



УДК 612.76

М. А. Бондаренко, Е. А. Лебедева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Б. С. Артюшин
ГОБУЗ ГМБ № 2 (Санкт-Петербург)

Биомеханический метод исследования влияния атеросклеротических поражений на гемодинамику в артериях нижних конечностей

Проведено исследование влияния атеросклеротических поражений в кровеносных сосудах на гемодинамические показатели. На основе проведенных исследований созданы алгоритм и биомеханический метод исследования влияния патологических образований на гемодинамику в кровеносных сосудах нижних конечностей.

Кровеносные сосуды, гемодинамические показатели, исследование кровотока, атеросклероз

Патология системы кровообращения относится к основным причинам смерти и инвалидизации в мире. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения хронические облитерирующие заболевания артерий нижних конечностей констатируются в 20 % от всех патологий сердечно-сосудистой системы. Основным видом патологического поражения артерий нижних конечностей является атеросклероз. У половины всех больных атеросклерозом артерий нижних конечностей диагностируется поражение сосудистого русла ниже щели коленного сустава. Основным методом лечения данной категории пациентов – реваскуляризация (восстановление сосудов на каком-либо участке) нижней конечности. Главным фактором в принятии решения о хирургическом вмешательстве служит выраженность хронической ишемии нижней конечности.

На сегодняшний день в клинической практике, как правило, пользуются двумя различными классификациями хронической артериальной недостаточности. На основании этих классификаций созданы схемы, позволяющие оценивать исходное состояние сосудистого русла с определением дальнейшей тактики лечения. Однако результаты их применения носят противоречивый характер,

что сказывается на качестве диагностики и лечения данной категории больных. По этой причине сосудистые хирурги и ангиологи зачастую скептически относятся к громоздким, не всегда удобным схемам лечения, и в большей степени опираются на собственный опыт оказания медицинской помощи больным хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей. Исходя из этого хирургами отделения эндоваскулярной хирургии больницы № 2 Санкт-Петербурга была сформулирована проблема невозможности четкой интерпретации результатов диагностики и отсутствия механизма принятия решения.

Современные возможности науки и вычислительной техники позволяют на качественно новом уровне решать задачи в клинической работе. Компьютерные программы прикладного характера дают возможность более эффективно осуществлять диагностический поиск, прогнозировать тяжесть течения заболеваний, улучшать качество принимаемых врачом решений. Поэтому одной из актуальных задач биомеханики является создание нового метода исследования сосудистого русла нижних конечностей с анализом влияния патологических изменений в структуре артериальной стенки на гемодинамические показатели.

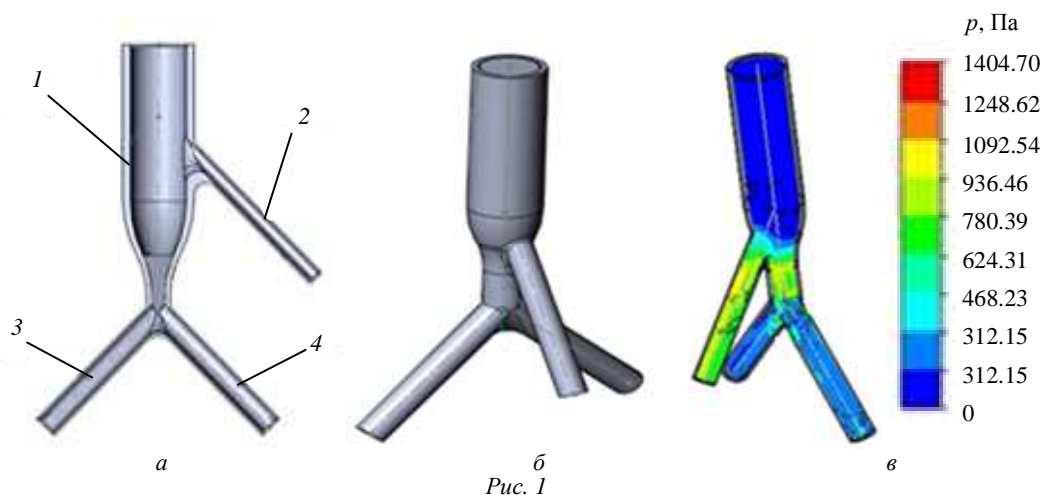


Рис. 1

Данный метод позволил бы не только прогнозировать течение патологического процесса, но и определять наиболее эффективный способ лечения артерий нижней конечности. Создание такого метода и стало целью данного исследования.

Чтобы достичь ее, было необходимо разработать биомеханическую модель для исследования гемодинамики нижних конечностей, построить модель кровяного потока на участке ниже щели коленного сустава при различных стадиях атеросклеротического поражения и разработать биомеханический метод исследования влияния патологических образований на гемодинамику в кровеносных сосудах нижних конечностей.

Для построения модели артерий нижних конечностей были использованы данные клинической анатомии человека и введены допущения. За основу модели был взят участок артериального русла нижней конечности, в котором наиболее часто возникают атеросклеротические поражения. Геометрические параметры взяты из клинической анатомии. Артерии жестко закреплены по торцам. Текучая среда – кровь (неньютоновская жидкость), ламинарный поток. Давление на входе в подколенную артерию составляет 10 кПа, скорость кровотока в сосуде – 4 м/с.

Основные показатели, полученные в проведенной работе, будут описываться уравнением Бернулли. Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии для стационарного потока идеальной (т. е. без внутреннего трения) несжимаемой жидкости:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const},$$

где ρ , v – плотность и скорость потока; h – высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости; g – ускорение свободного паде-

ния; p – давление в точке центра масс пространства рассматриваемого элемента жидкости.

На рис. 1 представлена модель артерий нижней конечности в норме: *a* – схема артерий нижней конечности, *б* – объемная модель артерии нижней конечности, *в* – изменение динамического давления кровотока. На схеме артерий нижней конечности (рис. 1, *a*) приняты следующие обозначения: 1 – подколенная артерия (ПкЛА), 2 – малая большеберцовая артерия (МБА), 3 – правая большеберцовая артерия (ПБА); 4 – задняя большеберцовая артерия.

Создание потока крови в разработанной модели артерий нижней конечности проводилось в программе SolidWorks Flow Simulation, которая является семейством дополнительных модулей по газо-/гидродинамическим расчетам в программе SolidWorks. С учетом введенных допущений была смоделирована гемодинамика в артериях при нормальном состоянии (рис. 1, *в*). Полученные данные в дальнейшем использовались для сравнительного анализа влияния атеросклеротических поражений на гемодинамику в кровеносных сосудах нижних конечностей.

Было проведено исследование гемодинамики в артериях нижней конечности при различных стадиях и локализациях атеросклеротических поражений, а также при критической ишемии малой, задней и правой большеберцовых артерий. Были исследованы варианты локализаций атеросклероза: в местах ответвления малых артерий от подколенной и непосредственно в правой, задней и малой большеберцовой артерии на разных стадиях атеросклероза.

На рис. 2 представлены схемы модели атеросклеротического поражения артерий нижней конечности с локализацией атеросклероза в месте ответвления малой большеберцовой артерии от

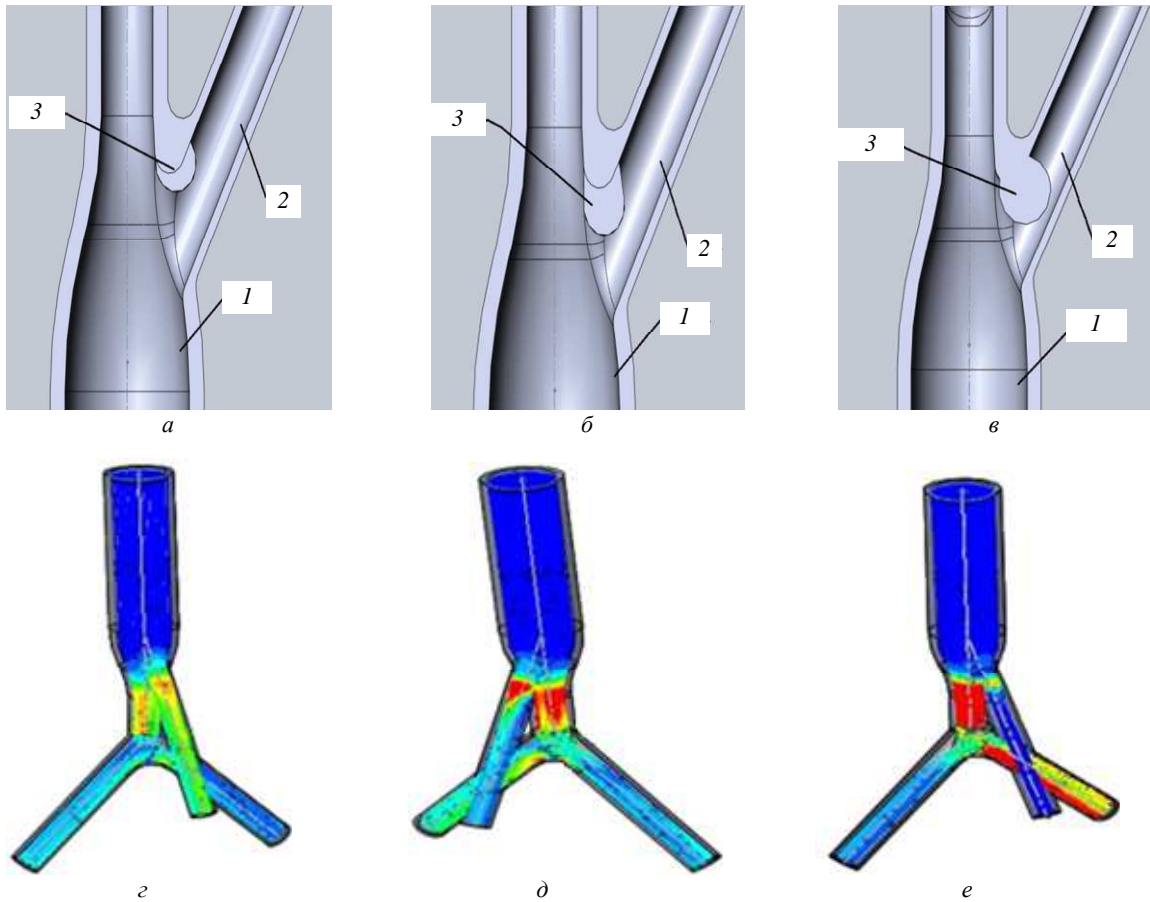


Рис. 2

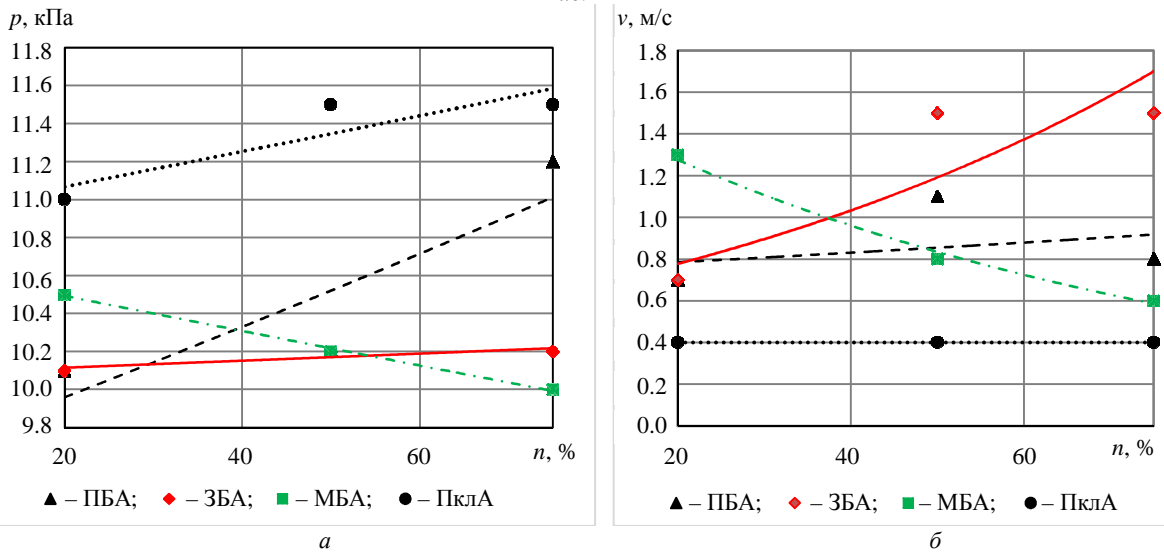


Рис. 3

подколенной и эпюры изменения динамического давления: *а, г* – атеросклероз 20 %; *б, д* – атеросклероз 50 %; *в, е* – атеросклероз 75 %. Приняты следующие обозначения: 1 – ПкЛА; 2 – МБА; 3 – атеросклеротическое поражение.

При увеличении степени поражения атеросклерозом в месте ответвления малой большеберцовой артерии от подколенной артерии скорость

кровотока увеличивается в ЗБА и уменьшается в МБА, а в ПБА и ПкЛА практически остается неизменной (рис. 3, *а*). С увеличением степени атеросклеротического поражения давление в МБА уменьшается, а в ПБА и ПкЛА увеличивается (рис. 3, *б*). На рис. 3 приняты следующие обозначения: *p* – давление, КПа; *v* – скорость кровотока, м/с, *n* – степень атеросклероза, %.

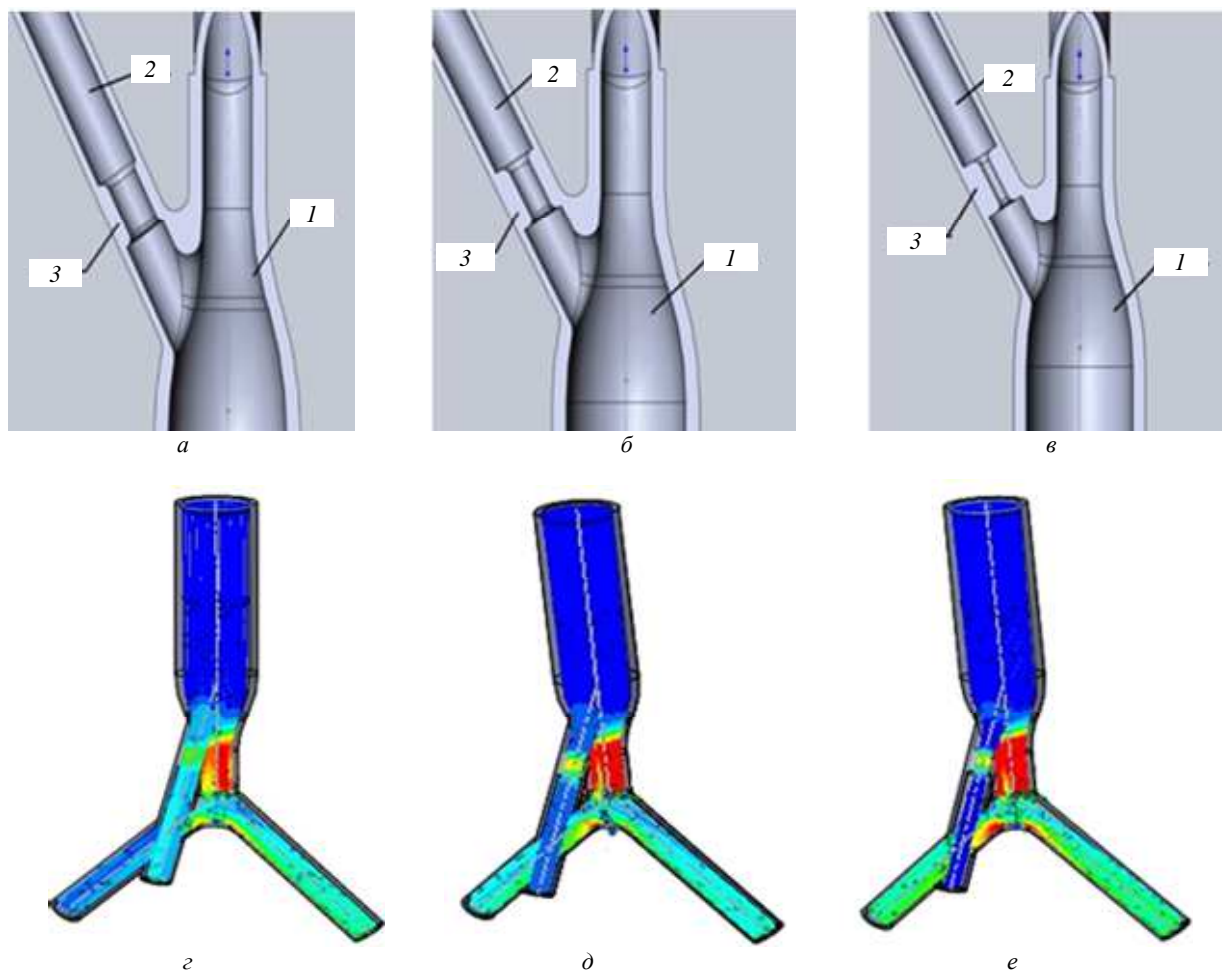


Рис. 4

На рис. 4 представлены схемы модели атеросклеротического поражения в малой большеберцовой артерии на разных стадиях атеросклероза и эпюры изменения динамического давления: *а, г* – атеросклероз 20 %; *б, д* – атеросклероз 50 %; *в, е* – атеросклероз 75 %. Приняты следующие обозначения: *1* – ПкЛА; *2* – МБА; *3* – атеросклеротическое поражение.

Из расчетов динамического давления видно, что при увеличении степени поражения атеросклероза увеличивается динамическое давление в ПБА и ЗБА. Также видно, что в месте разветвления ПкЛА на заднюю и правую большеберцовые артерии происходит большой скачок давления. В малой большеберцовой артерии динамическое давление при увеличении степени поражения атеросклерозом уменьшается.

Давление во всех артериях увеличивается с увеличением степени атеросклеротического поражения, самое значительное увеличение происходит в подколенной артерии (рис. 5, *а*). При увеличении степени поражения атеросклерозом в МБА скорость кровотока в остальных артериях изменяется незначительно (рис. 5, *б*).

В результате данного исследования были получены следующие закономерности: давление в артерии при ее сужении уменьшается, скорость кровотока – увеличивается. Поражение правой большеберцовой или задней большеберцовой артерий атеросклерозом при 67 % перекрытия просвета практически не дает крови поступать в данную артерию; в малую большеберцовую артерию кровь прекращает поступать уже при 77 % перекрытия данной артерии атеросклеротическим поражением. Самой критической ситуацией при атеросклеротическом поражении становится поражение одновременно нескольких артерий; так, например, при одновременном поражении правой большеберцовой и малой большеберцовой артерий уже при перекрытии 47 % их просветов проявляются значительные нарушения гемодинамики.

Проведя исследование гемодинамики при различных локализациях критической ишемии, можно сделать вывод: критическая ишемия не только не пропускает кровь в пораженную артерию, но и отрицательно сказывается на осталь-

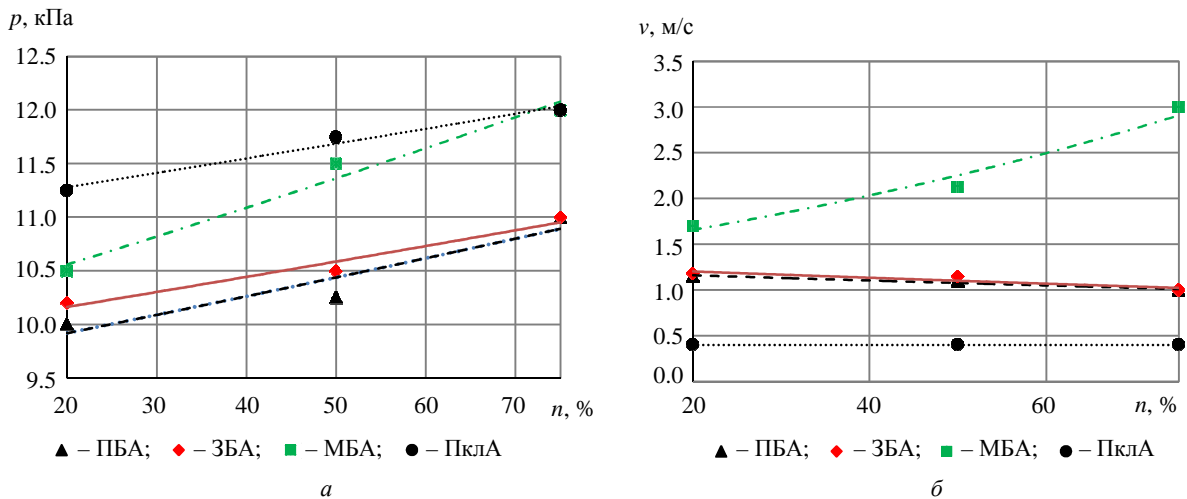


Рис. 5

ных артериях, связанных с ней. Критическая ишемия правой большеберцовой или задней большеберцовой артерий увеличивает скорость кровотока в малой большеберцовой в 3.5 раза. Критическая ишемия малой большеберцовой приводит к увеличению скорости кровотока в правой большеберцовой в 4.5 раза. Такие изменения скорости и давления могут привести к образованию новых патологий.

На основе проведенных исследований создан алгоритм исследования влияния патологических образований на гемодинамику в кровеносных сосудах нижних конечностей. Руководствуясь данным

алгоритмом, можно рассмотреть гемодинамику в артериях нижних конечностей при различных степенях поражения и локализациях атеросклероза. На основе разработанного алгоритма и проведенных исследований создан биомеханический метод исследования влияния патологических образований на гемодинамику в кровеносных сосудах.

Внедрение во врачебную практику созданного биомеханического метода позволит не только прогнозировать течение патологического процесса, но и определять наиболее эффективный способ лечения атеросклеротических поражений артерий нижней конечности.

M. A. Bondarenko, E. A. Lebedeva
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

B. S. Artyushin
City hospital 2 (Saint Petersburg)

BIOMECHANICAL METHOD OF RESEARCH OF INFLUENCE OF ATHEROSCLEROTIC DEFECTS ON THE MOVEMENT OF BLOOD IN ARTERIES OF THE LOWER EXTREMITIES

Atherosclerotic blood vessels involvement on the hemodynamic characteristics was studied. On the basis of the studies an algorithm and biomechanical method of research of pathologic masses influence on hemodynamics in blood vessels of the lower extremities were developed.

Blood vessels, hemodynamic parameters, study of blood flow, atherosclerosis