

УДК 616.13-089

<https://doi.org/10.24884/1682-6655-2025-24-4-67-72>

А. В. КРИВЕНЦОВ<sup>1, 2</sup>, В. Н. АЛЕКСАНДРОВ<sup>3</sup>,  
 П. В. ПОПРЯДУХИН<sup>4, 5</sup>, Г. Ю. ЮКИНА<sup>1, 2, 4</sup>,  
 Е. М. ИВАНЬКОВА<sup>5</sup>, В. Е. ЮДИН<sup>4, 5</sup>, В. В. МАТРОСОВ<sup>1</sup>,  
 Г. Г. ХУБУЛАВА<sup>1, 2</sup>

## Протезирование сосудов малого диаметра с использованием полиимидных сосудистых протезов

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2

<sup>4</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

<sup>5</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук» 199004, Россия, Санкт-Петербург, Большой пр., д. 31  
 E-mail: sascha\_jiembet@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.11.25 г.; принята к печати 28.11.25 г.

### Резюме

*Цель* – изучение биосовместимости, удобства имплантации, механических свойств сосудистого протеза из полиимида в условиях эксперимента на крысах породы Wistar. *Материалы и методы.* Нами было выполнено 9 экспериментов. В ходе экспериментов полиимидные сосудистые протезы, полученные с помощью метода электроформирования, имплантировались в брюшную аорту крыс. После операции оценивались двигательная активность, температура, цвет кожных покровов задних конечностей экспериментальных животных. По прошествии одного, трех, шести месяцев животные выводились из эксперимента. Проводилась макроскопическая оценка в области имплантации протеза на предмет формирования капсулы, расширения на участке протезирования. Далее проводилось морфологическое исследование кондуита, оценивались нарастание соединительно-тканной капсулы, формирование неоинтимы, выраженность воспалительной реакции. *Результаты.* В ходе операции протез показал себя удобным для наложения швов (отсутствие прорезывания, оптимальное затягивание нитей), анастомозы герметичны. Во всех девяти случаях двигательная активность, температура, цвет нижних конечностей экспериментальных животных не отличались от таковых у здоровых крыс. Во всех случаях при морфологическом исследовании отмечалось формирование неоинтимы. Имплантированные протезы на протяжении всего времени наблюдения оставались проходимы, не наблюдалось ανεэрезматического расширения. У одного животного, выведенного из эксперимента через месяц, и у двух, выведенных через 3 месяца, отмечалось появление кальцинатов на границе протеза и неоинтимы, что может говорить о низкой скорости врастания тканей нативной аорты в стенку протеза. Отмечалось умеренное развитие иммунной реакции в ответ на имплантацию. Снаружи протеза формировалась соединительнотканная капсула, представленная коллагеновыми волокнами, в которой определялись кровеносные сосуды. *Заключение.* Полиимидные протезы перспективны для дальнейшего изучения.

**Ключевые слова:** сосудистая хирургия, протезирование кровеносных сосудов, полимерные протезы

*Для цитирования:* Кривенцов А. В., Александров В. Н., Попрядухин П. В., Юкина Г. Ю., Иванькова Е. М., Юдин В. Е., Матросов В. В., Хубулава Г. Г. Протезирование сосудов малого диаметра с использованием полиимидных сосудистых протезов. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2025;24(4):67–72. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2025-24-4-67-72>.

A. V. KRIVENCOV<sup>1, 2</sup>, V. N. ALEKSANDROV<sup>3</sup>,  
 P. V. POPRYADUKHIN<sup>4, 5</sup>, G. YU. YUKINA<sup>1, 2, 4</sup>,  
 E. M. IVANKOVA<sup>5</sup>, V. E. YUDIN<sup>4, 5</sup>, V. V. MATROSOV<sup>1</sup>,  
 G. G. KHUBULAVA<sup>1, 2</sup>

## Implantation of Polyimide Vascular Grafts in Small-Diameter Blood Vessels

<sup>1</sup> Pavlov University

6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, Russia, 197022

<sup>2</sup> Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

6, Academica Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044

<sup>3</sup> Saint-Petersburg State Pediatric Medical University

2, Litovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 194100

<sup>4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29, Politechnicheskaya str., Saint Petersburg, Russia, 195251

<sup>5</sup> Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences

31, Bol'shoj pr., Saint Petersburg, Russia, 199004

E-mail: sascha\_jiembet@mail.ru

Received 03.11.25; accepted 28.11.25

### Summary

**Objective.** To study the biocompatibility, ease of implantation, and mechanical properties of polyimide vascular grafts under experimental conditions on Wistar rats. **Materials and methods.** We performed nine experiments. Polyimide vascular grafts obtained using electroforming were implanted into the abdominal aorta of rats. Postoperatively, motor activity, temperature, and skin color of the hind limbs of the experimental animals were assessed. After one, three, and six months, the animals were removed from the experiment. A macroscopic assessment of the implantation site was performed to assess capsule formation and expansion at the graft site. A morphological examination of the conduit was then performed, assessing connective tissue capsule growth, neointimal formation, and the severity of the inflammatory response. **Results.** During surgery, the graft proved easy to suture (no cutting through, optimal suture tightening), and the anastomoses were leak-tight. In all nine cases, motor activity, temperature, and skin color of the lower limbs of the experimental animals were consistent with those of healthy rats. Morphological examination revealed neointimal formation in all cases. The implanted grafts remained patent throughout the observation period, and no aneurysmal dilation was observed. One animal, withdrawn after one month, and two animals, withdrawn after three months, showed the appearance of calcifications at the border of the prosthesis and neointima, which may indicate a low rate of native aortic tissue ingrowth into the graft wall. A moderate immune reaction to implantation was observed. A connective tissue capsule consisting of collagen fibers formed outside the graft, within which blood vessels were visible. **Conclusion.** Polyimide grafts appear promising and warrant further investigation.

**Keywords:** vascular surgery, vascular grafts, polymer grafts

**For citation:** Krivencov A. V., Aleksandrov V. N., Popryadukhin P. V., Yukina G. Yu., Ivankova E. M., Yudin V. E., Matrosov V. V., Khubulava G. G. Implantation of Polyimide Vascular Grafts in Small-Diameter Blood Vessels. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2025;24(4):67–72. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2025-24-4-67-72>.

### Введение

Болезни сердечно-сосудистой системы остаются ведущей причиной смертности в мире. Несмотря на постоянно совершенствующиеся методы консервативной терапии, большое количество хирургических способов лечения сердечно-сосудистой патологии остаются в области, где еще не введены в клиническую практику оптимальные решения. Одной из таких проблем является протезирование артерий малого диаметра (менее 5 мм). Использование широко распространенных тканых протезов, протезов из политетрафторэтилена (ПТФЭ) показывает плохие результаты в первую очередь из-за гиперплазии неинтимы в области формирования анастомозов, раннего стенозирования, тромбообразования. Это объясняется тем, что в сосудах с большим внутренним диаметром артериальное давление крови достаточно

для омывания стенки сосуда, предотвращая агрегацию тромбоцитов и, следовательно, дальнейшее образование тромба и, как следствие, стеноз. Однако в сосудах с малым внутренним диаметром артериальное давление в стенке сосуда, как правило, ниже, и поэтому тромбоциты склонны агрегировать в зоне анастомоза без интактного эндотелиального слоя, что в дальнейшем приводит к тромбозу и стенозу [1, 2].

Областями, в которых актуально использование протезов малого диаметра, являются реваскуляризация коронарных артерий, артерий нижних конечностей, формирование артериовенозных фистул, случаи, когда традиционные аутографты невозможно использовать ввиду атеросклеротического поражения, недостаточных размеров артериальных графтов, варикозного расширения, тромбофлебита большой подкожной вены. Помимо этого следует отметить,

что забор аутологичного материала сопряжен с нарушением кровоснабжения в соответствующем регионе, а также с дополнительной травматизацией.

В настоящее время множество групп ученых ведут работы по созданию полимерного трубчатого протеза. Такие протезы после имплантации в сосуд заселяются фибробластами, макрофагами, покрываются изнутри неоинтимой и со временем приобретают стенку, схожую со стенкой нативного сосуда [3].

Существуют полимеры, которые со временем резорбируются, а на их месте остается кровеносный сосуд. В выборе материала такого протеза очень важно, чтобы время резорбции полимера и время ремоделирования были сопряжены. При слишком быстрой резорбции происходит гиперплазия неоинтимы, наблюдается иммунный ответ организма на продукты резорбции, а также нарушаются механические свойства, что может привести к формированию аневризмы протезированного участка [4]. Помимо резорбируемых полимерных протезов, разрабатываются нерезорбируемые, которые во многом лишены описанных недостатков.

Полиимид широко распространен в медицине в качестве компонента мембран-оксигенаторов, имплантируемых микроэлектронных устройств, используется при создании искусственных костей, мышц [5]. Этот материал имеет оптимальные механические свойства, обладает биосовместимостью, что позволяет его рассматривать в качестве перспективного материала для изготовления сосудистого протеза.

**Целью** данного исследования является изучение биосовместимости, удобства имплантации, механических свойств сосудистого протеза из полиимида в условиях эксперимента на крысах породы Wistar.

#### Материалы и методы исследования

Для изготовления полимерных протезов использовали триэтиламмонийную соль полиамидокислоты на основе пиромеллитового диангидрида и 4,4'-диаминодифенилового эфира (Sigma-Aldrich, Германия). Трубочатый протез получали с помощью метода электроформирования на установке Nanop-01A (Месс Со., Япония).

Была проведена серия экспериментов на 9 крысах породы Wistar массой 200–250 г. Работа с животными выполнена в соответствии с правилами использования экспериментальных животных (согласно принципам Европейской конвенции, Страсбург, 1986 г., и Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации о гуманном обращении с животными, 1996 г.). Протокол исследования был одобрен этическим комитетом федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; протокол № 291 от 21.05.2024 г.

Под общей анестезией (0,2 ml Zoletili+0.025 ml Rometar) выполнен доступ: полная срединная лапаротомия. Под 7–10 кратном увеличении операционного микроскопа OPMI PICO (Carl Zeiss, Германия) выделяли инфраренальный отдел аорты. Через 3–5 мин

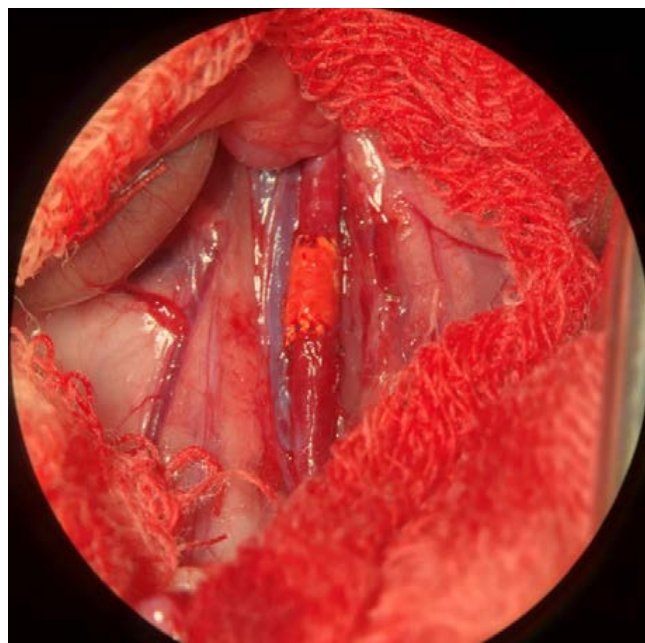


Рис. 1. Интраоперационная фотография имплантированного полиимидного протеза. Операционный микроскоп, увеличение  $\times 7$   
Fig. 1. Intraoperative photograph of the implanted polyimide graft. Surgical microscope, magnification  $\times 7$

после введения внутривенно 300 Ед/кг гепарина пережимали поперек участок аорты ниже почечных артерий и над ее бифуркацией. Аорту между клипсами-зажимами поперечно рассекали. Нитью Prolen 10/0 одиночными швами накладывали анастомозы по типу «конец в конец», между образцом протеза и проксимальным, дистальным отделами брюшной аорты. Длина трансплантата составляла 5–8 мм, внутренний диаметр протеза – 1,2 мм. Время ишемии нижних конечностей составляло  $30 \pm 5$  минут (рис. 1). Переднюю брюшную стенку послойно ушивали атравматическими иглами с нитью Prolen 5/0. После операции крыс содержали в индивидуальных клетках, животные получали свободный доступ к воде и стандартную диету. В послеоперационном периоде оценивали двигательную активность, цвет, температуру задних конечностей.

Для проведения морфологического исследования животных выводили через один, три, шесть месяцев. Оценивали проходимость, клеточный состав стенки полимерного протеза, степень развития соединительной ткани, неоинтимы.

После выведения животного из эксперимента протезы сосудов промывали при помощи инсулинового шприца небольшим количеством физиологического раствора. Протез вместе с анастомозами сутки фиксировали в 10 % нейтральном формалине и заключали в парафин для последующего анализа. Использовали стандартную гистологическую процедуру, получали парафиновые срезы толщиной 5 мкм, которые окрашивали гематоксилином-эозином (BioVitrum, Россия).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Двигательная активность экспериментальных животных, температура, цвет нижних конечностей не отличались от таковых у неоперированных крыс.

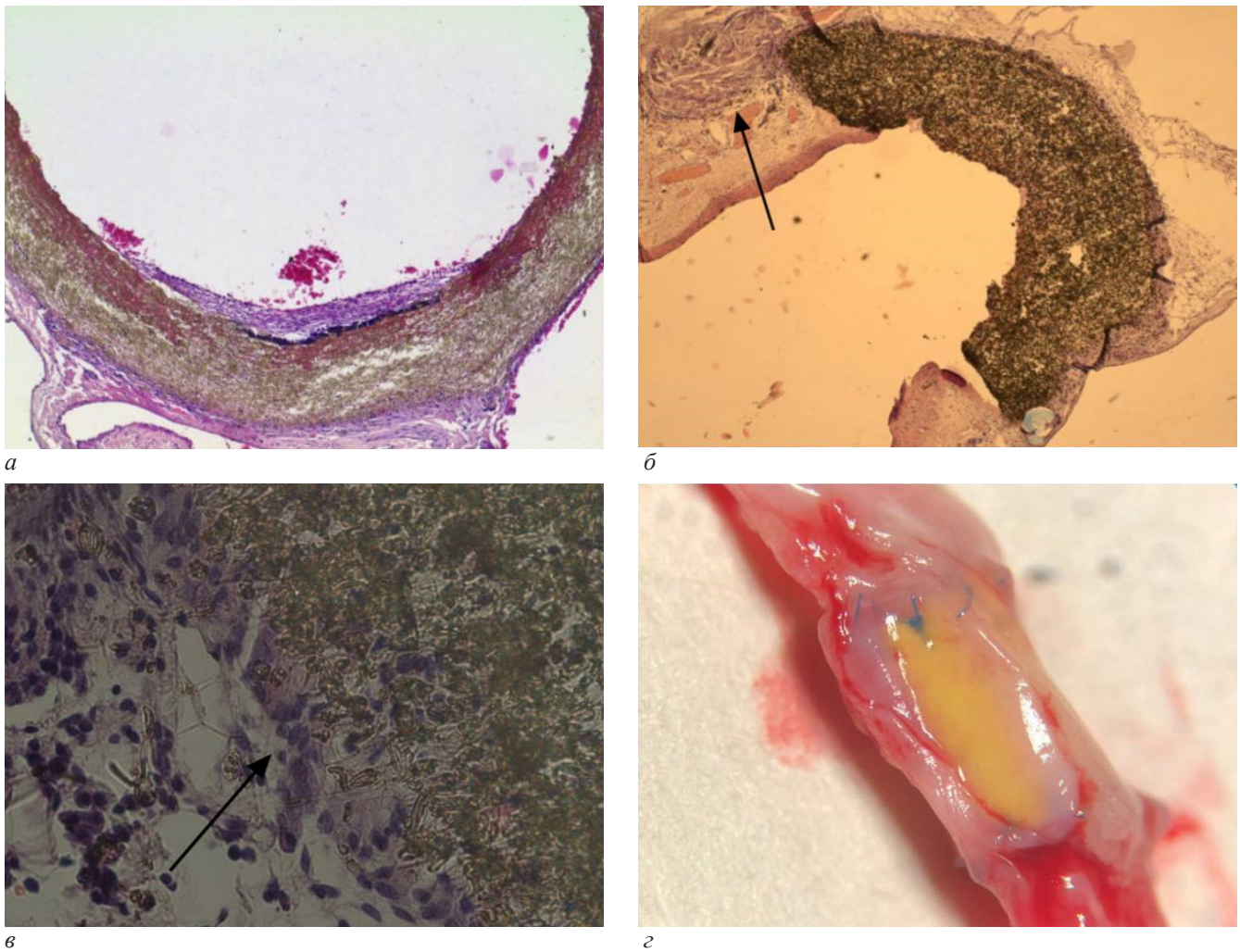


Рис. 2. Данные морфологического исследования: *а-в* – нарастание интимы с нативного сосуда на протез; *а* – гистологический препарат при увеличении 50×, полученный через месяц после имплантации протеза, отмечается пропитывание ткани протеза кровью, нарастание неоинтимы, формирование соединительнотканной капсулы; *б-г* – результаты исследования через 3 месяца; *б* – при увеличении 50× отмечается очаг продуктивного воспаления (указывает стрелка); *в* – при увеличении 600× продемонстрированы эндотелиоциты, выстилающие внутренний просвет протеза; *г* – формирование соединительнотканной капсулы, vasa vasorum

Fig. 2. Morphological examination data: *а-б* – demonstrate the growth of intima from the native vessel to the graft; *а* – histological preparation (magnification ×50) obtained one month after graft implantation, showing blood impregnation of the graft tissue, neo-intimal growth, and connective tissue capsule formation; *б-г* – the study results after 3 months; *б* – (magnification ×50), there is a focus of productive inflammation (indicated by the arrow); *в* – (magnification ×600) demonstrates the endotheliocytes lining the inner lumen of the graft; *г* – formation of a connective tissue capsule, vasa vasorum

Имплантация не сопровождалась значимым кроветечением сквозь стенку протеза, который показал себя удобным для наложения швов (отсутствие прорезывания, оптимальное затягивание нитей); анастомозы герметичны.

По данным морфологического исследования на внутренней поверхности протеза уже через месяц образовывалась неоинтима, что способствовало профилактике тромбообразования. Гиперплазии неоинтимы не наблюдалось. Во всех случаях сохранялась проходимость протезированного участка. В ответ на имплантацию протезов отмечалась типичная иммунная реакция, проявляющаяся в присутствии в стенке протезов макрофагов и гигантских многоядерных клеток инородных тел в умеренном количестве. У одного животного, выведенного из эксперимента через месяц, и у двух, выведенных через 3 месяца, отмечалось появление кальцинатов на границе протеза и неоинтимы, что может говорить о низкой скорости врастания тканей нативной аорты в стенку протеза. Не было замечено признаков появ-

ления аневризматического расширения стенки протеза, что говорит о стабильности упругих свойств материала. Снаружи протеза формировалась соединительнотканная капсула, представленная коллагеновыми волокнами, в которой определялись кровеносные сосуды (рис. 2).

Полученные в ходе экспериментов данные показали перспективность использования полиимидных сосудистых протезов малого диаметра в качестве шунтов для реваскуляризации артерий нижних конечностей, коронарных артерий, ввиду их атромбогенности благодаря быстрому формированию неоинтимы, отсутствию тенденции к ее гиперплазии, а также прочности и биосовместимости. Отсутствие резорбции ткани протеза, формирование соединительнотканной капсулы способствовали профилактике развития аневризм.

В настоящее время ведется активная работа по созданию тканеинженерных полимерных синтетических матриц для протезирования сосудов малого диаметра. Большое количество протезов из раз-

личных материалов проходят этап экспериментов на животных, а некоторые модели – клинические испытания. Фокус исследователей сосредоточен на многослойных полимерных матрицах, перспективно использование децеллюлизованных аллогraftов, в том числе в сочетании с полимерными матрицами [8].

Ведутся клинические эксперименты с использованием тканеинженерного протеза в виде матрицы, заселенной в биореакторе гладкомышечными клетками, в качестве сосудистого доступа для диализа.

По данным Tomasz Jakimowicz и соавторов, полученных в результате пятилетнего наблюдения, у 22 (76%) из 29 пациентов, включенных в исследование, первичная проходимость была утрачена в течение основной части исследования (на 24-м месяце или ранее). К 60-му месяцу первичная проходимость сохранялась у одного пациента, а вторичная – у 10 [9].

Клинические исследования ведутся по применению тканеинженерных децеллюлизованных сосудов. Негтманн и соавторы в качестве кондуита при коронарном шунтировании (КШ) использовали криоконсервированные вены с предварительно удаленным эндотелием. Перед имплантацией graftы заселялись аутологичными эндотелиальными клетками. Результаты показали, что при 6-месячном и 12-месячном послеоперационном наблюдении проходимость трансплантатов составила 80% и 50% соответственно [10].

Помимо описанного graftа для КШ, рассматривается применение шунта на основе полиуретана, заселенного аутологичными мышечными и эндотелиальными клетками, однако на доклиническом этапе была выявлена высокая вероятность формирования тромбоза [11]. Graft из бактериальной целлюлозы, также несмотря на хорошие механические свойства, низкую иммуногенность и атромботичность, отличался очень низкой проходимостью в послеоперационном периоде [12].

На настоящем этапе у разрабатываемого протеза из полиимида не было зафиксировано проблем с долгосрочной проходимостью, что выгодно отличает его от предшественников и создает большие перспективы его применения.

### Выводы

В ходе исследования были доказаны биосовместимость, что проявилось в виде формирования неинтимы и соединительнотканной капсулы, а также хорошие механические свойства полимерных протезов, обуславливающие отсутствие аневризм в области имплантации. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование полимерных протезов малого диаметра из ароматического полиимида для дальнейшего исследования на крупных животных, физиология которых в большей степени схожа с человеческой.

### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare that they have no conflict of interest.

### Финансирование / Financing

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-73-30003). / The study was supported by Russian Science Foundation (project № 19-73-30003).

### Литература/ References

1. Drews JD, Miyachi H, Shinoka T. Tissue-engineered vascular grafts for congenital cardiac disease: Clinical experience and current status. *Trends Cardiovasc. Med.* 2017;27(8):521-531. <https://doi.org/10.1016/j.tcm.2017.06.013>.
2. Sayers RD, Raptis S, Berce M, Miller JH. Long-term results of femorotibial bypass with vein or polytetrafluoroethylene. *J. Br. Surg.* 1998;85(7):934-938. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2168.1998.00765.x>.
3. Naito Y, Shinoka T, Duncan D, et al. Vascular tissue engineering: Towards the next generation vascular grafts. *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2011;30;63(4):312-323. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.03.001>.
4. Понов Г. И., Вавилов В. Н., Попрядухин П. В. Оценка тканеинженерного сосудистого имплантата на основе биodeградируемой матрицы и мезенхимных стромальных клеток в хроническом эксперименте in vivo // *Цитология.* 2022. Т. 64, № 6. С. 591–599. [Popov GI, Vavilov VN, Popryadukhin PV. Evaluation of Tissue-Engineered Vascular Grafts Based on the Biodegradable Scaffold and Mesenchymal Stem Cells in the Long-Term in vivo Experiment. *Cytology.* 2022;64(6):591-599. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0041377122060098>.
5. Shu J, Zhou Z, Liang H, Yang X. Polyimide as a biomedical material: advantages and applications. *Nanoscale advances.* 2024;6(17):4309-4324. <https://doi.org/10.1039/d4na00292j>.
6. Popryadukhin PV, Popov GI, Yukina GY, et al. Tissue-Engineered Vascular Graft of Small Diameter Based on Electrospun Polylactide Microfibers. *Int J Biomater.* 2017; 2017:9034186. <https://doi.org/10.1155/2017/9034186>.
7. Александров В. Н., Кривенцов А. В., Михайлова Е. В., и др. Протезы из децеллюляризированной аорты и биорезорбируемого материала в эксперименте in vivo // *Вестник Российской военно-медицинской академии.* 2017. Т. 2, № 58. С. 120-125. [Alexandrov VN, Kriventsov AV, Mikhailova EV, et al. Prostheses from the decellularized aorta and bioresorbable material in vivo, *Bulletin Of The Russian Military Medical Academy.* 2017;2(58):120-125. (In Russ.)].
8. Durko AP, Yacoub MH, Kluin J. Tissue Engineered Materials in Cardiovascular Surgery: The Surgeon's Perspective. *Front Cardiovasc Med.* 2020;15(7):55. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2020.00055>.
9. Jakimowicz T, Przywara S, Turek J, et al. Five Year Outcomes in Patients with End Stage Renal Disease Who Received a Bioengineered Human Acellular Vessel for Dialysis Access. *EJVES Vasc Forum.* 2022;10(54):58-63. <https://doi.org/10.1016/j.ejvsyf.2022.01.003>.
10. Herrmann FEM, Lamm P, Wellmann P, et al. Autologous endothelialized vein allografts in coronary artery bypass surgery – Long term results. *Biomaterials.* 2019;212:87-97. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.05.019>.
11. Desai M, Seifalian AM, Hamilton G. Role of prosthetic conduits in coronary artery bypass grafting. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2011;40(2):394-398. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2010.11.050>.
12. Weber C, Reinhardt S, Eghbalzadeh K, et al. Patency and in vivo compatibility of bacterial nanocellulose grafts as small-diameter vascular substitute. *J Vasc Surg.* 2018;68(6S):177S-187S.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2017.09.038>.

**Информация об авторах**

**Кривенцов Александр Викторович** – канд. мед. наук, врач сердечно-сосудистый хирург, руководитель кардиохирургического отделения, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-1680-4914.

**Александров Виктор Николаевич** – д-р мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0009-0001-9229-5293.

**Попрядухин Павел Васильевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0001-5478-5630.

**Юкина Галина Юрьевна** – канд. биол. наук, доцент, зав. научной лаборатории патоморфологии Научно-клинического центра патоморфологии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0001-8888-4135.

**Иванькова Елена Михайловна** – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории № 8 механики полимеров и композиционных материалов, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-4823-0695.

**Юдин Владимир Евгеньевич** – д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник руководитель лаборатории № 8 механики полимеров и композиционных материалов, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-5517-4767.

**Матросов Владимир Владимирович** – ординатор по специальности «сердечно-сосудистая хирургия», Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0009-0007-7631-9818.

**Хубулава Геннадий Григорьевич** – д-р мед. наук, профессор, академик РАН, руководитель НИЦ ССХ, Первый Санкт-

Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0002-9242-9941.

**Authors information**

**Krivencov Alexandr V.** – Candidate (PhD) of Medical Sciences, Cardiovascular Surgeon, Head, Cardiac Surgery Department, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-1680-4914.

**Alexandrov Viktor N.** – Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0009-0001-9229-5293.

**Popryadukhin Pavel V.** – Candidate (PhD) of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0001-5478-5630.

**Yukina Galina Yu.** – Candidate (PhD) of Biological Sciences, Associate Professor, Head, Scientific and Clinical Center of Pathomorphology, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0001-8888-4135.

**Ivankova Elena M.** – Candidate (PhD) of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Polymers and Composite Materials № 8, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-4823-0695.

**Yudin Vladimir E.** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Head of Laboratory № 8 Mechanics of Polymers and Composite Materials, Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-5517-4767.

**Matrosov Vladimir V.** – Resident in Cardiovascular Surgery, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0009-0007-7631-9818.

**Khbulava Gennady G.** – Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Medical Sciences, Head, Research Center for Cardiovascular Surgery, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: 0000-0002-9242-9941.