

Слащёва М.Д., Трушель Н.А., Мансуров В.А.

**ВЛИЯНИЕ АТЕРОСКЛЕРОТИЧЕСКИХ СУЖЕНИЙ В БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ В НЕЙ**

УО «Белорусский государственный медицинский университет»
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация: Установление морфометрических и гемодинамических особенностей бедренной артерии в области ответвления от нее глубокой артерии бедра является актуальным направлением в связи с большой распространенностью атеросклеротических проявлений в изучаемой области. Среди населения Республики Беларусь 47% пациентов на 1,537 млн. жителей в возрасте 60-75 лет страдают атеросклеротическими заболеваниями бедренной артерии и ее ветвей.

Ключевые слова: атеросклероз, бедренная артерия, гемодинамика.

Slashcheva M.D., Trushel N.A., Mansurov B.A.

**INFLUENCE OF ATHEROSCLEROTIC NARROWS IN THE FEMORAL ARTERY ON
CHANGES IN HEMODYNAMICS IN IT**

Annotation: The establishment of morphometric and hemodynamic features of the femoral artery in the area of its branch from the deep femoral artery is an actual direction due to the large prevalence of atherosclerotic manifestations in the studied area. Among the population of the Republic of Belarus, 47% of patients on 1.537 million inhabitants aged 60-75 years suffer from atherosclerotic diseases of the femoral artery and its branches.

Keywords: atherosclerotic disease, femoral artery, blood flow changes.

Актуальность: Исследование морфометрических и гемодинамических особенностей в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии актуально в связи с частыми оперативными вмешательствами по удалению атеросклеротических бляшек в этой области. По данным научной литературы [1-5], в Республике Беларусь 47% пациентов на 1,537 млн. жителей в возрасте 60-75 лет страдают этой патологией.

Цель: установить морфометрические и гемодинамические особенности в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии.

Материал и методы: Материалом для исследования послужили архивные данные ультразвуковой диагностики бедренных сосудов 41 человека в возрасте от 25 до 74 лет, обратившихся в 22-ю городскую поликлинику г. Минска, часть из которых имела атеросклеротические бляшки в месте ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии, а у других они отсутствовали. Из архивных данных были получены диаметры бедренной артерии до и после ответвления глубокой артерии бедра, а также диаметр последней. Методом конечно-разностного интегрирования уравнения движения жидкости при взаимодействии потока с упругой стенкой (FSI) были установлены особенности кровотока в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии.

Результаты: Ретроспективный анализ данных УЗИ позволил составить базу морфометрических показатели артерий в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии у пациентов без атеросклеротических

изменений сосудов и с их наличием, которые представлены в таблицах 1 и 2 [1].

Таблица 1.
Морфометрические показатели бедренной артерии и глубокой артерии бедра
пациентов без атеросклеротического сужения

Морфометрические данные бедренной артерии и глубокой бедренной артерии без атеросклеротического сужения		
	Диаметр, мм	Величина угла ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии, °
Бедренная артерия	9,1	20
Бедренная артерия после бифуркации	8,9	
Глубокая бедренная артерия	7,6	

Таблица 2
Морфометрические показатели бедренной артерии и глубокой артерии бедра
пациентов с атеросклеротическим сужением

Морфометрические показатели бедренной артерии и глубокой артерии бедра				
	Диаметр, мм	Стеноз, мм	Просвет сосуда с учетом диаметра стеноза, мм	Величина угла ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии, °
Бедренная артерия	9,4	3,3	6,1	20
Бедренная артерия после бифуркации	9,3	3,2	6,1	
Глубокая артерия бедра	8,2	3,15	5,05	

На основании полученных морфометрических данных были построены численные геометрические модели ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии пациентов обеих групп. С помощью геометрической модели был произведен расчет напряженно деформированного состояния стенки сосуда и гемодинамики внутри сосудов *FSI*.

Известно, что средние скорости течения на входе толстого дочернего сосуда находятся в диапазоне $10,7 \div 18,5$ см/с (среднее значение – 15 см/с), на входе тонкого дочернего сосуда – $12 \div 19,5$ см/с (среднее значение – 16 см/с). На стенке сосуда условия прилипания, окончание отрезков сосудов – неподвижны. Механические свойства сред показаны в таблице 3 [5].

Таблица 3
Свойства сред.

Свойство	Жидкость	Упругость
Плотность, кг/м ³	1050	1150
Вязкость, мПа·с	5	-
Модуль Юнга, Па	-	10 ⁵
Коэффициент Пуассона	-	0,45

Поток жидкости приводит к деформации стенки, поэтому для численного моделирования профиля течения в непрерывно деформируемой геометрии необходимо использовать метод Лагранжа-Эйлера (ALE – arbitrary Lagrange-Euler) [4]. Метод ALE использует динамику деформирующей геометрии и движущихся границ с помощью движущейся сетки (moving mesh). Стенка сосуда является деформируемым материалом под воздействием нагрузки и поток жидкости следует по новому пути.

Результаты математического моделирования показали, что статическое давление оказывает значительное действие на стенку сосуда вызывая абсолютную её деформацию (0.02 мм) (рис 1). Эта деформация способствует увеличению риска возникновения аневризмы.

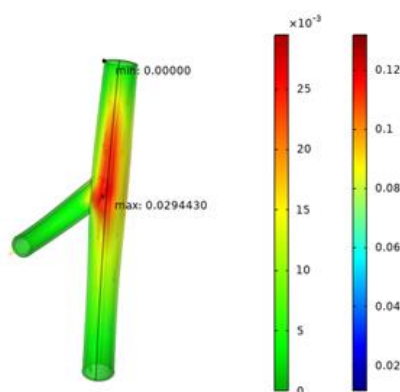


Рис. 1 Точка наибольшей деформации стенки сосудов в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии без атеросклеротического сужения.

Наличие бляшки в бедренной артерии уменьшает её просвет. Основываясь на уравнении неразрывной струи, скорость течения крови в просвете увеличивается (из-за стеноза), значит происходит увеличение динамического давления [2]. В результате, согласно уравнению Бернулли, понижается статическое давление и появляется дополнительное давление со стороны крови на стенку сосуда. Стенка артерий начинает сжиматься (рис 2).

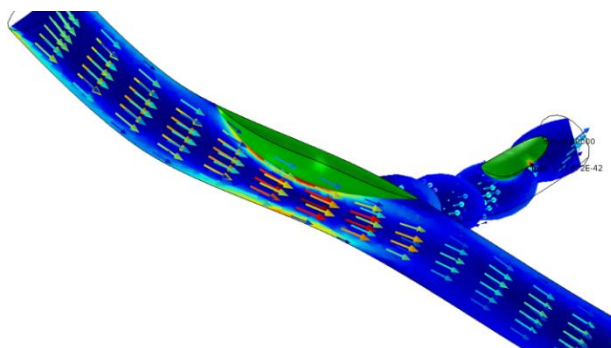


Рис. 2 Моделирование кровотока в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии с атеросклеротическими бляшками.

У пациентов с атеросклеротическим сужением сосудов изменяется модуль и направление вектора скорости перед бляшкой дочернего сосуда, что приводит к возникновению вихревого движения потока [5], при котором жидкость перемещается не только поступательно, но и вращаясь вокруг оси. В таком случае элементарные объемы жидкости имеют мгновенную угловую скорость вращения, отличную от нуля, что способствует процессам атерогенеза изучаемых артерий.

На стенку сосуда действует сила в тангенциальной плоскости, при этом величина и направление этого вектора является причиной напряжения сдвига на сосудистой стенке (WSS), связанной с градиентом скорости на стенке

$$WSR = \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{wall}$$

$$WSS = \vec{\tau}_w = \mu \cdot WSR$$

здесь \vec{u} - вектор скорости течения, μ - вязкость жидкости.

С увеличением скорости тока крови появляется касательное напряжение на стенке сосудов, которое возникает при увеличении градиента скорости и вязкости крови. Это давление действует на бляшку, что может привести к её срыву (рис 3) [3]. В материнском сосуда давление на бляшку составляет 196 Па, в дочернем 65 Па. На графике видны точки, где касательное напряжение имеет большее значение при градиенте скорости, равном 135 сек^{-1} .

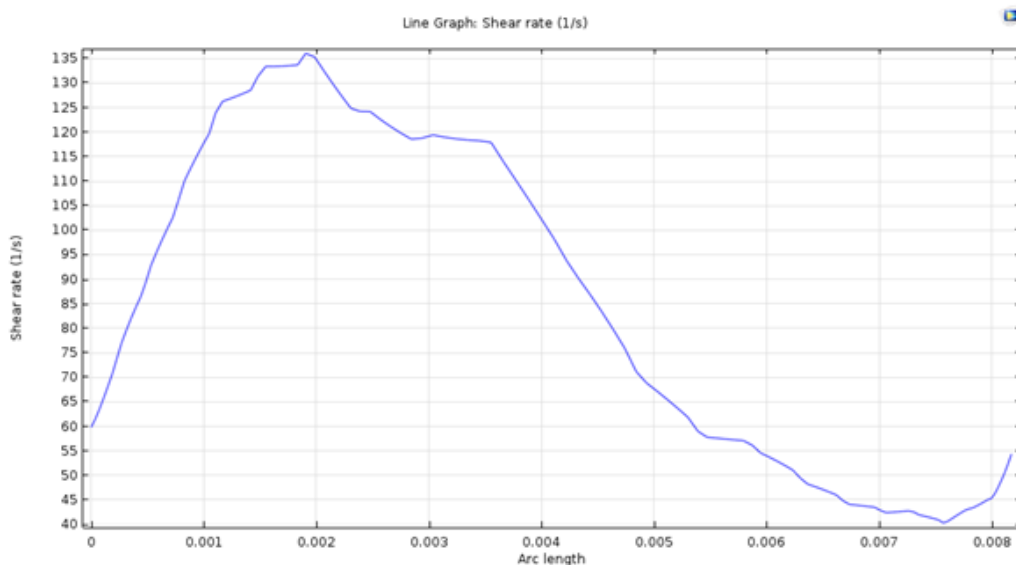


Рис. 3 Зависимость градиента скорости кровотока от длины бляшки.

Выводы: Полученные результаты свидетельствуют о том, что сужение в области ответвления глубокой артерии бедра от бедренной артерии у людей с атеросклеротическими изменениями их стенок, приводит к увеличению скорости течения крови, что вызывает появление градиента скорости на бляшке. Это приводит к увеличению касательного напряжения на стенке сосуда и может спровоцировать срыв бляшки.

Литература

1. Дутикова, Е. Ф. Ультразвуковые исследования магистральных артерий конечностей: метод. Рекомендации для врачей ультразвуковой диагностики, сосудистых хирургов, кардиологов/ Е.Ф. Дутикова, Ю.А. Зюлева // Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения города Москвы». – Москва, 2018. – 24 с.
2. Современные возможности дуплексного сканирования в планировании и динамическом наблюдении пациентов с дистальными реконструктивными вмешательствами на артериях нижних конечностей / И. Е. Тимина, Е. А. Бурцева, А. Е. Зотиков и др. // Медицинская визуализация. – 2014. – №5. – С.74-82.
3. Femoral Artery Atherosclerosis Is Associated With Physical Function Across the Spectrum of the Ankle-Brachial Index [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5586297/> . (дата обращения): 28.05.2025.
4. Jordi Alastruey, Kim H. Parker, Spencer J. Sherwin Arterial pulse wave haemodynamics // <https://www.researchgate.net/publication/25600907>. (дата обращения: 20.04.2025).
5. Sunderland, K. Impact of Spatial and Temporal Stability of Flow Vortices on Vascular Endothelial Cells / K. Sunderland, J. Wenkai, I. Weilue, J. Jingfeng, Z. Feng // Biomech Model Mechanobiol. – 2023. – Vol. 22, 1. – P. 71-83.