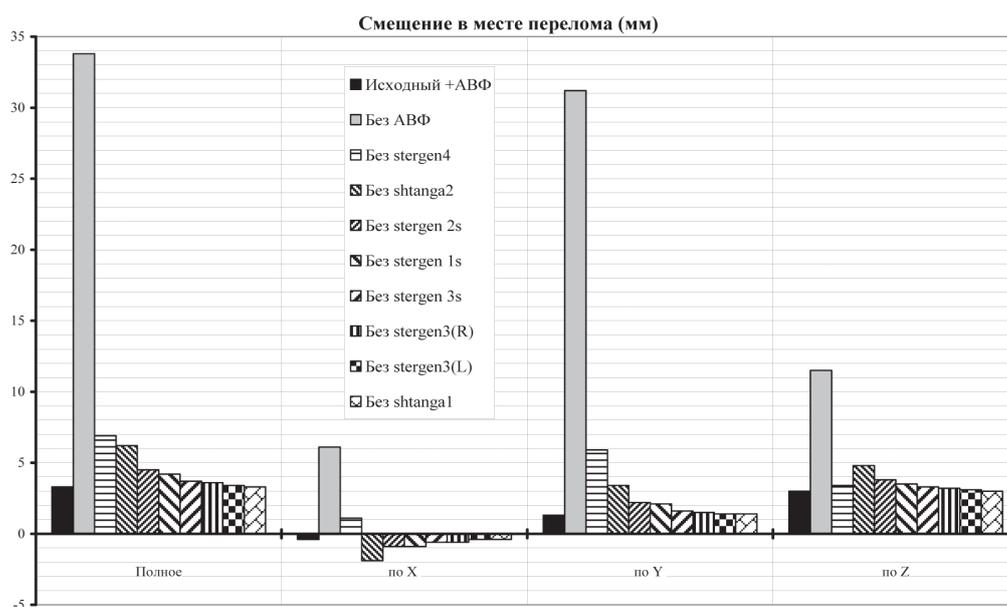


Рис. 6. Смещения в месте перелома в результате удаления отдельных элементов и всего АВФ

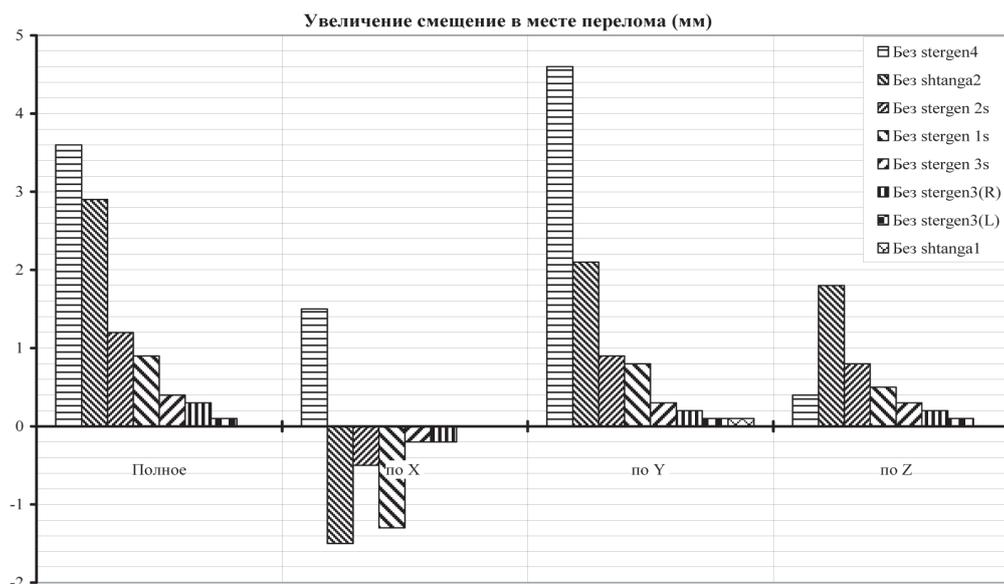


Рис.7. Увеличение смещений в месте перелома

Таким образом, для увеличения жесткости АВФ в первую очередь целесообразно устанавливать элементы stergen 4 и усилить shtanga 2, а для облегчения АВФ в первую очередь целесообразно ослаблять (или убирать совсем) элементы shtanga 1 и stergen 3, если не учитывать лизис костной ткани в послеоперационном периоде.

Аналогичная картина смещения наблюдается по оси Y. По оси X первостепенное влияние на жесткость имеют элементы stergen 4, shtanga 2 и stergen 1, по оси Z - shtanga 2 и stergen 2.

### Выводы

1. Созданная модель двусторонних ротационно-нестабильных повреждений таза тип В (по АО/ASIF), при которых имеет место ротационная нестабильность в горизонтальной и сагиттальной плоскостях до 35 мм из положения двусторонней закрытой книги, обеспечивает необходимые условия для изучения жесткости фиксации костных фрагментов АВФ с нагрузкой 750 Н.

2. Высокая стабильность костных фрагментов (в пределах 3 мм) обеспечивается стандартным введением костных стержней в крылья подвздошных костей с обязательным введением костного стержня в вертикальную ветвь лонной кости и усилением передне-нижней штанги между подсистемами.

### Литература

1. Багненко С.Ф., Шапот Ю.Б., Бесаев Г.М., Тания С.Ш., Багдасарьянец В.Г., Джусоев И.Г. Особенности травматологического пособия у пострадавших с сочетанной травмой таза в условиях травмоцентров. В

кн.: Сборник тезисов IX съезда травматологов-ортопедов. Саратов; 2010. т.1. с. 83-84.

Bagnenko S.F., Shapot Yu.B., Besaev G.M., Tania S.S., Bagdasaryanets V.G., Dzhusoev I.G. Osobennosti travmatologicheskogo posobiya u postradavshikh s sochetannoy travmoy taza v usloviyakh travmotsentrov [Features of traumatologic assistance in patients with combined trauma of the pelvis in conditions of trauma centres]. V kn.: Sbornik tezisov IKH s'yezda travmatologov-ortopedov. Saratov; 2010. t.1. s. 83-84.

2. Борозда И.В. Комплексная диагностика сочетанных повреждений таза, проектирование и управление конструкциями внешней фиксации [дис. ... д-ра мед. наук]. Якутск: Амурская ГМА; 2009. Borozda I.V. Kompleksnaya diagnostika sochetannykh povrezhdeniy taza, proyektirovaniye i upravleniye konstrukttsiyami vneshney fiksatsii [Complex diagnostics of combined injuries of the pelvis, design and management for external fixation hardware][dis. ... d-ra med. nauk]. Yakutsk: Amurskaya GMA; 2009.
3. Виноградов В.Г., Лапшин В.Л., Красовский А.Ю. Системный подход к изучению влияния напряженно-деформированного состояния аппарата внешней фиксации на стабильность костных отломков при лечении переломов костей таза. Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2011;(4-1):238-241. Vinogradov V.G., Lapshin V.L., Krasovskii A.Y. Sistemnyy podkhod k izucheniyu vliyaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya apparata vneshney fiksatsii na stabil'nost' kostnykh otlomkov pri lechenii perelomov kostey taza [Systematic approach to the study of the influence of the stress-strain state of the external fixator on the stability of bone fragments in the treatment of pelvic fractures]. Byulleten' VSNTS SO RAMN. 2011;(4-1):238-241.
4. Виноградов В.Г., Агафонов Н.Е. Влияние стабильности аппарата внешней фиксации на исходы лечения открытых переломов костей голени. Бюллетень

- ВСНЦ СО РАМН. 2011;(4-1):242-245.  
 Vinogradov V.G., Agafonov N.E. *Vliyaniye stabil'nosti apparata vneshney fiksatsii na iskhody lecheniya otkrytykh perelomov kostey goleni [The effect of external apparatus stability on the outcomes of open tibial fractures treatment]. Byulleten' VSNTS SO RAMN. 2011;(4-1):242-245.*
5. Гришук А.Н., Пусева М.Э., Тишков Н.В. Определение жесткости чрескостных элементов из стандартного набора Илизарова, используемых для фиксации фрагментов тазового кольца. Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2008;(1):64-70.  
 Grischuk A.N., Puseva M.E., Tishkov N.V. *Opredeleniye zhestkosti chreskostnykh elementov iz standartnogo nabora Ilizarova, ispol'zuyemykh dlya fiksatsii fragmentov tazovogo kol'tsa [Determination of stiffness transosseous elements of a standard Ilizarov set used for fixation of fragments of the pelvic ring]. Byulleten' VSNTS SO RAMN. 2008; (1):64-70.*
  6. Истомин А.Г. Восстановление стабильности таза при повреждениях и заболеваниях крестцово-подвздошных суставов [автореф. дис. ... д-ра мед. наук]. Харьков: Харьковский ГМУ; 2001.  
 Istomin A.G. *Vosstanovleniye stabil'nosti taza pri povrezhdeniyakh i zabolevaniyakh kresttsovo-podvzdoshnykh sustavov [The restoring stability of the pelvis at injuries and diseases of the sacroiliac joints avtoref. [dis. ... d-ra med. nauk]. Khar'kov: Khar'kovskiy GMU; 2001.*
  7. Кобелев И.А., Виноградов В.Г. Компьютерное моделирование и конструирование стержневого аппарата для остеосинтеза внесуставных переломов проксимального отдела бедренной кости. Врач-аспирант. 2012; 50(1.3):418-423.  
 Kobelev I.A., Vinogradov V.G. *Komp'yuternoye modelirovaniye i konstruirovaniye sterzhneвого apparata dlya osteosinteza vnesustavnykh perelomov proksimal'nogo otдела bedrennoy kosti [Computer simulation and design of a rod device for osteosynthesis of extra-articular fractures of the proximal femur]. Vrach-aspirant. 2012; 50(1.3):418-423.*
  8. Лобанов Г.В. Чрескостный остеосинтез нестабильных повреждений таза [автореф. дис... д-ра мед. наук]. Киев: Академия мед. наук Украины; 2001.  
 Lobanov G.V. *Chreskostnyy osteosintez nestabil'nykh povrezhdeniy taza [External fixation of unstable pelvic injuries ] [avtoref. dis... d-ra med. nauk]. Kiev: Akademiya med. nauk Ukrainy; 2001.*
  9. Нагога А.Г., Труханова И.Г., Измайлов Е.П., Карпушин Д.В., Безруков А.Е. Раннее оперативное лечение переломов костей таза в условиях травматологического отделения многопрофильной хирургической больницы. В кн.: Сборник тезисов IX съезда травматологов-ортопедов. Саратов; 2010. с. 210-211.  
 Nagoga A.G., Trukhanova I.G., Izmaylov E.P., Karpushin D.V., Bezrukov A.E. *Ranneye operativnoye lecheniye perelomov kostey taza v usloviyakh travmatologicheskogo otdeleniya mnogoprofil'noy khirurgicheskoy bol'nitsy [Early operative treatment of fractures of the pelvis in multidisciplinary surgical trauma unit of the hospital]. V kn.: Sbornik tezisov IKN s»yezda travmatologov-ortopedov. Saratov; 2010. s. 210-211.*
  10. Пичхадзе И.М., Кузьменков К.А. и др. Техническое описание аппарата Пичхадзе для монополярной и полиполярной фиксации костных фрагментов длинных костей и костей таза В кн.: Сборник тезисов всероссийской науч.-практ. конф., посвящ. памяти профессора К.М. Сиваша. М.; 2005. с. 284-286.  
 Pichkhadze I.M., Kuz'menkov K.A. i dr. *Tekhnicheskoye opisaniye apparata Pichkhadze dlya monopolyarnoy i polipolyarnoy fiksatsii kosnykh fragmentov dlinnykh kostey i kostey taza [Technical description of Pichkhadze apparatus for monopolar and polipolar fixation of long bones and pelvic bones fragments]. V kn.: Sbornik tezisov vserossiyskoy nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati professora K.M. Sivasha. M.; 2005. s. 284-286.*
  11. Пичхадзе И.М., Гаврюшенко К.С., Доржиев Ч.С., Огарев К.В. Экспе — риментальное исследование нестабильности таза при различных видах его повреждений. Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2007; (3):36-43.  
 Pichkhadze I.M., Gavryushenko K.S., Dorzhiyev Ch.S., Ogarev K.V. *Eksperimental'noye issledovaniye nestabil'nosti taza pri razlichnykh vidakh yego povrezhdeniy [Experimental study of pelvic instability for different types of damages]. Vestnik travmatologii i ortopedii im. N.N. Priorova. 2007; (3):36-43.*
  12. Серов М.А. Математическое моделирование тазового кольца и конст — рукции фиксирующего устройства незамкнутого типа [автореф. дис. ... канд. мед. наук]. Благовещенск: Амурский гос. университет; 2004.  
 Serov M.A. *Matematicheskoye modelirovaniye tazovogo kol'tsa i konstruksii fiksiruyushchego ustroystva nezamknutogo tipa [Mathematical modeling of the pelvic ring and the fixation device open type] [avtoref. dis. ... kand. med. nauk]. Blagoveshchensk: Amurskiy gos. universitet; 2004.*
  13. Халиман Е.А., Виноградов В.Г., Лапшин В.Л., Ивлев Б.В. Исследование жесткости стержневых аппаратов внешней фиксации на основе математической модели. Сибирский медицинский журнал. 2011; 106(7): 46-49.  
 Khaliman E.A., Vinogradov V.G., Lapshin V.L., Ivlev B.V. *Issledovaniye zhestkosti sterzhnevyykh apparatov vneshney fiksatsii na osnove matematicheskoy modeli [Study of rod external fixation devices stiffness based on a mathematical model]. Sibirskiy meditsinskiy zhurnal. 2011; 106(7): 46-49.*
  14. Черкес-Заде Д.И. Лечение повреждений таза и их последствий. М.: Медицина; 2006. 192 с.  
 Cherkes-Zade D.I. *Lecheniye povrezhdeniy taza i ikh posledstviy [Treatment of pelvic injuries and its consequences]. M.: Meditsina; 2006. 192 s.*
  15. Шаповалов В.М., Гуманенко Е.К., Дулаев А.К. и др. Хирургическая стабилизация таза у раненных и пострадавших. СПб.: МОРСАР; 2000. 240 с.  
 Shapovalov V.M., Gumanenko E.K., Dulayev A.K. i dr. *Khirurgicheskaya stabilizatsiya taza u ranennykh i dr. Khirurgicheskaya stabilizatsiya taza u ranennykh*

*i posttradavshikh [Surgical stabilization of pelvis in wounded and injured]. SPb.: MORSAR; 2000. 240 s.*

16. Шлыков И.Л. Оперативное лечение больных с последствиями поврежд—дений тазового кольца [автореф. дис. канд. мед. наук]. Екатеринбург: Уральский НИИ травматологии и ортопедии; 2004.

*Shlykov I.L. Operativnoye lecheniye bol'nykh s posledstviyami povrezhdeniy tazovogo kol'tsa [Surgical treatment of patients with consequences of the pelvic ring injuries][avtoref. diss. kand. med. nauk]. Ekaterinburg: Ural'skiy NII travmatologii i ortopedii; 2004.*

---

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Виноградов Валентин Георгиевич** – заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и ВПХ Иркутского государственного медицинского университета; *Vinogradov Valentin G.* – the head of the department of traumatology, orthopaedics and military field surgery, Irkutsk State Medical University; e-mail: vinogradov.travma@gmail.com

**Лапшин Владимир Леонидович** – заведующий кафедрой сопротивления металлов Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета; *Lapshin Vladimir L.* – the head of strength of materials department, National Research Irkutsk State Technical University; e-mail: lapshin@istu.ru

**Красовский Алексей Юрьевич** – заведующий отделением травматологии №2 Иркутской городской клинической больницы №3; *Krasovskiy Aleksey Yu.* – the head of the casualty department N 2 of Irkutsk City Clinical Hospital N 3; e-mail: ksad1971@yandex.ru

**Ангарская Екатерина Геннадьевна** – ассистент кафедры травматологии, ортопедии и ВПХ Иркутского государственного медицинского университета; *Angarskaya Ekaterina G.* – assistant of the department of traumatology, orthopaedics and military field surgery, Irkutsk State Medical University; e-mail: yekaterina.angarskaja@yandex.ru

Рукопись поступила 03.02.2014