

ХИРУРГИЯ

УДК 612.76

О компьютерном моделировании кровотока в артериях ног

*Б. С. Артюшин^{1,3}, К. Н. Мовчан^{2,3}, Е. А. Лебедева⁴,
М. А. Бондаренко⁴, К. И. Русакевич², Р. Б. Исхаков²*

¹ Северо-Западный Федеральный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Российская Федерация, 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, 2

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 191015, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, 41

³ Медицинский информационно-аналитический центр, Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, ул. Шкапина, 30

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Для цитирования: Артюшин Б. С., Мовчан К. Н., Лебедева Е. А., Бондаренко М. А., Русакевич К. И., Исхаков Р. Б. О компьютерном моделировании кровотока в артериях ног // Вестник Санкт-Петербургского университета. Медицина. 2018. Т. 13. Вып. 1. С. 24–37. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu11.2018.103>

Используемые в медицинской практике схемы оценки состояния артериального русла и прогнозирования результатов лечения не всегда себя оправдывают. Разработка новых методов оценки состояния артериального русла, прогнозирования течения атеросклероза артерий нижних конечностей, выбора оптимального способа реваскуляризации артериального русла ног представляет собой актуальную задачу науки и практики. На основании параметров, полученных при анализе данных инструментального обследования 10 человек (компьютерная томография, ультразвуковое исследование сосудов нижних конечностей), созданы математические модели кровотока в артериях ног при разной локализации их окклюзионно-стенотического поражения. Степень стенотических изменений стандартизирована: 20, 50 и 75 %, окклюзия артерии. Оценены изменения кровотока, возникающие при изолированном и сочетанном поражении артерий. Доказано: скорость кровотока при стенозе артерии ног увеличивается; сужение артерий голени более, чем на 65 % значительно обедняет кровоток, а при стенозе сосудов более 75 % кровоток практически прекращается; при сочетанном окклюзионно-стенотическом поражении нескольких артерий значимое нарушение кровотока отмечается уже при стенозах свыше 50 %. Окклюзионно-стенотическое поражение не только ухудшает кровоток в артериях, но и отрицательно влияет на гемодинамику в других сосудах.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

дах нижних конечностей. Моделирование расстройств кровотока в сосудах ног может быть эффективной технологией при обследовании и лечении пациентов с несостоятельностью артериального снабжения нижних конечностей.

Ключевые слова: окклюзионно-стенотическое поражение сосудов, компьютерное моделирование, атеросклероз, нарушение кровотока, артерии нижних конечностей.

Введение

Жители Российской Федерации так же, как и население многих других стран, в существенной степени подвержены заболеваниям сердечно-сосудистой системы [1]. Случаи окклюзионно-стенотического поражения артериального русла нижних конечностей составляют не менее 20 % среди наблюдений сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) [2; 3].

Причиной окклюзионно-стенотических поражений артерий ног наиболее часто является атеросклероз (АТС). Почти в половине наблюдений АТС-поражений артерий выявляется неадекватность кровоснабжения в их круро-поплитеальных сегментах [4]. Операция продолжает быть основной технологией оказания медицинской помощи больным АТС, а показанием к осуществлению реваскуляризации — степень их ишемии [4; 5].

Уровень несостоятельности сосудистого русла нижних конечностей оценивается по Покровскому-Фонтейну [5] и Рутерфорду [6; 7] при использовании специальных критериев [6; 8]. Однако, как полагает ряд исследователей, результаты обследования и лечения, проводимые по этим критериям, не всегда могут быть оптимальны [7; 9]. Сосудистые хирурги нередко вместо неудобных диагностических схем предпочитают ориентироваться сугубо на собственный опыт в оказании медицинской помощи больным с окклюзионно-стенотическими изменениями в сосудах нижних конечностей [8]. В современной медицинской практике есть возможность посредством прикладных информационных систем точно верифицировать и прогнозировать течение заболевания [10; 11]. Моделируя кровообращение в артериальном русле ног, можно определять выраженность влияния окклюзионно-стенотических изменений в сосудах в плане развития нарушений гемодинамики и тканевой гипоксии сегментов нижних конечностей. Решение задач по моделированию технологии оценки кровотока важно не только в плане фундаментальных исследований медико-технических направлений научной деятельности, но и в прикладном для сосудистой хирургии значении, поскольку позволяет не только осуществлять прогноз течения и исход АТС-поражения сосудов, но и аргументированно проводить выбор способов реваскуляризации артерий ног.

Цель проводимого исследования: на основании биомеханических технологий моделирования кровообращения определить критерии оценки выраженности окклюзионно-стенотического поражения в артериальных сосудах нижних конечностей.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования для моделирования выбраны подколенные и берцовые артерии. Геометрия этих сосудов модифицирована допуском ряда упрощений: жесткая фиксация артерии; выбор в качестве поверхности, контакти-

рующей с текучей средой идеально изолированной стенки сосуда; показатели давления на входе в подколенную артерию — 10 кПа; параметр скорости кровотока в сосуде — 40 см/с.

Математическая модель артерий нижних конечностей создавалась посредством программы SolidWorks-2013 по алгоритму: 1) ввод геометрических примитивов; 2) создание из последних элементарных моделей подколенной артерии (ПКА), передней и задней большеберцовых артерий (ПББА и ЗББА), малоберцовой артерии (МБА); 3) конструирование исследуемого объекта (рис. 1).

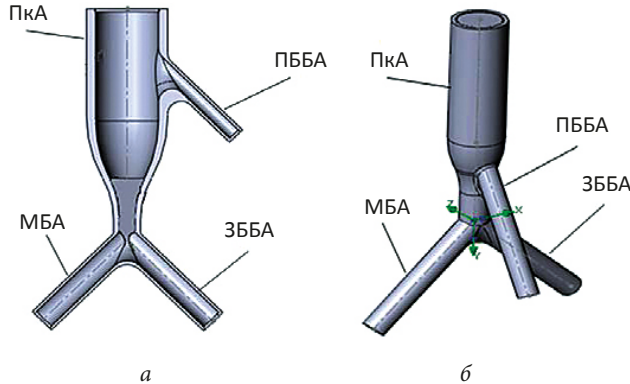


Рис. 1. Виды моделей артерий нижних конечностей: а — схема, б — объемное изображение

Модели артерий выстраивались при значениях геометрических параметров: ПКА: диаметр ($D_{ж}$) — 7 мм, толщина стенки артерии (h_c) — 1 мм, длина сосуда (L) — 25 см; ПББА: $D_{ж} = 3$ мм, $h_c = 1$ мм, L = 20 см; ЗББА: $D_{ж} = 3$ мм, $h_c = 1$ мм, L = 20 см; МБА: $D_{ж} = 1,6$ мм, $h_c = 1$ мм, L = 20 см. Эти исходные показатели формировались на основе анализа данных обследования 10 человек посредством специальных неинвазивных (инструментальных) технологий (компьютерная томография, ультразвуковое исследование сосудов нижних конечностей). Параметры

кровотока, смоделированные в неизмененных артериях ног, использованы в дальнейшем как эталон (рис. 2).

Показатели гемодинамики оценены в артериях круро-плечтеального сегмента нижних конечностей при разной локализации и степени АТС-поражения. Выраженность окклюзионных поражений в артериях стандартизирована: стеноз 20, 50 и 75 % просвета сосуда, его окклюзия. Учитывались особенности локализации АТС-бляшек в сосудах как в приустьевых, так и в дистальных отделах артерий. Отдельно анализировались особенности гемодинамических расстройств, возникающих при изменениях в нескольких артериальных стволах.

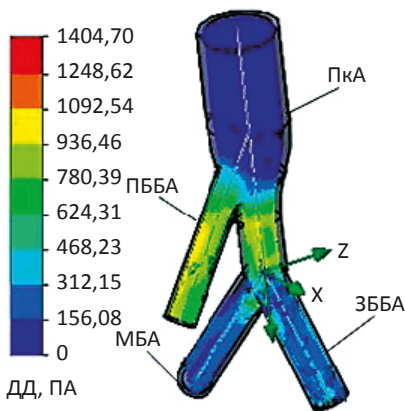


Рис. 2. Количественные показатели гемодинамики в интактных артериях нижних конечностей, соотнесенные с эпюрным изображением

Результаты исследования гемодинамических параметров при АТС-поражении ПББА

Моделирование кровотока осуществлено при изолированной локализации АТС-бляшки в устье ПББА (рис. 3а). Колебания гемодинамических показателей в просвете артерий голени оценивались по эпюрам динамического давления (рис. 3б–г).

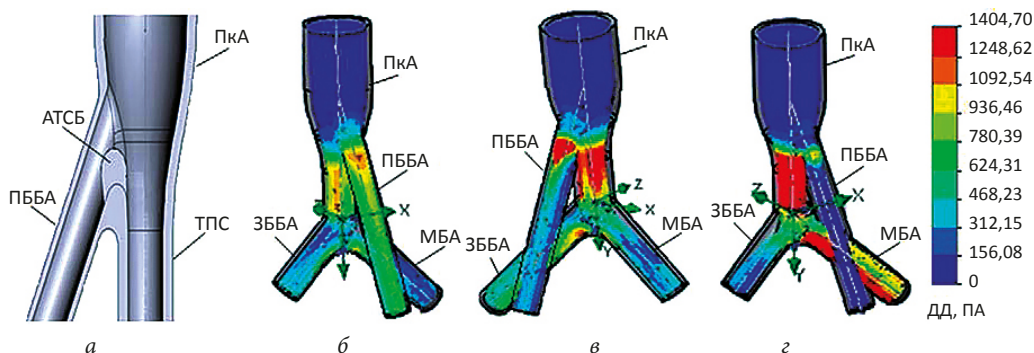


Рис. 3. Варианты моделей гемодинамики в зоне отхождения ПББА от ПКА (а) при стенотическом поражении 20% (б), 50% (в), 75% (г)

На основании показателей динамического давления можно сделать вывод, что при увеличении степени стенотического поражения ПББА интенсивность кровотока в ней снижается с компенсаторным ее увеличением в ЗББА. Значение параметров кровотока в МБА и ПКА при этом остаются практически неизменными. Результаты исследования динамики в показателях статического давления и скорости кровотока в артериях голени отражены на рис. 4.

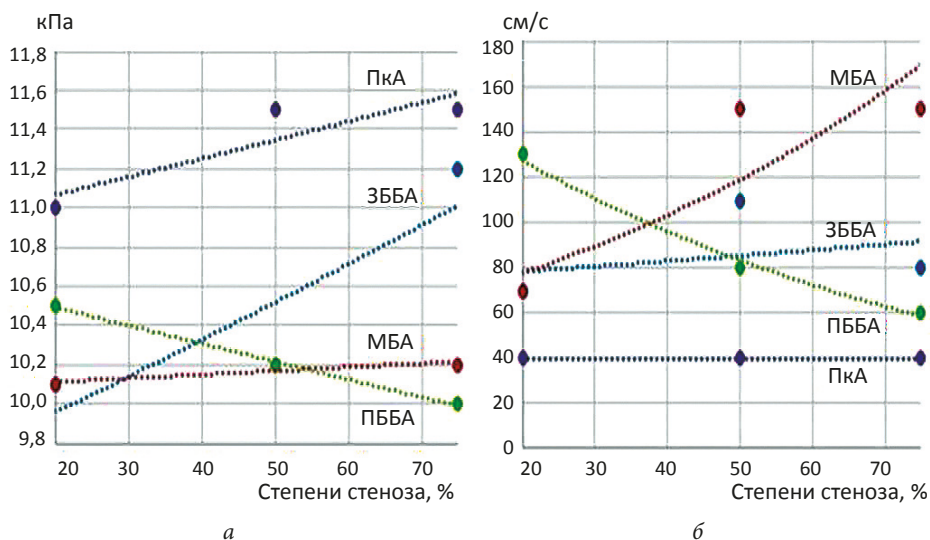


Рис. 4. Изменения параметров: а — статического давления; б — скорости кровотока при локализации АТС в месте отхождения ПББА от ПКА

Оценка изменений статического давления позволяет констатировать его рост в ПкА и ЗББА на фоне снижения в ПББА. В случаях нарастания выраженности стенотического поражения устья ПББА за счет наименьшего диаметра скорость кровотока повышается в МБА (в ЗББА и ПкА остается практически неизменной), а в ПББА — уменьшается.

При локализации АТС-бляшки в дистальной части ПББА показатели кровотока несколько отличаются от таковых при ее поражении в проксимальных отделах (рис. 5).

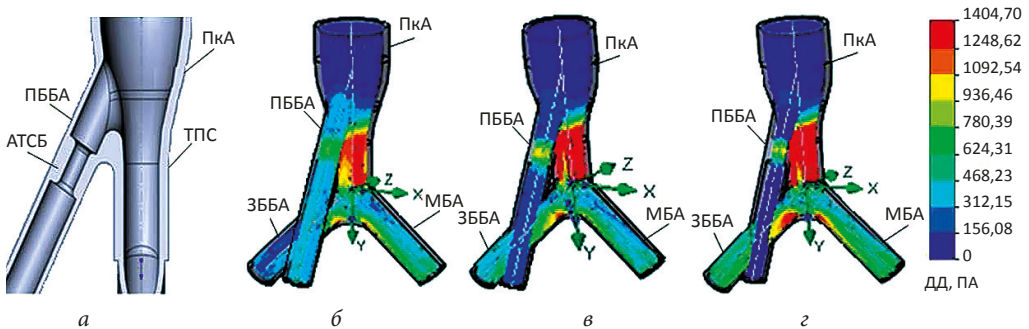


Рис. 5. Варианты изображения моделей кровотока при АТС-поражении ПББА (а) с разной выраженностью стенотического поражения: 20 % (б), 50 % (в), 75 % (з)

По мере уменьшения просвета ПББА в месте бифуркации тибіоперонеального ствола (ТПС) на ЗББА и МБА констатируется явное увеличение параметров динамического давления (рис. 5б–з).

Гемодинамические показатели в ПББА при увеличении стенотического поражения снижаются. Параметры статического давления и скорости кровотока оценены посредством моделей АТС-поражения ПББА разной выраженности (рис. 6).

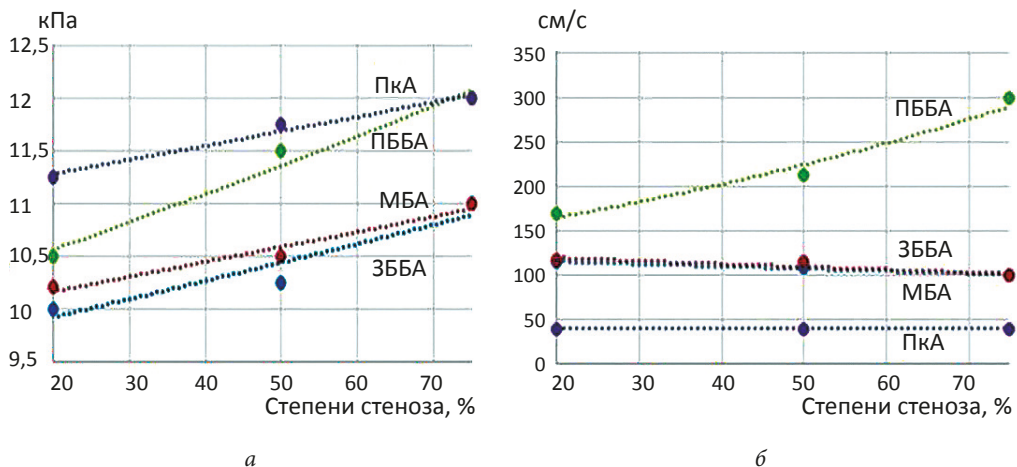


Рис. 6. Динамика показателей: а — статического давления; б — скорости кровотока в случаях разных степеней стеноза ПББА

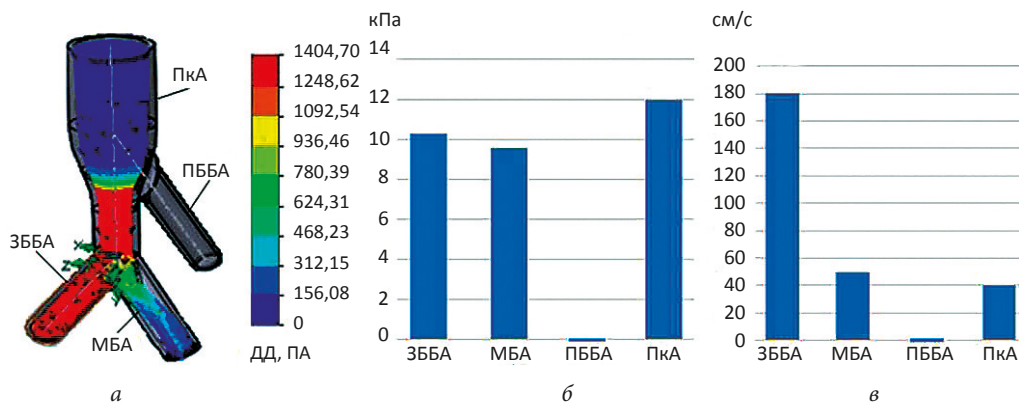


Рис. 7. Значения динамического давления (а), статического давления (б), скорости кровотока (в) в случае окклюзии ПБА

Повышение значений статического давления в случаях нарастания степени АТС-поражения ПБА происходит во всех сосудистых коллекторах (преимущественно в ПКА). Показатели скорости кровотока в ЗБА и МБА почти не снижаются, однако в случаях увеличения выраженности стенотического поражения ПБА констатируется явное ускорение тока крови. В ПКА скорость кровотока остается неизменной.

В случаях окклюзии ПБА кровоток устремляется в ТПС, а впоследствии — в наиболее крупную его ветвь — ЗБА. Таким образом, наиболее выраженные изменения динамического давления происходят в этом артериальном сосуде (более 1400 Па). Гемодинамические параметры в МБА несколько возрастают, но показатель динамического давления составляет не более 800 Па (рис. 7а).

В подколенной и малоберцовой артериях скорость кровотока остается практически неизменной, однако выражено нарастает в задней большеберцовой артерии (до 180 см/с), (рис. 7б).

При окклюзии ПБА параметры давления в ПКА несколько возрастают (12 КПа при норме — 10 КПа). Тем не менее к гемодинамически значимым отнести эти изменения не представляется возможным.

Результаты исследования параметров гемодинамики при атеросклеротическом поражении ветвей ТПС

Показатели динамического давления на основании анализа вариантов эпюр на модели локализации АТС-бляшки (АТСБ) в области бифуркации ТПС остаются стабильными во всех артериях при любой стадии окклюзионно-стенотического поражения (рис. 8).

Незначительные изменения демонстрируются на диаграммах статического давления и скорости кровотока (рис. 9).

В случаях усугубления стенотического поражения статическое давление в ЗБА и МБА почти не изменяется, а в ПБА и ПКА — возрастает на 400 и 300 Па (3 и 2,3 мм рт. ст. соответственно), т. е. также незначительно. Одновременно скорость кровотока возрастает во всех артериях (кроме подколенной).

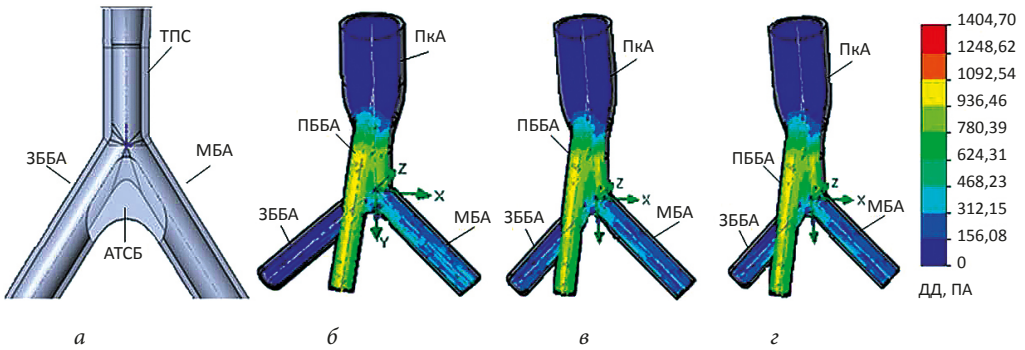


Рис. 8. Варианты показателей кровотока в гемодинамической модели при локализации АТСБ в области бифуркации ТПС (а) со стенозированием: 20 % (б), 50 % (в), 75 % (г)

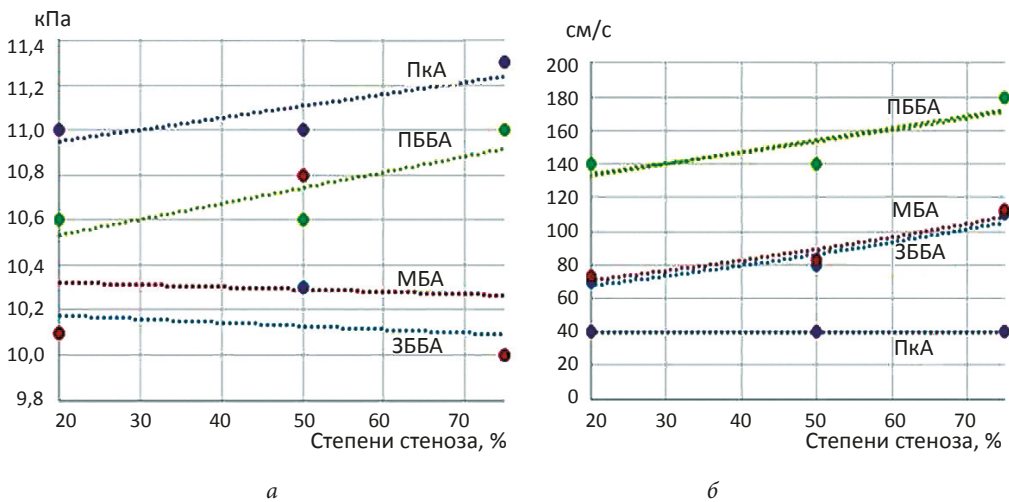


Рис. 9. Динамика показателей: а — статического давления и б — скорости кровотока в артериях ног при вариантах выраженности АТСБ между ЗББА и МБА

По итоговым результатам оценки значений показателей кровообращения при солитарных стенозах задней большеберцовой и малоберцовой артерий они не отличаются, несмотря на определенную разницу в диаметре внутреннего просвета этих сосудов — соответственно 3,0 и 1,6 мм (рис. 10, 11).

В случаях солитарного поражения ЗББА или МБА в сосуде, подверженном патологическому процессу, динамическое давление снижается, а при сужении просвета артерии, превышающем 75 %, кровоток практически не определяется. Интенсивность тока крови в ПкА сохраняется, а в ПББА и непораженной ветви ТПС отмечается явное компенсаторное возрастание параметров гемодинамики.

При увеличении выраженности атеросклеротического поражения ЗББА и МБА динамика параметров статического давления и скорости кровотока оказывается стабильной (рис. 12).

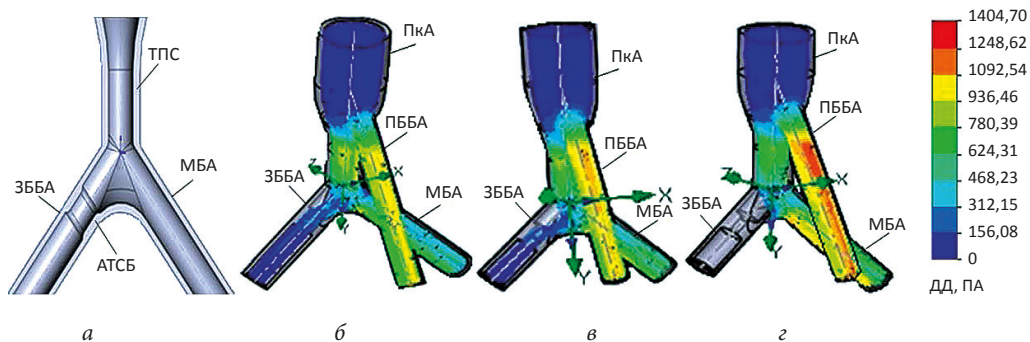


Рис. 10. Вариации кровотока в нижних конечностях с АТС ЗБА (а) при сужении просвета сосуда: 20% (б), 50% (в), 75% (з)

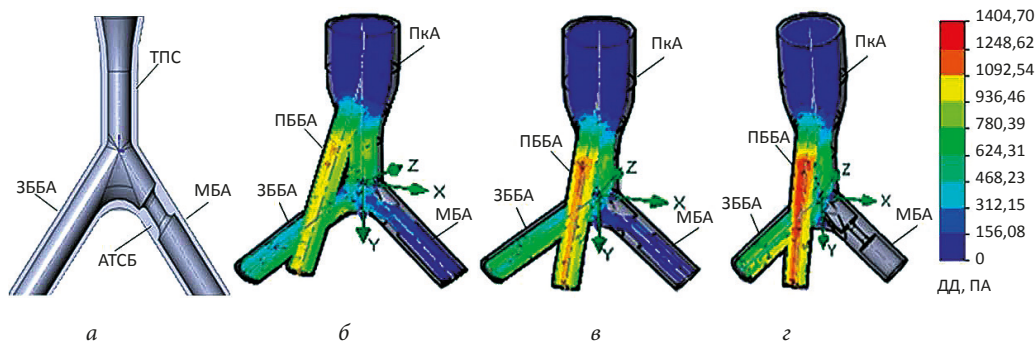


Рис. 11. Вариации кровотока нижних конечностей при стенозировании АТСБ просвета МБА (а): 20% (б), 50% (в), 75% (з)

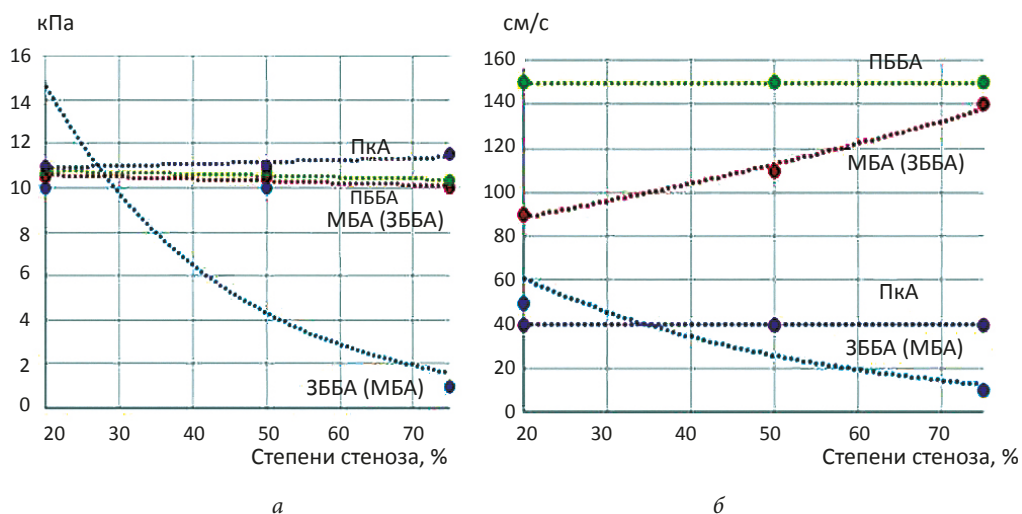
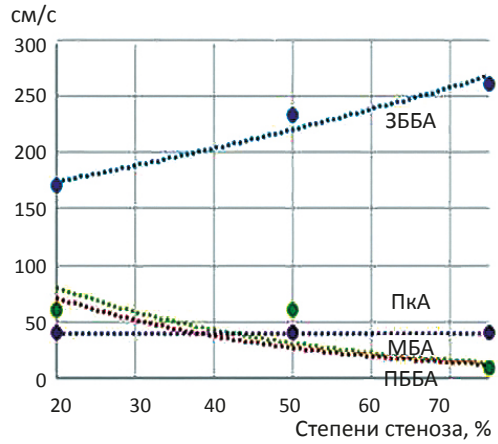
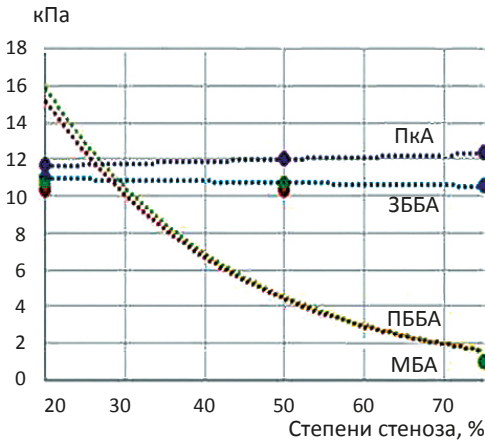


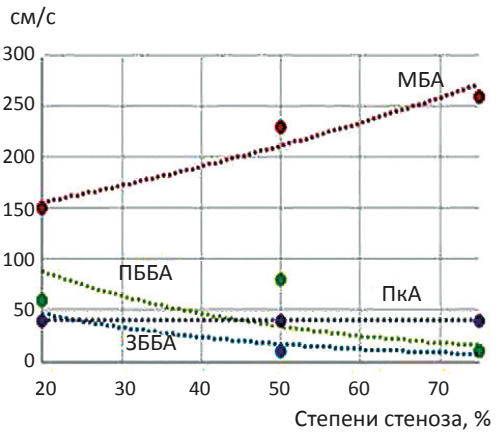
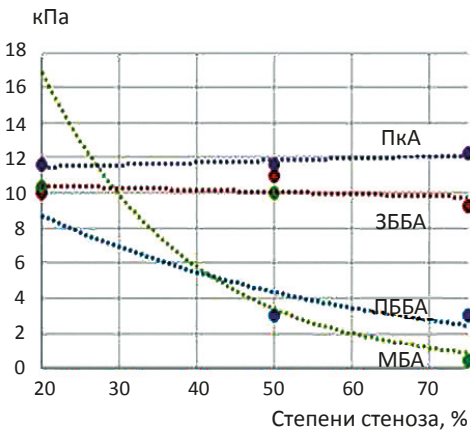
Рис. 12. Динамика показателей: а — статического давления; б — скорости кровотока в случаях разной зрелости АТСБ в ЗБА (МБА)



а

б

Рис. 13. Динамика показателей: а — статического давления; б — скорости кровотока при разной выраженности сочетания АТС-стенозирования ПБА и ЗБА



а

б

Рис. 14. Динамика показателей: а — статического давления; б — скорости кровотока при разной степени АТС-поражения в ПБА и МБА

В частности, статическое давление остается неизменным во всех интактных сосудах, его падение констатируется лишь в пораженной артерии (при сужении просвета сосуда, превышающем 65 %, оно приближается к нулю). В ПкА и ПБА гемодинамические показатели стабильны. Трансформация скорости кровотока отмечается преимущественно в ветвях ТПС: в измененном артериальном стволе очевидно ее снижение, тогда как в интактной артерии — нарастание.

При комбинированном стенозе задней большеберцовой и малоберцовой артерий (см. рис. 10, 11) изменения гемодинамики по сути не отличаются от таковых при стенозе передней большеберцовой артерии (см. рис. 6).

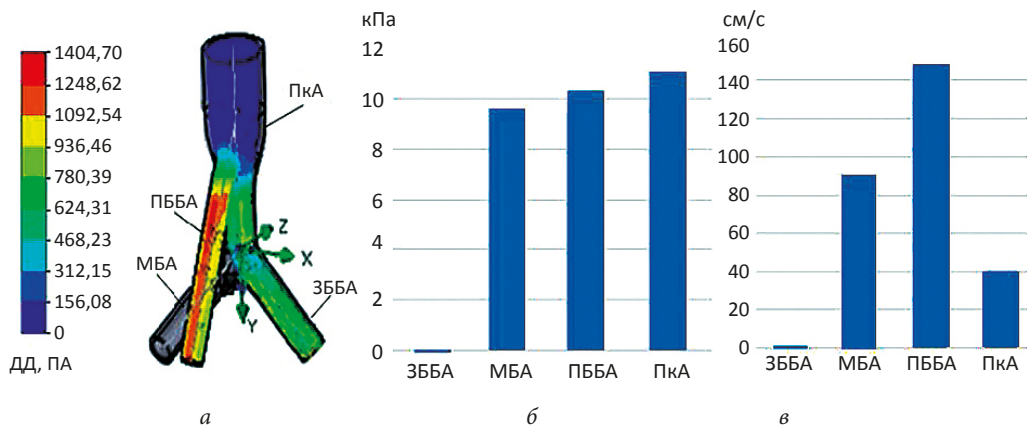


Рис. 15. Динамика параметров: а — динамического давления, б — статического давления; в — скорости кровотока в случае окклюзии ЗББА

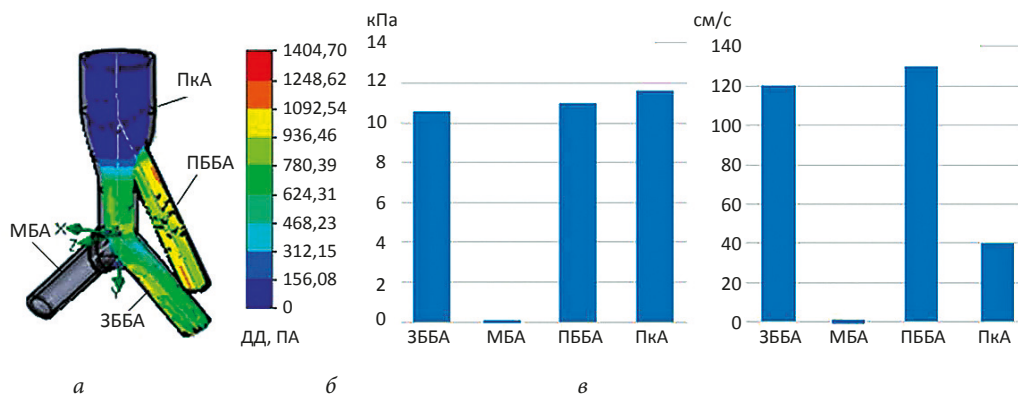


Рис. 16. Динамика показателей кровообращения (а), статического давления (б) и скорости кровотока (в) в артериях нижних конечностей при окклюзии МБА

Данные о значениях параметров кровотока при взаимодействии атеросклеротической бляшки на показатели кровотока в ПББА (см. рис. 5) и ЗББА (см. рис. 10) при разной степени поражения сосудов представлены на рис. 13.

В случаях одновременного нарастания сужения просвета ПББА и ЗББА статическое давление в них стремится к нулю, в то время как в ПКА и МБА оно остается стабильным. Параметры скорости кровотока при данном варианте модели умеренно возрастают в МБА, в ПКА остаются на прежнем уровне, а в ЗББА и МБА показатели гемодинамики существенно уменьшаются, приближаясь к нулевой отметке.

Параметры кровообращения с учетом степени взаимоотношения атеросклеротических поражений ПББА и МБА (см. рис. 5, 11) отражены на рис. 14.

Обусловленность значений статического давления и скорости кровотока выраженностью стенозов, отраженная на рис. 14, свидетельствует о том, что при увеличении степени стенотического поражения ПББА и МБА скорости кровотока

ка в них значительно снижается и определенно возрастает в ЗББА. Показатели статического давления в МБА и ПББА также в процессе усиления стеноза сосудов стремятся к нулю. В ПКА и ЗББА параметры статического давления не изменяются.

Гемодинамические модели сосудов нижних конечностей в случаях стенотического поражения задней большеберцовой и малоберцовой артерий представлены на рис. 15 и 16.

Динамика изменений в параметрах динамического давления в случаях полного закрытия просвета ЗББА в большей степени отмечается в бассейне ПББА с повышением показателей давления до 1,0–1,2 кПа. При этом наивысшие показатели отмечаются в ПКА (11 кПа), а знаковые параметры скорости кровотока констатируются при оценке кровотока в ПББА (до 150 см/с).

Изменения динамического давления в случаях окклюзии малоберцовой артерии практически совпадают с таковыми при окклюзии задней большеберцовой артерии (см. рис. 16).

При окклюзии МБА показатели динамического давления в ПББА составляют 1,0–1,2 кПа, в ТПС и ЗББА они идентичны и колеблются в пределах 0,6–0,9 кПа. Во всех неизмененных артериях статическое давление находится примерно на одинаковом уровне, а скоростные показатели также выше в ПББА.

Заключение

Предлагаемая технология оценки состояния сосудистого русла может быть весьма перспективна в работе специалистов в области ангиохирургии. Несмотря на то что представленные сведения о результатах математического моделирования гемодинамики в артериях нижних конечностей при их окклюзионно-стенотическом поражении в принципе общеизвестны, значения ряда показателей не столь очевидны, а их интерпретация иногда вступает в определенное противоречие с существующей парадигмой о кровотоке в сосудах ног. Тем не менее по результатам проведенной работы очевидно, что скорость кровотока в случаях стенотического поражения артерий ног возрастает; сужение просвета ЗББА или МБА, превышающее 65 % диаметра сосуда, значительно затрудняет кровоток в снабжаемых ими сегментах ног; движение крови почти прекращается при сужении ПББА более 75 %; в случаях мультипоражения артериальных сосудов гемодинамически значимые нарушения в сосудистых стволах отмечаются уже при их сужении более 50 %. Поражение артериальных сосудов АТС не только нарушает их гемодинамическую функцию, но и отрицательно сказывается на кровоснабжении бассейнов смежных артериальных стволов. В случаях окклюзии ПББА скорость кровотока в ЗББА может возрастать в 4,5–5 раз (прекращение гемодинамической активности в ЗББА или МБА ускоряет ток крови в ПББА до 3,5 раз). При таких изменениях кровообращения гипоксия тканей нижних конечностей неизбежна, что самым негативным образом влияет на жизнеспособность анатомических структур ног.

Использование потенциала современных достижений биомеханики и кибернетики себя оправдывает. Клиницистам необходим программный продукт, с помощью которого специалисты в области сосудистой хирургии могли бы вносить в базу данных определенные параметры, на основании анализа которых автома-

тически прогнозировался бы возможный результат того или иного вида лечения. Такая возможность появляется при моделировании кровотока в сосудах ног. Это позволяет объективно определять приоритеты в лечебном процессе, что должно позитивно сказываться на качестве оказания медицинской помощи пациентам с атеросклеротическим поражением артериального русла нижних конечностей.

Литература

1. *Шальнова С. А.* Эпидемиология сердечно-сосудистых заболеваний и факторы риска в России // Кардиология: национальное руководство / под ред. Ю. Н. Беленкова, Р. Г. Оганова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. С. 37–52.
2. *Карпенко А. А., Стародубцев В. В., Игнатенко П. В., Золоев Д. Г.* Гибридные оперативные вмешательства у пациентов с многоуровневым атеросклеротическим поражением артерий нижних конечностей // Ангиология и сосудистая хирургия. 2014. Т. 20, № 2. С. 60–65.
3. *Гавриленко А. В., Егоров А. А., Котов А. Э., Мамухов А. С., Молокопой С. Н.* Хирургическое лечение больных с атеросклеротической окклюзией аорто-подвздошного сегмента в сочетании с поражением дистального русла // Ангиология и сосудистая хирургия. 2012. Т. 18, № 3. С. 101–105.
4. *Пшеничный В. Н., Штутин А. А., Иваненко А. А., Воронаев В. В., Ковальчук О. Н., Гаевой В. Л.* Эффективность двухуровневых инфраингвинальных реконструкций в лечении хронической критической ишемии нижних конечностей // Ангиология и сосудистая хирургия. 2012. Т. 18, № 3. С. 132–137.
5. *Покровский А. В.* Заболевания аорты и ее ветвей. М.: Медицина. 1979. 324 с.
6. *Rutherford R. B., Baker J. D., Ernst C., Johnston K. W., Porter J. M., Ahn S., Jones D. N.* Recommended standarts for reports dealing with lower extremity ischemia Revised version // J. Vasc. Surg. 1997. Vol. 26, N 3. P. 516–538.
7. Российский консенсус «Рекомендуемые стандарты для оценки результатов лечения пациентов с хронической ишемией нижних конечностей». М., 2001. 29 с.
8. Suggested standarts for reports dealing with lower extremity ischemia Prepared by Ad Hoc Committee on Reporting Standarts, SVS/ISCVS // J. Vasc. Surg. 1986. Vol. 4, N 1. P. 80–94.
9. *Albäck A., Roth W. D., Ihlberg L., Biancari F., Lepäntalo M.* Preoperative angiographic score and intraoperative flow as predictors of the midterm patency of infrapopliteal bypass grafts // Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. 2000. Vol. 20, N 5. P. 447–453.
10. *Ljungman C., Ulus A. T., Almgren B., Bergström R., Hellberg A., Bergqvist D., Karacagil S.* A multivariate analysis of factors affecting patency of femoropopliteal and femorodistal bypass grafting // Vasa. 2000. Vol. 29, N 3. P. 215–220.
11. *Покровский А. В., Дан В. Н., Чупин А. В., Харазов А. Ф.* Можно ли предсказать исход реконструктивной операции у больных с ишемией нижних конечностей на основании дооперационных исследований? // Ангиология и сосудистая хирургия. 2002. Т. 8, № 3. С. 102–110.
12. *Бегун П. И., Кривохижина О. В., Сухов В. К.* Компьютерное моделирование и биомеханический анализ критического состояния и коррекции структур сосудистой системы (Ч. I) // Управление в медицине и биологии. 2005. № 6. С. 51–56.
13. *Бондаренко М. А., Лебедева Е. А., Артюшин Б. С.* Биомеханический метод исследования влияния атеросклеротических поражений на гемодинамику в артериях нижних конечностей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 9. С. 85–89.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2017 г.

Статья принята в печать 22 октября 2017 г.

Контактная информация:

Артюшин Борис Сергеевич — канд. мед. наук; artushin_boris@mail.ru

Мовчан Константин Николаевич — д-р мед. наук, проф.; movchanK@miac.zdrav.spb.ru

Лебедева Елена Александровна — канд. техн. наук; lebedeva@miac.zdrav.spb.ru

About computer modeling of blood flow in the arteries of the legs

B. S. Artyushin^{1,3}, K. N. Movchan^{2,3}, E. A. Lebedeva⁴,
M. A. Bondarenko⁴, K. I. Rusakevich², R. B. Ishakov²

¹ Federal North-West medical research centre named after V. A. Almazov, 2, Akkuratova ul., St. Petersburg, 197341, Russian Federation

² North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, 41, Kirochnaya ul., St. Petersburg, 191015, Russian Federation

³ Saint Petersburg Medical informational and analytical centre, 30, Shkapina ul., St. Petersburg, 198095, Russian Federation

⁴ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 5, ul. Professora Popova, 197376, Russian Federation

For citation: Artyushin B. S., Movchan K. N., Lebedeva E. A., Bondarenko M. A., Rusakevich K. I., Ishakov R. B. About computer modeling of blood flow in the arteries of the legs. *Vestnik of Saint Petersburg University. Medicine*, 2018, vol. 13, issue 1, pp. 24–37. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu11.2018.103>

Used in medical practice, schemes of assessment of the arterial bed and prediction of treatment outcomes is ambiguous in its objectivity. Development of new methods for assessment of the arterial bed, of predicting the course of atherosclerosis of the arteries of the lower extremities, to select the optimal method of revascularisation of the arterial bed of the legs is a topical task of science and practice. On the basis of parameters obtained from the analysis of data, an instrumental examination of 10 employees (computer tomography, ultrasonic research of vessels of lower extremities) created a mathematical model of blood flow in the arteries of the legs at different localizations of their occlusive-stenotic lesions. The degree of stenotic changes are standardized: 20 %, 50 % and 75 %, occlusion of the artery. Changes in blood flow that occur with isolated and combined lesions of the arteries were estimated. It was demonstrated that the speed of blood flow in the stenosis of arteries of legs is increased; narrowing of the arteries lower leg > 65 % significantly reduces blood flow, and stenosis of vessels >75 % blood flow practically ceases; when combined occlusive-stenotic lesions of several arteries significant disruption of blood flow is observed with stenosis > 50 %. Occlusive-stenotic lesions not only affects the blood flow in the arteries, but also affects the hemodynamics in other vessels of the lower extremities. Modeling disorders of blood vessels in the feet can be an effective technology for the examination and treatment of patients with failure of blood supply of the lower extremities.

Keywords: occlusive-stenotic lesions of blood vessels, computer simulation, atherosclerosis, violation of blood flow, arteries of lower extremities.

References

1. Shal'nova S.A. Epidemiologiya serdechno-sosudistykh zabolevaniy i faktory riska v Rossii [Epidemiology of cardiovascular diseases and risk factors in Russia]. *Kardiologiya: natsional'noe rukovodstvo* [Cardiology: national leadership]. Eds. Iu. N. Belenkov, R. G. Oganov. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010, pp. 37–52. (In Russian)
2. Karpenko A. A., Starodubtsev V. B., Ignatenko P. V., Zoloev D. G. Gibridnye operativnye vmeshatel'stva u patsientov s mnogourovnevnyim ateroskleroticheskim porazheniem arterii nizhnikh konechnosti [Hybrid operative interventions in patients with multilevel atherosclerotic lesions of arteries of lower extremities]. *Angiology and vascular surgery*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 60–65. (In Russian)
3. Gavrilenko A. V., Egorov A. A., Kotov A. E., Mamukhov A. S., Molokopoi S. N. Khirurgicheskoe lechenie bol'nykh s ateroskleroticheskoi okkluziei aorto-podvzdoshnogo segmenta v sochetanii s

- porazheniem distal'nogo rusla [Surgical treatment of patients with atherosclerotic occlusion of the aorto-iliac segment in combination with a lesion of the distal bed]. *Angiology and vascular surgery*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 101–105. (In Russian)
4. Pshenichnyi V.N., Shtutin A.A., Ivanenko A.A., Voropaev V.V., Kovalchuk O.N., Gaevoi V.L. Effektivnost' dvukhurovnevnykh infraingvinal'nykh rekonstruktivnykh v lechenii khronicheskoi kriticheskoi ishemii nizhnikh konechnosti [Efficiency duplex infrainguinal reconstructions in treatment of chronic critical ischemia of lower extremities]. *Angiology and vascular surgery*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 132–137. (In Russian)
 5. Pokrovskii A.V. *Zabolevaniia aorty i ee vetvei* [Diseases of the aorta and its branches]. Moscow, Medicine Publ., 1979. 324 p. (In Russian)
 6. Rutherford R.B., Baker J.D., Ernst C., Johnston K.W., Porter J.M., Ahn S., Jones D.N. Recommended standarts for reports dealing with lower extremity ischemia Revised version. *J. Vasc. Surg.*, 1997, vol. 26, no. 3, pp. 516–538.
 7. Rossiiskii konsensus «Rekomenduemye standarty dlia otsenki rezul'tatov lecheniia patsientov s khronicheskoi ishemiei nizhnikh konechnosti» [Russian consensus "Recommended standards for evaluation of results of treatment of patients with chronic ischemia of lower extremities"]. Moscow, 2001. 29 p. (In Russian)
 8. Suggested standarts for reports dealing with lower extremity ischemia Prepared by Ad Hoc Committee on Reporting Standarts, SVS/ISCVS. *J. Vasc. Surg.*, 1986, vol. 4, no. 1, pp. 80–94.
 9. Albäck A., Roth W.D., Ihlberg L., Biancari F., Lepäntalo M. Preoperative angiographic score and intraoperative flow as predictors of the midterm patency of infrapopliteal bypass grafts. *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, 2000, vol. 20, no. 5, pp. 447–453.
 10. Ljungman C., Ulus A.T., Almgren B., Bergström R., Hellberg A., Bergqvist D., Karacagil S. A multivariate analysis of factors affecting patency of femoropopliteal and femorodistal bypass grafting. *Vasa*, 2000, vol. 29, no. 3, pp. 215–220. (In Russian)
 11. Pokrovskii A.V., Dan V.N., Chupin A.V., Kharazov A.F. Mozhno li predskazat' iskhod rekonstruktivnoi operatsii u bol'nykh s ishemiei nizhnikh konechnosti na osnovanii dooperatsionnykh issledovaniy? [Can we predict the outcome of reconstructive surgery in patients with lower limb ischaemia on the basis of preoperative studies?]. *Angiology and vascular surgery*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 102–110. (In Russian)
 12. Begun P.I., Krivokhizhina O.V., Sukhov V.K. Komp'yuternoe modelirovanie i biomekhanicheskii analiz kriticheskogo sostoiianiia i korrektsii struktury sosudistoi sistemy (Chast' I) [Computer simulation and biomechanical analysis of critical state and correction of the structures of the vascular system (Part I)]. *Management in medicine and biology*, 2005, no. 6, pp. 51–56. (In Russian)
 13. Bondarenko M.A., Lebedeva E.A., Artiushin B.S. Biomekhanicheskii metod issledovaniia vliianiia ateroskleroticheskikh porazhenii na gemodinamiku v arteriiakh nizhnikh konechnosti [Biomechanical technique to investigate the influence of atherosclerotic lesions on hemodynamics in the arteries of the lower extremities]. *News of Saint-Petersburg State electrotechnical University "LETI"*, 2015, no. 9, pp. 85–89. (In Russian)

Author's information:

Artyushin Boris S. — PhD; artyushin_boris@mail.ru

Movchan Konstantin N. — MD, Professor; movchanK@miac.zdrav.spb.ru

Lebedeva Elena A. — PhD; lebedeva@miac.zdrav.spb.ru

Bondarenko Maxim A. — Graduate student; bondarenkomax@gmail.com

Rusakevich Kseniya I. — Postgraduate; kseniarusakevich@mail.ru

Iskhakov Renat B. — postgraduate; ishakrb@mail.ru