

Oxford: William Andrew Publishing, 2012; p. 81–92. DOI: 10.1016/B978-1-4377-4463-7.10007–7

32. Wenz LM, Merritt K, Brown SA, et al. *In vitro* biocompatibility of polyetheretherketone and polysulfone composites. *J Biomed Mater Res.* 1990; 24 (2): 207–15. DOI: 10.1002/jbm.820240207

33. Kurtz SM, Devine JN. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials.* 2007; 28 (32): 4845–69. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2007.07.013

34. Toth JM, Wang M, Estes BT, et al. Polyetheretherketone as a biomaterial for spinal applications. *Biomaterials.* 2006; 27 (3): 324–34. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2005.07.011

35. Yoon BJ, Xavier F, Walker BR, et al. Optimizing surface characteristics for cell adhesion and proliferation on titanium plasma spray coatings on polyetheretherketone. *Spine J.* 2016; 16 (10): 1238–43. DOI: 10.1016/j.spinee.2016.05.017

36. Assem Y, Mobbs RJ, Pelletier MH, et al. Radiological and clinical outcomes of novel Ti/PEEK combined spinal fusion cages: A systematic review and preclinical evaluation. *Eur Spine J.* 2017; 26 (3): 593–605. DOI: 10.1007/s00586-015-4353-8

37. Dimar JR 2nd, Glassman SD, Burkus JK, et al. Two-year fusion and clinical outcomes in 224 patients treated with a single-level instrumented posterolateral fusion with iliac crest bone graft. *Spine J.* 2009; 9 (11): 880–5. DOI: 10.1016/j.spinee.2009.03.013

38. Smit TH, Engels TA, Wuisman PI, et al. Time-dependent mechanical strength of 70/30 Poly (L, DL-lactide): Shedding light on the premature failure of degradable spinal cages. *Spine (Phila Pa 1976).* 2008; 33 (1): 14–8. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31815e39df

39. Cheng BC, Jaffee S, Averick S, et al. A comparative study of three biomaterials in an ovine bone defect model. *Spine J.* 2020; 20 (3): 457–64. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.10.003

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 22.11.2024.
The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 22.11.2024.

Информация об авторах:

Станислав Дмитриевич Шувалов — врач-нейрохирург нейрохирургического отделения Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, i@shuvalovstan.ru, ORCID 0000-0002-8095-9398; **Владимир Сергеевич Толкачев** — врач-нейрохирург нейрохирургического отделения Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, vladimir.tolkachev@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6580-4403; **Сергей Петрович Бажанов** — начальник отдела инновационных проектов в нейрохирургии и вертебологии Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доктор медицинских наук, baj.s@mail.ru, ORCID 0000-0001-9474-9095; **Алексей Евгеньевич Шульга** — старший научный сотрудник отдела инновационных проектов в нейрохирургии и вертебологии Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, кандидат медицинских наук, doc.shulga@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8476-0231; **Владимир Владимирович Островский** — директор Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доктор медицинских наук, ostrw@mail.ru, ORCID 0000-0002-8602-2715; **Владимир Юрьевич Ульянов** — заместитель директора по научной и инновационной деятельности Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доцент, доктор медицинских наук, v.u.ulyanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-9466-8348.

Information about the authors:

Stanislav D. Shuvalov — Neurosurgeon of the Neurosurgery Division of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, shuvalov.stan@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8095-9398; **Vladimir S. Tolkachev** — Neurosurgeon of the Neurosurgery Division of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, vladimir.tolkachev@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6580-4403; **Sergey P. Bazhanov** — Head of the Department of Innovative Projects for Neurosurgery and Vertebrology of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, DSc, baj.s@mail.ru, ORCID 0000-0001-9474-9095; **Alexey E. Shulga** — Senior Researcher of the Division of Innovative Projects in Neurosurgery and Vertebrology of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, PhD, doc.shulga@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8476-0231; **Vladimir V. Ostrovskij** — Director of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, DSc, sarniito@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8602-2715; **Vladimir Yu. Ulyanov** — Deputy Director for Scientific and Innovations of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, Associate Professor, DSc, v.u.ulyanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-9466-8348.

УДК 616-089.28/.29

EDN: GNGUSU

<https://doi.org/10.15275/ssmj395>

Оригинальная статья

ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА НАТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ И ОПОРНОГО СПОНДИЛОДЕЗА ГРУДНОГО И ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛОВ ПОЗВОНОЧНИКА

А. Е. Шульга, Ю. Ю. Рожкова, В. Ю. Ульянов, С. Д. Шувалов, В. С. Толкачев, С. П. Бажанов, В. В. Островский
ФГБОУ ВО «Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского» Минздрава России, Саратов, Россия

DEFORMATIONAL AND STRENGTH PROPERTIES OF FULL-SCALE MODELS OF TRANSPEDICULAR FIXATION AND SUPPORTIVE SPINAL FUSION IN THORACIC AND LUMBAR REGIONS

A. E. Shulga, Yu. Yu. Rozhkova, V. Yu. Ulyanov, S. D. Shuvalov, V. S. Tolkachev, S. P. Bazhanov, V. V. Ostrovskij
Saratov State Medical University, Saratov, Russia

Для цитирования: Шульга А.Е., Рожкова Ю.Ю., Ульянов В.Ю., Шувалов С.Д., Толкачев В.С., Бажанов С.П., Островский В.В. Деформативно-прочностные свойства натуральных моделей транспедикулярной фиксации и опорного спондилодеза грудного и поясничного отделов позвоночника. Саратовский научно-медицинский журнал. 2024; 20 (4): 395–401. EDN: GNGUSU. <https://doi.org/10.15275/ssmj395>.

Аннотация. Цель: оценить устойчивость к статической нагрузке различных вариантов фиксации грудного и поясничного отделов позвоночника. Материал и методы. На анатомических препаратах грудного и поясничного отделов позвоночника свиней произведено моделирование оскольчатого перелома позвонка типа А4

(AOSpine, 2013) в середине анатомического блока и 4 наиболее применяемых типов металлофиксации, изучены их деформативно-прочностные свойства в условиях контролируемой осевой компрессии, в том числе максимальные нагрузки и напряжение. **Результаты.** Обнаружены нарастающие различия величин медианных значений максимальных нагрузок (Н) и напряжений (МПа) при контролируемой осевой компрессии в моделях 4- (2980 Н, 7,18 МПа) и 8-винтовой (4240 Н, 9,78 МПа) транспедикулярной фиксации, 4- (6460Н, 15,27 МПа) и 8-винтовой (10120 Н, 103,21 МПа) транспедикулярной фиксации и опорного спондилодеза, приводящие к аксиальной деформации и/или разрушению узлов металлоконструкций, а также разрушению костных структур позвонков. **Заключение.** Наибольшей устойчивостью в условиях контролируемой осевой компрессии обладает модель 8-винтовой транспедикулярной фиксации и опорного спондилодеза, при которой все узлы металлоконструкции остаются стабильными, а костные структуры позвонков — сохранными.

Ключевые слова: биомеханика, натурные модели, транспедикулярная фиксация, опорный спондилодез, позвоночник

For citation: Shulga AE, Rozhkova YuYu, Ulyanov VYu, Shuvalov SD, Tolkachev VS, Bazhanov SP, Ostrovskij VV. Deformational and strength properties of full-scale models of transpedicular fixation and supportive spinal fusion in thoracic and lumbar regions. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2024; 20 (4): 395–401. (In Russ.) EDN: GNGUSU. <https://doi.org/10.15275/ssmj395>.

Abstract. *Objective:* the evaluation of stability for various options of thoracic and lumbar spine fixation in static load. *Material and methods.* We used the anatomical preparations of the thoracic and lumbar porcine spines to model comminuted vertebra fractures A4 (AOSpine, 2013) in the middle of the anatomical block. The models were later used to install 4 most common types of metal fixation, and to study their deformation-strength properties in controlled axial compression, including maximum load and stress. *Results.* The increasing differences in the median values of maximum loads (H) and stresses (MPa) were found at controlled axial compression in models of 4-screw (2980 H, 7.18 MPa) and 8-screw (4240 H, 9.78 MPa) transpedicular fixation, 4-screw (6460H, 15.27 MPa) and 8-screw (10120 H, 103.21 MPa) transpedicular fixation and supporting spinal fusion, leading to axial deformation and/or destruction of metal structures, as well as destruction of the vertebrae bone structures. *Conclusion.* The model of 8-screw transpedicular fixation and supporting spinal fusion has the greatest stability in controlled axial compression; all its nodes in the metal structure remain stable and the bone structures of the vertebrae are preserved.

Keywords: biomechanics, full-scale models, transpedicular fixation, supporting spinal fusion, spine

Введение. Травма позвоночника относится к категории тяжелых повреждений опорно-двигательной системы. На грудной и поясничный отделы позвоночника суммарно приходится около 75% случаев переломов [1, 2]. В настоящее время показания к хирургическому лечению пострадавших с травмой грудных и поясничных позвонков максимально расширены, вмешательства выполняются при всех типах повреждений. Наряду с увеличением хирургической активности отмечается неуклонный рост количества осложнений, связанных с потерей коррекции. В частности, при методике транспедикулярной фиксации частота вторичных деформаций достигает 16% [3, 4]. Большинство авторов связывают данный вид осложнений с субъективным подходом к планированию тактики первичного вмешательства как следствие недостатка теоретических знаний в области биомеханики позвоночного столба в норме и при патологии [5–7].

Одной из основных причин развития вторичных деформаций является неадекватная оценка типа повреждения и возможностей систем для дорзальной фиксации позвоночника. Учитывая тот факт, что процессы консолидации поврежденных позвонков часто протекают замедленно и неполноценно, системы для задней стабилизации подвергаются чрезмерной нагрузке. Вентральный опорный спондилодез стал решением проблемы усталостных переломов металлоконструкций, тем не менее при использовании данной методики в отсроченном порядке нередко резецируется уже консолидированное тело позвонка [8, 9]. В существующих документах, регламентирующих деятельность хирурга при острой травме грудных и поясничных позвонков, рекомендуется с целью профилактики потери коррекции выполнять передний опорный спондилодез в случаях, когда не удалось восстановить форму позвонка за счет

инструментальной репозиции [10, 11]. Однако в данных документах не учитывается риск нестабильности конструкции до наступления полноценного сращения тела реклинированного позвонка. Планирование первичного хирургического лечения данной категории больных должно базироваться в том числе на прогнозировании устойчивости к осевым нагрузкам у конкретного пациента.

Таким образом, в современной хирургической практике применяются системы стабилизации позвоночника с принципиально разными подходами к реализации основной задачи (сегментарный блок). Выживаемость этих металлоконструкций в условиях осевых нагрузок неоднозначна. В связи с этим актуальным представляется исследование деформативно-прочностных характеристик основных типов металлофиксации грудного и поясничного отделов позвоночника, которое позволит установить для каждого из них пороги предельных осевых нагрузок и провести сравнительный анализ. Кроме того, большой интерес представляют особенности деформации изучаемых моделей в условиях максимального напряжения и выявление критических точек фиксации.

Цель — оценить устойчивость к статической нагрузке различных вариантов фиксации грудного и поясничного отделов позвоночника.

Материал и методы. Объектом исследования явились скелетированные механическим способом и нефиксированные (нативные) анатомические препараты позвоночного столба, полученные после снятия кожи и шпика вдоль всей длины хребтовой части туш 16 здоровых свиней-хрячков нормальной упитанности 6-й категории, класса Е (в соответствии с ГОСТ 31476–2012 «Свиньи для убоя. Свинина в тушах и полутушах. Технические условия», дата введения 01.07.2013) — некастрированных нелинейных самцов-свиней (живая масса не более 60 кг, толщина шпика над остистыми отростками между Th₆–Th₇ позвонками, не считая толщины кожи, не менее

Сравнительный анализ значений показателей максимальных нагрузки и напряжения при различных вариантах сборки систем для фиксации и стабилизации позвоночно-двигательных сегментов, $Me [Q_{25}; Q_{75}]$

Изучаемый показатель, ед. изм.	Вариант сборки систем для фиксации и стабилизации позвоночно-двигательных сегментов			
	транспедикулярная фиксация		транспедикулярная фиксация с опорным спондилодезом	
	4-винтовая, $n=16$	8-винтовая, $n=8$	4-винтовая, $n=16$	8-винтовая, $n=8$
Нагрузка (max), Н	2980 [2753; 3026]	4240 [4007; 4356]; $p_1=0,004$	6460 [6745; 6623]	10120 [9875; 10247]; $p_2=0,001$
Напряжение (max), МПа	7,18 [6,43; 7,54]	9,78 [8,54; 10,21]; $p_1=0,006$	15,27 [14,68; 17,43]	103,21 [97,24; 117,32]; $p_2=0,001$

Примечание. Показатель достоверности: p_1 (двусторонний) — по сравнению с вариантом 4-винтовой транспедикулярной фиксации; p_2 (двусторонний) — по сравнению с вариантом 4-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом.

1 см). Свиные туши приобретены в розничной торговой сети в упаковке, последние были подвергнуты охлаждению (подвесом) с параметрами воздуха в камере хранения от -1 до 0°C и относительной влажности 85% до температуры в толще мышц от 0 до 4°C , имели неувлажненную поверхность и корочку подсыхания. Свиная имела ветеринарные и товароведческие клейма. Срок годности, включая транспортирование, не превышал 12 сут.

Системы для фиксации и стабилизации позвоночно-двигательных сегментов включали 4 варианта сборки: система 4-винтовой транспедикулярной фиксации, состоящая из 4 моноаксиальных винтов, 4 гаек и 2 стержней (первый), 8-винтовой транспедикулярной фиксации, состоящая из 8 моноаксиальных винтов, 8 гаек и 2 стержней (второй), система 4-винтовой транспедикулярной фиксации и опорного спондилодеза, состоящая из 4 моноаксиальных винтов, 4 гаек, 2 стержней и сетчатого эндофиксатора (третий), система 8-винтовой транспедикулярной фиксации и опорного спондилодеза, состоящая из 8 моноаксиальных винтов, 8 гаек, 2 стержней и сетчатого эндофиксатора (четвертый).

Объективность эксперимента и правомочность дальнейшего использования полученных показателей во многом определялись сопоставимостью механических свойств костной ткани позвонков свиньи и человека. Принимая во внимание данный факт, предварительно были проанализированы 16 образцов костной ткани позвонков свиней-хрячков (образцы сравнения) и 16 контрольных образцов костной ткани позвонков человека, полученных в качестве операционного материала при наличии протокола добровольного информированного согласия пациентов, перенесших операции на грудном или поясничном отделах позвоночника, сопровождающихся резекцией тела/тел позвонков.

Для стендового исследования устойчивости к статической нагрузке различных вариантов фиксации грудного и поясничного отделов позвоночника использованы анатомические блоки позвоночного столба свиней-хрячков с полностью сохраненными дисками и связочными структурами. Производили моделирование оскольчатого перелома позвонка типа A4 (AOSpine, 2013) с помощью долота в середине анатомического блока.

Изучали деформативно-прочностные свойства систем «анатомический блок — металлоконструкция» в дублях (по 8–16 штук исходя из принципа анатомической дозованности) на моделях 4- и 8-винтовой транспедикулярной фиксации; 4- и 8-винтовой

вентральной фиксации с опорным спондилодезом в условиях контролируемой осевой компрессии, определяя максимальную нагрузку и напряжение методом сжатия на универсальной электромеханической двухзонной разрывной испытательной машине серии ИР 5082–100 в напольном исполнении (внесена в Госреестр под номером 50109–12) при скорости перемещения рабочей траверсы 2 мм/мин.

Лучевые исследования вариантов моделей фиксации и стабилизации позвоночно-двигательных сегментов после приложения осевой нагрузки выполняли с помощью компьютерного томографа Aquilion 64 с принадлежностями производства Тошиба Медикал Системз Корпорейшн, Япония (регистрационное удостоверение №ФСЗ 2007/00891 от 24.12.2007) с толщиной среза от 0,5 до 2,0 мм в аксиальной плоскости с последующей мультипланарной (многоплоскостной) реконструкцией.

Статистический анализ полученных данных проведен с помощью программы IBM SPSS Statistics 22.0. Проверяли гипотезы о виде распределений (критерий Шапиро — Уилка). Большинство полученных данных не соответствовало закону нормального распределения, поэтому для сравнения значений использовали непараметрический U -критерий Манна — Уитни и показатель достоверности (p). Для представления итоговых количественных данных использовали медиану (Me) и квартили [Q_{25} ; Q_{75}].

Результаты. Исследование образцов костной ткани позвонков свиней-хрячков (образцы сравнения) и контрольных образцов человека, полученных в качестве операционного материала, продемонстрировало отсутствие статистически значимых различий по значению интегрального показателя продольной упругости (модуля Юнга) ($p=0,724$), что свидетельствует о сопоставимости по деформативно-прочностным свойствам используемой натурной модели и определяет возможность дальнейшего проведения механических испытаний наиболее часто имплантируемых металлоконструкций.

В условиях осевой нагрузки на фиксированную систему «анатомический блок — металлоконструкция» на моделях 4-винтовой транспедикулярной фиксации медианные значения максимальной нагрузки составили 2980 Н (≈ 298 кг), максимального напряжения — 7,18 МПа (таблица). При достижении пиковых нагрузок обнаруживали срыв одной или двух верхних гаек, деформацию верхних концов стержней, шеек верхних винтов системы для фиксации и стабилизации, что сопровождалось ее нестабильностью с последующей дисперсией костных отломков на уровне

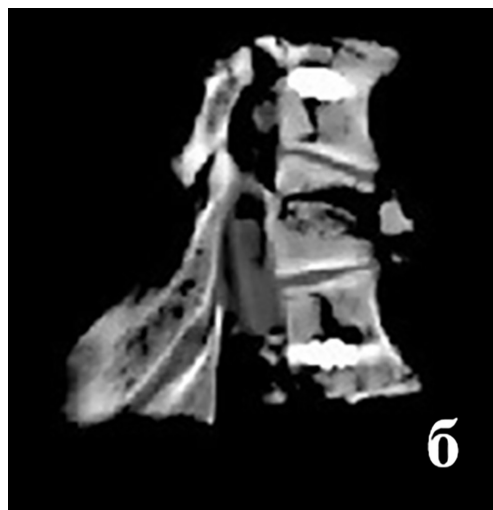


Рис. 1. Модель 4-винтовой транспедикулярной фиксации сегментарного анатомического блока позвоночного столба свиньи-хрячка после стендового испытания:
а — натурная фотография; б — КТ-скан

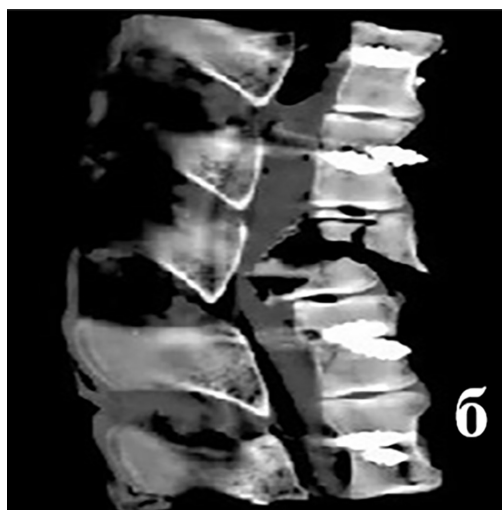
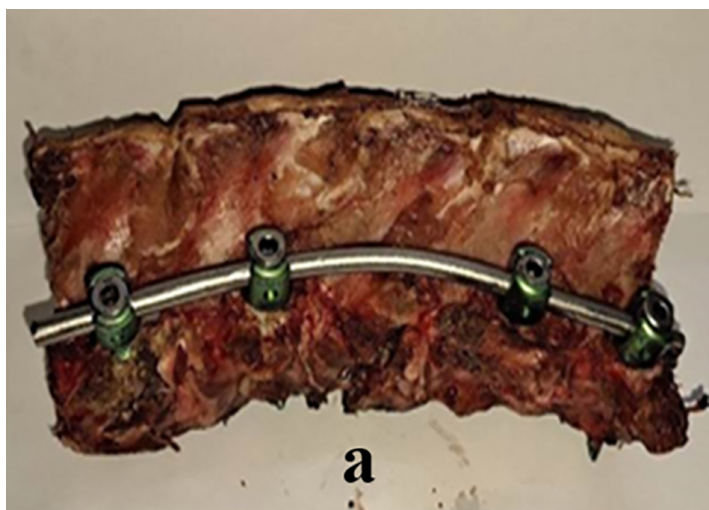


Рис. 2. Модель 8-винтовой транспедикулярной фиксации сегментарного анатомического блока позвоночного столба свиньи-хрячка после стендового испытания:
а — натурная фотография; б — КТ-скан

поврежденного позвонка и формированием угловой (кифотической) деформации модели, что соответствует сканам, полученным при компьютерной томографии (КТ; рис. 1).

В условиях осевой нагрузки на фиксированную систему «анатомический блок — металлоконструкция» на моделях 8-винтовой транспедикулярной фиксации медианные значения максимальной нагрузки составили 4240 Н (≈ 424 кг) ($p_1=0,004$), максимального напряжения — 9,78 МПа ($p_1=0,006$; см. таблицу). При достижении пиковых нагрузок обнаруживали начинающееся сгибание в средней части стержней транспедикулярной системы с коллапсом области моделированного перелома, дисперсией костных отломков и формированием углообразной (кифотической) деформации, что также соответствует сканам, полученным при компьютерной томографии (рис. 2). Следует отметить, что осевая компрессия в 298 кг, которая вызывала повреждение модели 4-винтовой транспедикулярной фиксации, не оказала в момент

регистрации данной отметки на модель 8-винтовой фиксации никакого механического воздействия.

В условиях осевой нагрузки на фиксированную систему «анатомический блок — металлоконструкция» на моделях 4-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом медианные значения максимальной нагрузки составили 6460 Н (≈ 646 кг) ($p_2=0,001$), максимального напряжения — 15,27 МПа ($p_2=0,001$; см. таблицу). При достижении пиковых нагрузок обнаруживали начинающееся сгибание стержней и прокручивание верхних винтов против часовой стрелки, при этом высота межтелового промежутка минимально снижалась. Сетчатый эндофиксатор еще больше заклинивался между смежными телами позвонков за счет его умеренного пролапса в замыкательные пластины, что соответствует сканам, полученным при КТ (рис. 3). Прохождение отметки нагрузки в 298 кг также не отражалось на модели 4-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом ни визуальным, ни по данным приборов.

В условиях осевой нагрузки на фиксированную систему «анатомический блок — металлоконструкция» на моделях 8-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом медианные значения максимальной нагрузки составили 10120 Н (≈ 1012 кг) ($p_2=0,001$), максимального напряжения — 103,21 МПа ($p_2=0,001$) (см. таблицу). При достижении пиковых нагрузок обнаруживали умеренное сгибание стержней конструкции, просаживание сетчатого эндофиксатора в тела смежных позвонков и формирование угловой (кифотической) деформации, что также соответствует сканам, полученным при проведении КТ (рис. 4). При этом визуальных повреждений узлов конструкции не отмечено так же, как и нарушения целостности костной ткани позвонков.

Обсуждение. Результаты эксперимента демонстрируют равномерное распределение осевой нагрузки на испытуемую модель 8-винтовой транспедикулярной фиксации, что обеспечивается большим количеством точек фиксации, а следовательно, большей жесткостью. Данная особенность конструкции

объясняет отсутствие повреждений ее элементов, а также окружающих костных структур. Тем не менее проблемной зоной этой модели являются свободные (не фиксированные винтами) участки стержней в средней части системы (на уровне перелома), который, судя по полученным результатам, можно считать критической точкой приложения осевой компрессии. При этом следует обратить внимание на усилие, потребовавшееся для сгибания стержней в 424 кг, что в 1,5 раза больше, чем необходимо для разрушения 4-винтовой транспедикулярной фиксации. Разумеется, в реальных условиях сложно представить аксиальную нагрузку на позвоночник в 424 кг, то есть данный вариант стабилизации обладает большим запасом прочности и соответственно времени до наступления консолидации поврежденного позвонка. Однако в редких случаях циклические нагрузки в совокупности с рядом неблагоприятных факторов могут вызвать повреждение конструкции в описанной перегружаемой зоне, что подтверждается данными литературы [12–15].

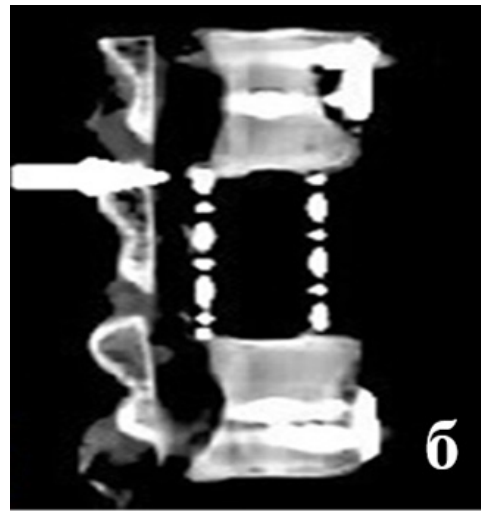
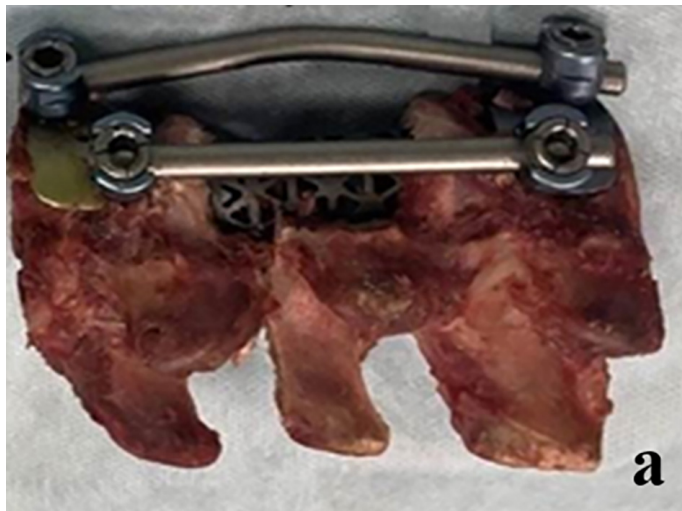


Рис. 3. Модель 4-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом сегментарного анатомического блока позвоночного столба свиньи-хрячка после стендового испытания:
а — натурная фотография; б — КТ-скан



Рис. 4. Модель 8-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом сегментарного анатомического блока позвоночного столба свиньи-хрячка после стендового испытания:
а — натурная фотография; б — КТ-скан

Результаты эксперимента также указывают на тот факт, что способность 4-винтовой транспедикулярной фиксации с опорным спондилодезом выдерживать аксиальную нагрузку превышает аналогичные возможности модели 4-винтовой транспедикулярной фиксации в 2,2 раза, а 8-винтовой транспедикулярной фиксации — в 1,5 раза. Чрезмерная устойчивость модели 8-винтовой транспедикулярной фиксации (примерно 646 кг) обусловлена циркулярной стабильностью всех колонн позвоночника. Передние структуры, которые, как известно, выполняют основную опорную функцию, жестко стабилизированы винтовой системой (причем компрессионная нагрузка распространяется по оси стержней) в комбинации с межтеловым спондилодезом, а аксиальную стабильность обеспечивает неповрежденный задний остеолигаментозный комплекс [16–18]. Следовательно, данная модель обладает чрезмерным запасом прочности, которого вполне хватает для формирования на этом уровне сегментарного костнометаллического блока.

Стандовое испытание модели 8-винтовой транспедикулярной фиксации в комбинации с опорным спондилодезом наглядно демонстрирует устойчивость к аксиальному воздействию циркулярной инструментализации позвоночника. Для того чтобы добиться деформации анатомического препарата, потребовалась чрезмерная нагрузка (1022 кг). При этом визуальные и рентгенологические проявления осевой компрессии оказались практически незаметны. Из этого следует, что при данном варианте фиксации прикладываемое аксиальное усилие равномерно воздействует на металлоконструкцию, не перегружая ее отдельных зон. Устойчивость этой модели почти в 2 раза выше, чем при других вариантах фиксации, что практически не ограничивает в объеме никакие нагрузки [19–20].

Заключение. Наибольшей устойчивостью в условиях контролируемой осевой компрессии обладает модель 8-винтовой транспедикулярной фиксации и опорного спондилодеза, при которой все узлы металлоконструкции остаются стабильными, а костные структуры позвонков — сохранными.

Вклад авторов: все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации «Разработка системы прогнозирования и профилактики неблагоприятных исходов хирургического лечения травм грудного и поясничного отделов позвоночника на основе комплексного персонализированного анализа скорости репарации позвонков», номер государственной регистрации НИОКТР 12022700112-4.

References (Список источников)

- Novoselova IN. Etiology and clinical epidemiology of spinal cord injury. Literature review. Russian Neurosurgical Journal n. a. Professor A. L. Polenov. 2019; 11 (4): 84–92. (In Russ.) Новоселова И. Н. Этиология и клиническая эпидемиология позвоночно-спинномозговой травмы. Литературный обзор. Российский нейрохирургический журнал имени профессора А. Л. Поленова. 2019; 11 (4): 84–92.
- Tolkachev VS, Bazhanov SP, Ulyanov VYu, et al. The epidemiology of spine and spinal cord injuries (review). Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2018; 14 (3): 592–5. (In Russ.) Толкачев В. С., Бажанов С. П., Ульянов В. Ю. и др. Эпидемиология травм позвоночника и спинного мозга (обзор). Саратовский научно-медицинский журнал. 2018; 14 (3): 592–5.
- Prudnikova OG, Khomchenkov MV. Post-traumatic deformities of the spine: relevance, problems, and revision surgery.

Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2019; 16 (4): 36–44. (In Russ.) Прудникова О. Г., Хомченков М. В. Посттравматические деформации позвоночника: актуальность, проблемы, ревизионная хирургия. Хирургия позвоночника. 2019; 16 (4): 36–44. DOI: 10.14531/ss2019.4.36–44

4. Afaunov AA, Basankin IV, Mishagin AV, et al. Revision procedures in the surgical treatment of thoracic and lumbar spine injuries. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2015; 12 (4): 8–16. (In Russ.) Афаунов А. А., Басанкин И. В., Мишагин А. В. и др. Ревизионные операции в хирургическом лечении повреждений грудного и поясничного отделов позвоночника. Хирургия позвоночника. 2015; 12 (4): 8–16. DOI: 10.14531/ss2015.4.8–16

5. Rerikh VV, Borzykh KO. Staged surgical treatment of posttraumatic deformities in the thoracic and lumbar spine. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2016; 13 (4): 21–7. (In Russ.) Рерих В. В., Борзых К. О. Этапное хирургическое лечение посттравматических деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника. Хирургия позвоночника. 2016; 13 (4): 21–7. DOI: 10.14531/ss2016.4.21–27

6. Dulaev AK, Kutyanov DI, Manukovskiy VA, et al. Decision-making and technical choice in instrumental fixation for neurologically uncomplicated isolated burst fractures of the thoracic and lumbar vertebrae. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika) 2019; 16 (2): 7–17. (In Russ.) Дулаев А. К., Кутянов Д. И., Мануковский В. А. и др. Выбор тактики и технологии инструментальной фиксации при изолированных неосложненных взрывных переломах грудных и поясничных позвонков. Хирургия позвоночника. 2019; 16 (2): 7–17. DOI: 10.14531/ss2019.2.7–17

7. Zhao Q, Zhang H, Hao D, et al. Complications of percutaneous pedicle screw fixation in treating thoracolumbar and lumbar fracture. Medicine (Baltimore). 2018; 97 (29): e11560. DOI: 10.1097/MD.00000000000011560

8. Berdyugin KA, Chertkov AK, Stadler DI, et al. Errors and complications of transpedicular fixation of the spine with immersion structures. Fundamental Research. 2012; 4 (1): 425–31. (In Russ.) Бердюгин К. А., Чертков А. К., Штадлер Д. И. и др. Ошибки и осложнения транспедикулярной фиксации позвоночника погружными конструкциями. Фундаментальные исследования. 2012; 4 (1): 425–31.

9. Bigdon SF, Saldarriaga Y, Oswald K, et al. Epidemiologic analysis of 8000 acute vertebral fractures: Evolution of treatment and complications at 10-year follow-up. Journal of Orthopaedic Surgery and Research. 2022; 17 (1): 270. DOI: 10.1186/s13018-022-03147-9

10. McDonnell M, Shan KN, Paller DJ, et al. Biomechanical analysis of pedicle screw fixation for thoracolumbar burst fractures. Orthopedics. 2016; 39 (3): e514–18. DOI: 10.3928/01477447-20160427-09

11. Miele VJ, Panjabi MM, Benzel EC. Anatomy and biomechanics of the spinal and cord. Handb Clin Neurol. 2012; 109: 31–43. DOI: 10.1016/B978-0-444-52137-8.00002-4

12. Shulga AE, Zaretskov VV, Ostrovsky VV, et al. Towards the causes of secondary post-traumatic deformations of thoracic and lumbar spine. Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2015; 11 (4): 570–5. (In Russ.) Шульга А. Е., Зарецков В. В., Островский В. В. и др. К вопросу о причинах развития вторичных посттравматических деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника. Саратовский научно-медицинский журнал. 2015; 11 (4): 570–5.

13. De Gendt E, Vercoulen T, Joaquim A, et al. The current status of spinal posttraumatic deformity: A systematic review. Global Spine J. 2021; 11 (8): 1266–80. DOI: 10.1177/2192568220969153

14. Borzykh KO, Roerich VV, Zhukov DV. Post-traumatic deformities of the thoracic and lumbar spine. Novosibirsk: FGBU NNIITO n. a. Ya. L. Tsvyan, the Russian Federation Ministry of Healthcare, 2024; 56 p. (In Russ.) Борзых К. О., Рерих В. В., Жуков Д. В. Посттравматические деформации грудного и поясничного отделов позвоночника. Новосибирск: ФГБУ «НИИТО им. Я. Л. Цивьяна» Минздрава России, 2024; 56 с.

15. Roerich VV, Borzykh KO. Posttraumatic deformities of the thoracic and lumbar spine in patients in the late period of spinal cord injury after previous surgeries. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015; 12 (4): 657–60. (In Russ.) Рерих В. В., Борзых К. О. Посттравматические деформации грудного и поясничного отделов позвоночника у пациентов в позднем периоде позвоночно-спинномозговой

травмы после ранее проведенных оперативных вмешательств. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015; 12 (4): 657–60.

16. Beskrovny AS, Bessonov LV, Golyadkina AA. Development of a decision support system in traumatology and orthopedics. Biomechanics as a tool for preoperative planning. Russian Journal of Biomechanics. 2021; 25 (2): 118–33. (In Russ.) Бескровный А. С., Бессонов Л. В., Галядкина А. А. и др. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования. Российский журнал биомеханики. 2021; 25 (2): 118–33. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2021.2.01

17. Ogurkovska MB, Blaszczyk A. Variation in human vertebral body strength for vertebral body samples from different

locations in segments L1-L5. Clin Biomech (Bristol). 2018; (60): 66–75. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.10.008

18. Bruno AG, Burkhart K, Allaire B, et al. Spinal loading patterns from biomechanical modeling explain the high incidence of vertebral fractures in the thoracolumbar region. J Bone Miner Res. 2017; 32 (6): 1282–90. DOI: 10.1002/jbmr.3113

19. Fereydoonpour M, Rezaei A, Schreiber A, et al. Prediction of vertebral failure under general loadings of compression, flexion, extension, and side-bending. J Mech Behav Biomed Mater. 2024; 162: 106827. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2024.106827

20. Liang D, Deng X, Qian J, et al. Comparison of different pedicle screw fixation schemes in the treatment of neurosurgical spinal fractures: Systematic review and meta-analysis. Ann Palliat Med. 2021; 10 (12): 12678–89. DOI: 10.21037/apm-21-3533

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 22.11.2024. The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 22.11.2024.

Информация об авторах:

Алексей Евгеньевич Шульга — старший научный сотрудник отдела инновационных проектов в нейрохирургии и вертебрологии Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, кандидат медицинских наук, doc.shulga@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8476-0231; **Юлия Юрьевна Рожкова** — начальник отдела научно-технической информации Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, rozhkova280586@gmail.com, ORCID 0000-0001-9506-5234; **Владимир Юрьевич Ульянов** — заместитель директора по научной и инновационной деятельности Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доцент, доктор медицинских наук, v.u.ulyanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-9466-8348; **Станислав Дмитриевич Шувалов** — врач-нейрохирург нейрохирургического отделения Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, i@shuvalovstan.ru, ORCID 0000-0002-8095-9398; **Владимир Сергеевич Толкачев** — врач-нейрохирург нейрохирургического отделения Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, vladimir.tolkachev@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6580-4403; **Сергей Петрович Бажанов** — начальник отдела инновационных проектов в нейрохирургии и вертебрологии Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доктор медицинских наук, baj.s@mail.ru, ORCID 0000-0001-9474-9095; **Владимир Владимирович Островский** — директор Научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии, доктор медицинских наук, ostrw@mail.ru, ORCID 0000-0002-8602-2715.

Information about the authors:

Alexey E. Shulga — Senior Researcher of the Division of Innovative Projects in Neurosurgery and Vertebrology of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, PhD, doc.shulga@yandex.ru, ORCID 0000-0001-8476-0231; **Yuliya Yu. Rozhkova** — Head of the Scientific and Technical Information Division of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, rozhkova280586@gmail.com, ORCID 0000-0001-9506-5234; **Vladimir Yu. Ulyanov** — Deputy Director for Scientific and Innovations of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, Associate Professor, DSc, v.u.ulyanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-9466-8348; **Stanislav D. Shuvalov** — Neurosurgeon of the Neurosurgery Division of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, shuvalov.stan@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8095-9398; **Vladimir S. Tolkachev** — Neurosurgeon of the Neurosurgery Division of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, vladimir.tolkachev@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6580-4403; **Sergey P. Bazhanov** — Head of the Division of Innovative Projects in Neurosurgery and Vertebrology of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, DSc, baj.s@mail.ru, ORCID 0000-0001-9474-9095; **Vladimir V. Ostrovskij** — Director of the Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery, DSc, sarniito@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8602-2715.