

УДК 616.15-002

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.052](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.052)

Биомеханические модели для исследования коллатерального кровотока и напряжения при окклюзии глубоких вен нижних конечностей

Л.Н. Комарова^{1,2✉}, О.В. Тихоненкова³, Е.А. Николаева³, У.В. Комарова⁴,
В.Г. Мартынов⁵

¹Тюменский государственный медицинский университет, Тюмень,
Российская Федерация

²Частное учреждение здравоохранения «КБ РЖД – Медицина», Тюмень,
Российская Федерация

³Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация

⁵Областная клиническая больница №2, Тюмень, Российская Федерация

Резюме. Актуальность проведенного исследования обусловлена высокой распространенностью венозных тромбозомболических осложнений во всем мире и необходимостью междисциплинарного углубленного изучения и совершенствования подхода к диагностическим и лечебно-профилактическим мероприятиям при остром тромбозе глубоких вен. Относительно мало научных работ, посвященных изучению коллатерального кровотока, являющегося важным механизмом компенсации нарушений венозного кровообращения. В связи с этим применена методика компьютерного моделирования в среде SolidWorks, которая позволила изучить коллатеральный кровоток в разных венах нижних конечностей и уровень напряжения в области подколенной вены и перед полной окклюзией общей бедренной вены у пациентки, перенесшей острый илеофemorальный тромбоз. При выполнении работы использованы компьютерные томограммы и ангиограммы, их интерпретация осуществлена через программу Micro Dicom. По срезам томограмм в программе SolidWorks построены компьютерные биомеханические 3D-модели вен с тромботическими массами. Проведен анализ давления потока и напряжения в глубоких и подкожных венах нижних конечностей. В статье показано, что коллатеральные вены выполняют функцию альтернативных путей для венозного оттока крови, их просвет и пропускная способность могут увеличиваться в условиях нарушения гемодинамики. Наибольшее влияние на подколенную вену и общую бедренную вену оказывает тромбоз малой подкожной вены из-за особенностей анатомии и меньшего количества коллатералей, напряжение увеличивается в 2,3 и 1,6 раза соответственно. Материалы статьи представляют практическую ценность для сосудистых хирургов, флебологов, кардиохирургов.

Ключевые слова: острый тромбоз, биомеханика, коллатеральный кровоток, окклюзия, давление в вене, напряжение в вене, посттромботическая болезнь.

Для цитирования: Комарова Л.Н., Тихоненкова О.В., Николаева Е.А., Комарова У.В., Мартынов В.Г. Биомеханические модели для исследования коллатерального кровотока и напряжения при окклюзии глубоких вен нижних конечностей. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2101> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.052

Biomechanical models for studying collateral blood flow and tension in deep veins occlusion of the lower extremities

L.N. Komarova^{1,2}, O.V. Tikhonenkova³, E.A. Nikolaeva³, U.V. Komarova⁴,
V.G. Martynov⁵

¹Tyumen State Medical University, Tyumen, the Russian Federation

²Private healthcare institution "KB RZD – Medicine", Tyumen, the Russian Federation

³St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg,
the Russian Federation

⁴Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation

⁵Regional Clinical Hospital No. 2, Tyumen, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is due to the high prevalence of venous thromboembolic complications worldwide and the need for an interdisciplinary in-depth study and improvement of the approach to diagnostic, therapeutic, and preventive measures for acute deep vein thrombosis. There are relatively few scientific studies on collateral blood flow, which is an important mechanism for compensating for venous circulation disorders. In this regard, a computer modeling technique was applied in the SolidWorks environment, which allowed us to study the collateral blood flow in different veins of the lower extremities and the level of tension in the popliteal vein and before the complete occlusion of the common femoral vein in a patient who had suffered acute iliofemoral thrombosis. The work was based on computer tomograms and angiograms, which were interpreted using the Micro Dicom program. Computer biomechanical 3D models of veins with thrombotic masses are constructed according to tomogram slices in the SolidWorks program. The analysis of flow pressure and tension in deep and subcutaneous veins of the lower extremities is carried out. The article shows that collateral veins perform the function of alternative paths for venous blood outflow, their lumen and capacity can increase in conditions of hemodynamic disorders. The greatest effect on the popliteal vein and the common femoral vein is caused by thrombosis of the small saphenous vein due to the peculiarities of anatomy and a smaller number of collaterals, the tension increases by 2.3 and 1.6 times, respectively. The materials of the article are of practical value for vascular surgeons, phlebologists, cardiac surgeons.

Keywords: acute thrombosis, biomechanics, collateral blood flow, occlusion, vein pressure, vein tension, post-thrombotic disease.

For citation: Komarova L.N., Tikhonenkova O.V., Nikolaeva E.A., Komarova U.V., Martynov V.G. Biomechanical models for studying collateral blood flow and tension in deep veins occlusion of the lower extremities. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2101> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.052

Введение

Острый тромбоз глубоких вен (ТГВ) и его отдаленное последствие – посттромботическая болезнь (ПТБ) – представляют собой серьезную проблему современной медицины [1, 2]. Эти состояния, часто протекающие скрытно, могут привести к значительным нарушениям качества жизни и даже угрожать жизни пациента. Понимание распространенности, механизмов развития и осложнений ТГВ и ПТБ является ключом к их своевременной диагностике и эффективному лечению [3, 4]. Традиционно лечение острого тромбоза фокусируется на фармакологических методах (антикоагулянты, тромболитики) и хирургических вмешательствах [5]. Однако все больше внимания уделяется изучению биомеханики – науки, исследующей механические свойства живых организмов и их взаимодействие с окружающей средой. И в контексте острого тромбоза, биомеханика открывает новые, порой неочевидные, но критически важные аспекты понимания и борьбы с этим заболеванием [6, 7]. Коллатеральный кровоток в венозной системе нижних конечностей представляет собой

физиологический феномен, характеризующийся перераспределением крови по коллатеральным (боковым) венозным сосудам в ответ на сужение или окклюзию магистрального венозного ствола.

Цель работы – изучить коллатеральный кровоток, давление в разных венах нижних конечностей и уровень напряжения в области подколенной вены (ПКВ) и перед полной окклюзией общей бедренной вены (ОБВ) у пациентки, перенесшей острый илеофemorальный тромбоз. Для реализации цели:

1) разработаны и построены содержательные модели с тромботическими массами в следующих венах голени: в глубоких, к которым относится суральная вена (СВ), малоберцовая вена (МБВ), задняя большеберцовая вена (ЗББВ) и в поверхностной вене, в частности, в малой подкожной вене (МПВ);

2) изучены в сравнительном аспекте диаграммы изменения давления в венозной системе при окклюзиях в разных венах нижних конечностей (МПВ, СВ, МБВ, ЗББВ);

3) изучено влияние местоположения тромба в сосудах на уровень напряжения в области ПКВ и перед полной окклюзией ОБВ.

Материалы и методы

В исследовании применена методика компьютерного моделирования в среде SolidWorks, которая позволила создать трехмерные модели глубоких и подкожных вен нижних конечностей на основе клинических и инструментальных данных пациентки, перенесшей острый илеофemorальный тромбоз, и провести анализ изменений кровотока. При исследовании состояния сосудов, кровоснабжающих нижние конечности, использованы инструментальные данные: КТ-ангиограммы и МРТ, полученные в отделении Центра МРТ-диагностики «Магнесия» г. Тюмени. Интерпретация сосудистых снимков, полученных на КТ и МРТ, осуществлена через программу Micro Dicom.

Результаты

Для изучения коллатерального эффекта было разработано четыре новых модели с тромбами в следующих венозных структурах: МПВ, СВ, МБВ, ЗББВ. Вены представлены на Рисунке 1, в программе Solidworks на Рисунке 2.

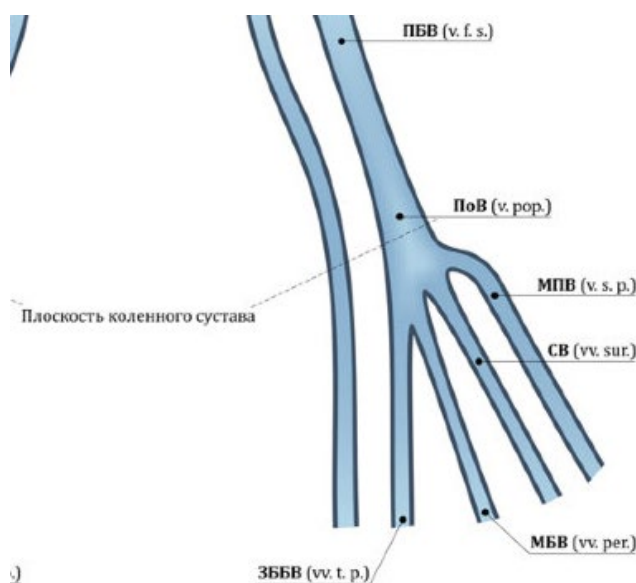


Рисунок 1 – Венозная структура нижних конечностей
Figure 1 – Venous structure of the lower extremities

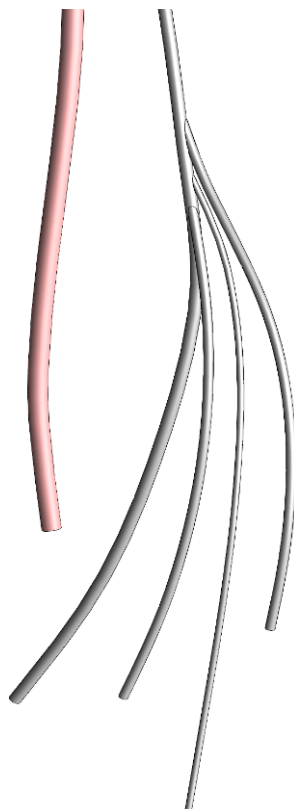


Рисунок 2 – Модель венозной структуры нижних конечностей в программе Solidworks
Figure 2 – Model of the venous structure of the lower extremities in the Solidworks program

На Рисунке 3 изображен тромб в СВ.

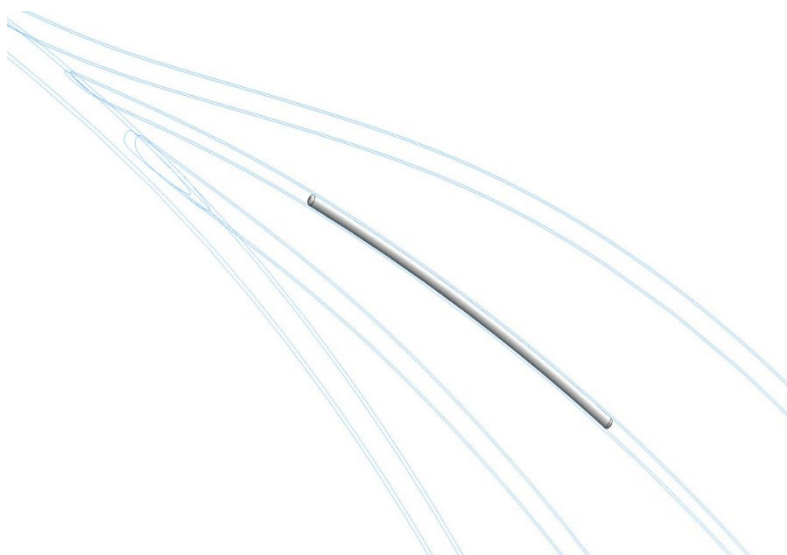


Рисунок 3 – Модель тромба в суральной вене
Figure 3 – Model of a blood clot in the bloodstream

На Рисунке 4 представлен результат работы программы Solidworks, показывающий исследование потока в МПВ с тромботическими массами, где измеряется давление в вене.

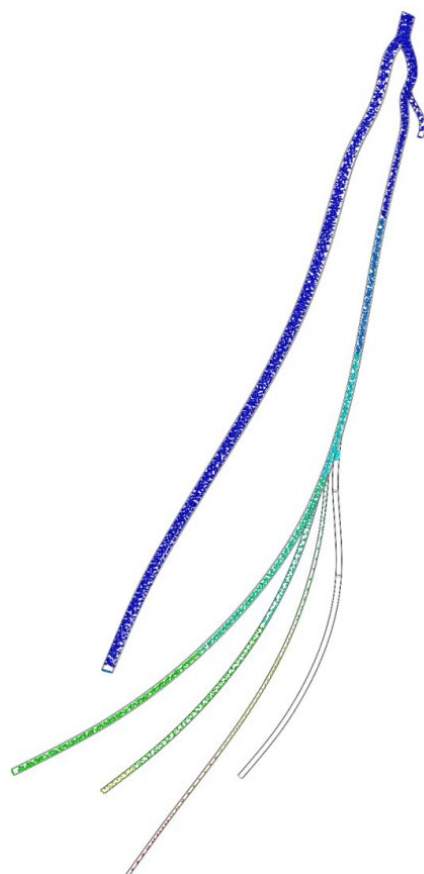


Рисунок 4 – Анализ давления потока в малой подкожной вене с тромботическими массами
Figure 4 – Analysis of flow pressure in the small saphenous vein with thrombotic masses

В Таблице 1 представлены результаты анализа давления потока в венах нижних конечностей.

Таблица 1 – Характеристики давления в венах нижних конечностей
Table 1 – Characteristics of pressure in the veins of the lower extremities

Параметр	Давление в МПВ, Па	Давление в СВ, Па	Давление в МБВ, Па	Давление в ЗББВ, Па
Окклюзия МПВ	0	1652	1101	825
Окклюзия СВ	1109	0	1304	829
Окклюзия МБВ	829	1382	0	1109
Окклюзия ЗББВ	784	786	1308	0

В рамках моделирования поток в вене, содержащей тромб, не рассчитывается, так как SolidWorks исключает воздействие потока на верхнюю граничную зону, что эквивалентно полной окклюзии сосуда на данном участке.

На Рисунках 5–8 приведены сравнительные диаграммы изменения давления в венозной системе при окклюзиях в разных венах (МПВ, СВ, МБВ, ЗББВ). Черной линией указано значение нормы давления в этих венах, измеренное при здоровых сосудах (928 Па).

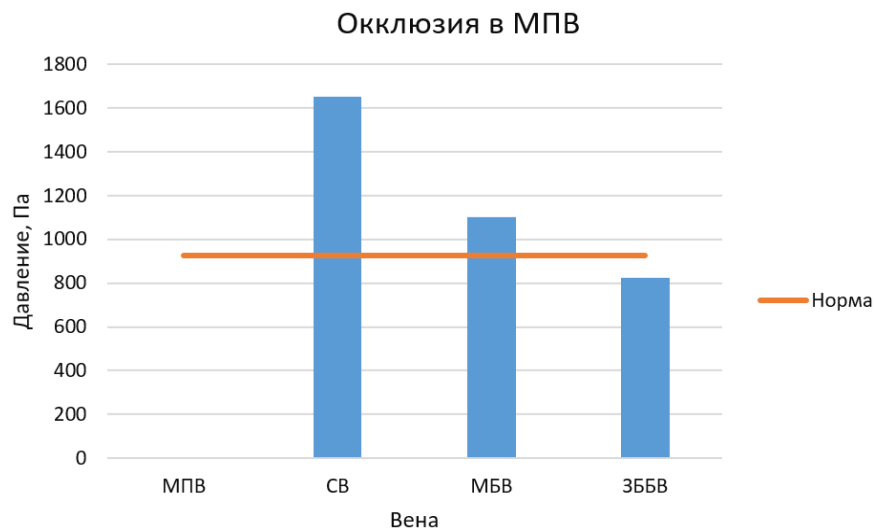


Рисунок 5 – Диаграмма давления при окклюзии в малой подкожной вене
Figure 5 – Pressure diagram during occlusion in the small saphenous vein

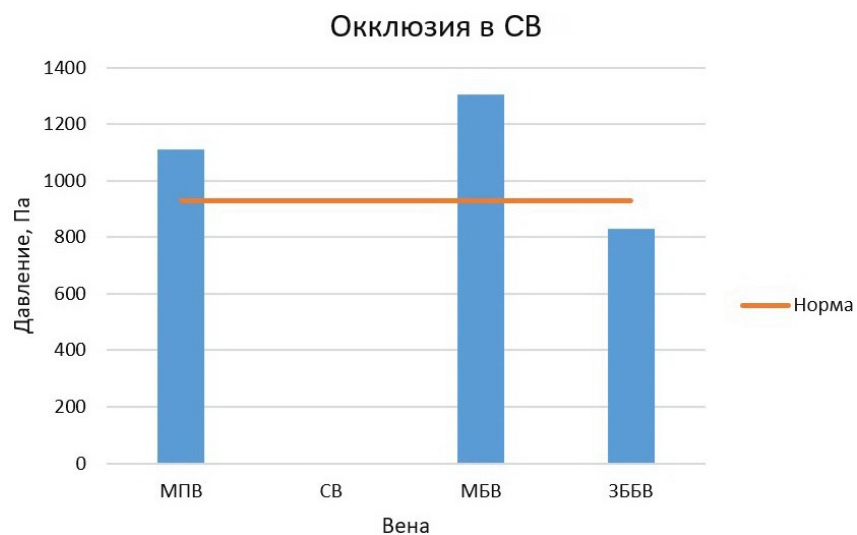


Рисунок 6 – Диаграмма давления при окклюзии в суральной вене
Figure 6 – Occlusion pressure diagram in the sural vein

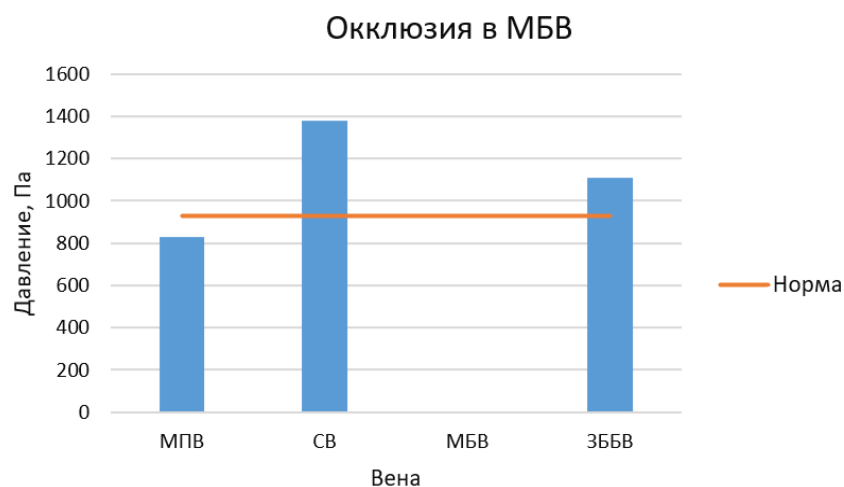


Рисунок 7 – Диаграмма давления при окклюзии в малоберцовой вене
Figure 7 – Occlusion pressure diagram in the peroneal vein

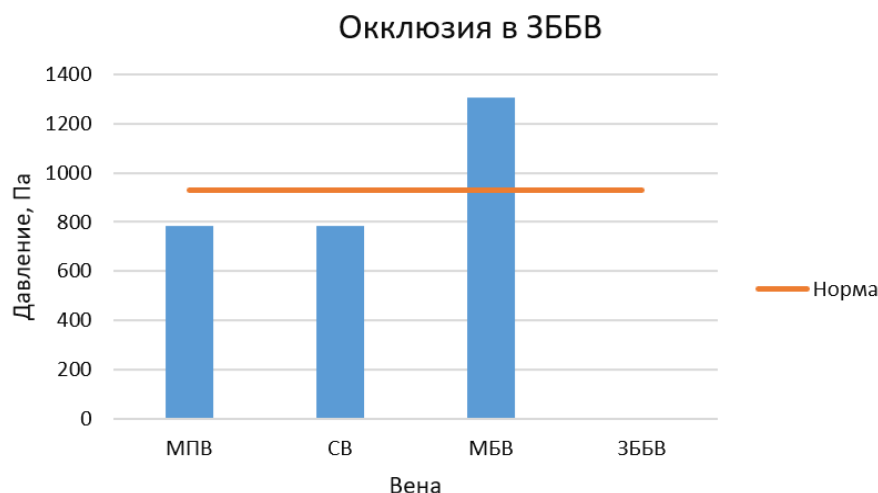


Рисунок 8 – Диаграмма давления при окклюзии в задней большеберцовой вене
Figure 8 – Occlusion pressure diagram in the posterior tibial vein

Результаты моделирования могут быть объяснены механизмами компенсации венозного оттока и анатомическими особенностями венозных связей. Вследствие этого ближайшая вена принимает на себя часть нагрузки. При тромбозе основной вены происходит перераспределение кровотока через анастомозы (естественные соединения между сосудами). Венозная сеть адаптируется, направляя кровь по альтернативным путям. Например, при тромбозе ЗББВ происходит перераспределение кровотока через МБВ и мышечные синусы, тем самым снижая нагрузку на магистральные вены. При тромбозе МПВ активируются перфорантные вены голени, которые соединяют поверхностную венозную систему с ПКВ. Ближайшая вена, принимая дополнительный объем крови, подвергается расширению, что увеличивает напряжение в ней даже при умеренном повышении давления. Это явление представляет собой компенсаторный механизм, направленный на поддержание адекватного венозного оттока. Однако длительное повышение давления в коллатеральных венах может привести к следующим последствиям: варикозному расширению вен, повреждению венозных клапанов, развитию хронической венозной недостаточности.

В дальнейшем интерес был направлен на изучение влияния местоположения тромба в сосудах на уровень напряжения в области ПКВ и перед полной окклюзией ОБВ при условии постоянства давления и механических характеристик материала.

В Таблице 2 представлены результаты анализа напряжения для четвертой группы исследований, проведенных на венах нижних конечностей.

Таблица 2 – Характеристики напряжения в венах нижних конечностей
Table 2 – Characteristics of venous pressure in the lower extremities

Параметр	Напряжение в ПКВ, Па	Напряжение в ОБВ, Па
Здоровые вены (норма)	3610	3525
Окклюзия МПВ	8411	5697
Окклюзия СВ	6243	4262
Окклюзия МБВ	7462	4912
Окклюзия ЗББВ	5466	4281

На Рисунке 9 приведен график зависимостей напряжения в ПКВ и ОБВ от местоположения окклюзии.

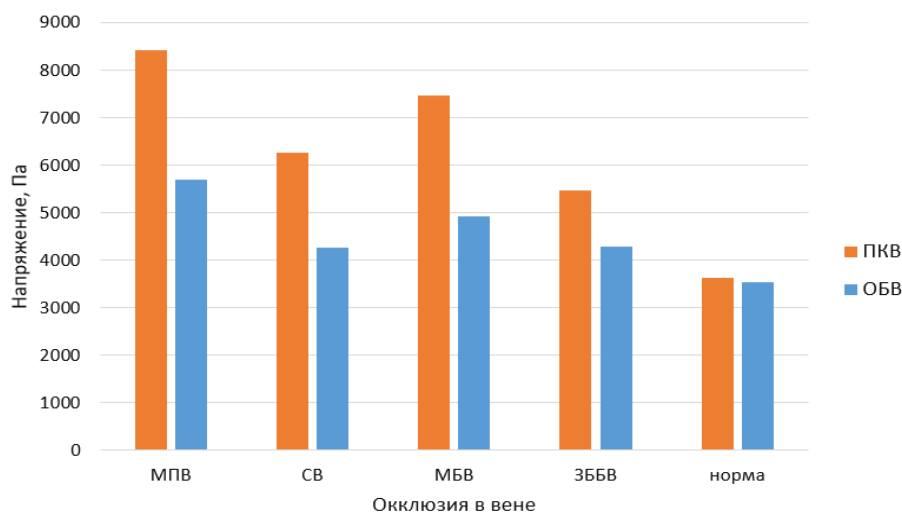


Рисунок 9 – Диаграмма напряжения в подколенной вене и общей бедренной вене при различном местоположении окклюзии
Figure 9 – Diagram of the voltage in the popliteal vein and common femoral vein at different locations of occlusion

В результате наибольшее влияние на подколенную и общую бедренную вену оказал тромбоз МПВ. В данном случае напряжение увеличилось в 2,3 и 1,6 раза соответственно. В ОБВ и ПКВ наблюдалось повышенное напряжение именно при тромбозе МПВ по сравнению с тромбозами суральной, малоберцовой и задней большеберцовой венами. Малая подкожная вена является поверхностной веной с меньшим количеством коллатералей по сравнению с глубокими венами (СВ, МБВ, ЗББВ). В случае тромбоза МПВ кровь не может эффективно миновать зону блокировки, что усиливает нагрузку на ПБВ и ОБВ.

Обсуждение

Влияние тромбоза МПВ на напряжение в ОБВ и ПКВ обусловлено анатомическими связями и гемодинамическими особенностями венозной системы. МПВ впадает в ПКВ через сафено-поплитеальное соустье. При тромбозе МПВ происходит значительное повышение давления в ПКВ, которое передается на ОБВ как следующее звено глубокой венозной системы. В результате тромбоз МПВ блокирует отток крови из поверхностной венозной системы в глубокую, что приводит к повышению давления в ПКВ и ОБВ, перегрузке стенок сосудов и увеличению механического напряжения. Результаты исследования подтверждают литературные данные [8]. При частичной окклюзии большой подкожной вены и полной окклюзии общей бедренной вены, когда напряжение в БПВ возрастает в 3,8 раза, важно осуществлять регулярный мониторинг венозного давления в БПВ и оценку градиента давления между БПВ и ОБВ [9, 10]. Важно контролировать давление в коллатеральных венах. Для анализа гемодинамики рекомендуется проведение ультразвукового дуплексного сканирования, которое позволяет определить скорость кровотока, степень компенсации кровотока через коллатерали и состояние венозных клапанов. В качестве профилактических мер рекомендуется применение компрессионной терапии (класс компрессии 2–3), поддержание физической активности и контроль массы тела. Прогноз в данном случае

характеризуется высоким риском развития венозной гипертензии и вероятностью возникновения трофических изменений, что требует регулярного медицинского наблюдения каждые 3–6 месяцев.

В случае наличия тромба в МПВ при здоровой БПВ и полной окклюзии ОБВ, когда напряжение в ПКВ возрастает в 2,3 раза, необходимо контролировать уровень D-димера и других маркеров тромбообразования. Рекомендуется проведение ультразвукового исследования вен нижних конечностей каждые 2 недели в течение первых двух месяцев и оценка проходимости БПВ. Для анализа гемодинамики следует измерять давление в ПКВ, сравнивать его с референсными значениями, проводить ультразвуковое дуплексное сканирование кровотока в МПВ и ПКВ, а также исследовать состояние венозных клапанов. Терапевтические рекомендации включают антикоагулянтную терапию под контролем международного нормализованного отношения, компрессионную терапию (класс компрессии 2) и поддержание активного образа жизни. Прогноз характеризуется умеренным риском развития посттромботического синдрома, что требует длительного медицинского наблюдения (каждые 3 месяца в течение первого года) и контроля за возможным распространением тромбоза.

Заключение

Результаты компьютерного биомеханического моделирования могут быть использованы как дополнительный диагностический инструмент при анализе венозного коллатерального кровотока при остром ТГВ нижних конечностей, а также в случае планирования оперативного вмешательства при ПТБ. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты позволяют более точно прогнозировать изменения в венозной гемодинамике при различных видах окклюзии, оценивать компенсаторные возможности венозной системы, определять наиболее критические зоны при развитии окклюзионных процессов и разрабатывать индивидуальные подходы к лечению и профилактике венозных заболеваний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Whing J., Nandhra S., Nesbitt C., Stansby G. Interventions for Great Saphenous Vein Incompetence. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2021;8(8). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005624.pub4>
2. Яровенко Г.В., Каторкин С.Е. Изменения в сердечно-сосудистой системе при посттромбофлебитической болезни нижних конечностей в стадии окклюзии. *РМЖ*. 2023;(5):2–5.
Yarovenko G.V., Katorkin S.E. Changes in the Cardiovascular System in Post-Thrombotic Syndrome Occlusion Stage of the Lower Extremities. *RMJ*. 2023;(5):2–5. (In Russ.).
3. Lu J., Fang Q., Ge X. Role and Mechanism of mir-5189-3p in Deep Vein Thrombosis of Lower Extremities. *Annals of Vascular Surgery*. 2021;77:288–295. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2021.07.004>
4. Innocenti F., Lazzari C., Ricci F., Paolucci E., Agishev I., Pini R. D-Dimer Tests in the Emergency Department: Current Insights. *Open Access Emergency Medicine*. 2021;13:465–479. <https://doi.org/10.2147/OAEM.S238696>
5. Vinay K., Nagaraj K., Arvinda H.R., Vikas V., Rao M. Design of a Device for Lower Limb Prophylaxis and Exercise. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*. 2020;9. <https://doi.org/10.1109/JTEHM.2020.3037018>
6. Meissner M.H., Moneta G., Burnand K., et al. The Hemodynamics and Diagnosis of Venous Disease. *Journal of Vascular Surgery*. 2007;46(Suppl. S):4S–24S. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2007.09.043>

7. Huisman L.C., Den Bakker C., Wittens C.H.A. Microcirculatory Changes in Venous Disease. *Phlebology*. 2013;28(Suppl. 1):73–78. <https://doi.org/10.1177/0268355513477025>
8. Анисимов А.В., Капустин Б.Б., Машковцева Г.В., Кузнецов П.А. Новый способ диагностики состояния регионарного кровотока нижних конечностей. *Современные проблемы науки и образования*. 2010;(2):24–27.
Anisimov A.V., Kapustin B.B., Mashkovtceva G.V., Kuznetsov P.A. New Method of Diagnostic State of Regional Blood Flow of the Lower Limbs. *Modern Problems of Science and Education*. 2010;(2):24–27. (In Russ.).
9. Tseng Yu.-H., Chen Ch.-W., Wong M.-Y., et al. Blood Flow Analysis of the Great Saphenous Vein in the Su-Pine Position in Clinical Manifestations of Varicose Veins of Different Severities: Application of Phase-Contrast Magnetic Resonance Imaging Data. *Diagnostics*. 2022;12(1). <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010118>
10. Власов Т.Д., Яшин С.М. Артериальные и венозные тромбозы. Всегда ли применима триада Вирхова? *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2022;21(1):78–86. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2022-21-1-78-86>
Vlasov T.D., Yashin S.M. Arterial and Venous Thrombosis. Is the Virchow's Triad Always Valid? *Regional Blood Circulation and Microcirculation*. 2022;21(1):78–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2022-21-1-78-86>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Комарова Лидия Николаевна, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры хирургии с курсом эндоскопии, Тюменский Государственный медицинский университет, Тюмень, Российская Федерация.
e-mail: lnkomarova@mail.ru
ORCID: [0000-0001-6546-4568](https://orcid.org/0000-0001-6546-4568)

Lidiya N. Komarova, Doctor of Medical Sciences, Docent, Professor at the Department of Surgery with a course in endoscopy, Tyumen State Medical University, Tyumen, the Russian Federation.

Тихоненкова Оксана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой биотехнических систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: krivohizhinaov@gmail.com
ORCID: [0000-0001-5896-2905](https://orcid.org/0000-0001-5896-2905)

Oksana V. Tikhonenkova, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Department of Bioengineering Systems and Technologies, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, the Russian Federation.

Николаева Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнических систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: lenlea28@gmail.com
ORCID: [0000-0003-3200-1262](https://orcid.org/0000-0003-3200-1262)

Elena A. Nikolaeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Biotechnical Systems and Technologies, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, the Russian Federation.

Комарова Ульяна Викторовна, студентка Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.
e-mail: uvkomarova08@gmail.com
ORCID: [0009-0009-2787-2101](https://orcid.org/0009-0009-2787-2101)

Ulyana V. Komarova, Student of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation.

Мартынов Владимир Геннадьевич, заведующий
сосудистым отделением Областной клинической
больницы №2, Тюмень, Российская Федерация.
e-mail: vlad-i-mir.79@mail.ru
ORCID: [0009-0004-6609-3374](https://orcid.org/0009-0004-6609-3374)

Vladimir G. Martynov, Head of the Vascular
Department of the Regional Clinical Hospital
No. 2, Tyumen, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 21.10.2025; одобрена после рецензирования 21.11.2025;
принята к публикации 04.12.2025.*

*The article was submitted 21.10.2025; approved after reviewing 21.11.2025;
accepted for publication 04.12.2025.*