

¹Мансуров В. А., ¹Трушель Н. А., ²Катеренюк И. М., ²Зорина З. А.,
¹Суниченко М. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВОТОКА В ГЛУБОКОЙ АРТЕРИИ ПЛЕЧА

¹ Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск,
² Государственный университет медицины и фармации им. Николае
Тестемицану, г. Кишинев, Молдова

Установлены особенности кровотока в месте ответвления глубокой артерии плеча от плечевой артерии при стенозе последней. Показано, что значительное уменьшение средней скорости течения и давления крови в глубокой артерии плеча наблюдаются при уменьшении просвета плечевой артерии на 20 %.

Ключевые слова: артерия, артерии плеча, моделирование кровотока.

¹Mansurov V., ¹Trushel N., ²Katereniuc I., ²Zorina Z. A., ¹Supichenko M. S.
MODELING THE BLOOD DRAIN IN THE DEEP ARTERIA OF THE SHOULDER

¹ Belarusian State Medical University, Minsk,
² State University of Medicine and Pharmacy Nicolae Testemitan, Chisinau, Moldova

The features of the blood flow in the place of the branch of the deep artery of the shoulder from the brachial artery during stenosis of the latter were established. It has been shown that a significant decrease in the average flow velocity and blood pressure in the deep artery of the shoulder is observed when the lumen of the brachial artery decreases by 20 %.

Key words: artery, shoulder arteries, blood flow modeling.

Известно, что атеросклеротические явления раньше всего проявляются в области разветвления сосудов [1–3]. Значительное сужение артерии, приводящее к уменьшению просвета сосуда около 80 %, по данным разных авторов, приводит к уменьшению объемного кровотока, что способствует недополучению тканями питательных веществ и кислорода. Атеросклеротические изменения стенки артерии (утолщения интимы, бляшки) связаны с течением крови по сосудистой системе. При их образовании существенно меняется тип движения крови, приводя к еще большему стенозу артерий.

Цель исследования — изучить особенности кровотока в ответвляющемся сосуде (глубокой артерии плеча) от основного (плечевой артерии) при стенозе последнего.

Материалы и методы. Морфометрические показатели диаметра материнского (плечевой артерии) и дочернего (глубокой артерии плеча) сосудов, угла бифуркации между ними были изучены на сканах компьютерной томографии (с ангиоконтрастированием) верхней конечности 10 людей второго периода зрелого возраста (рис. 1).

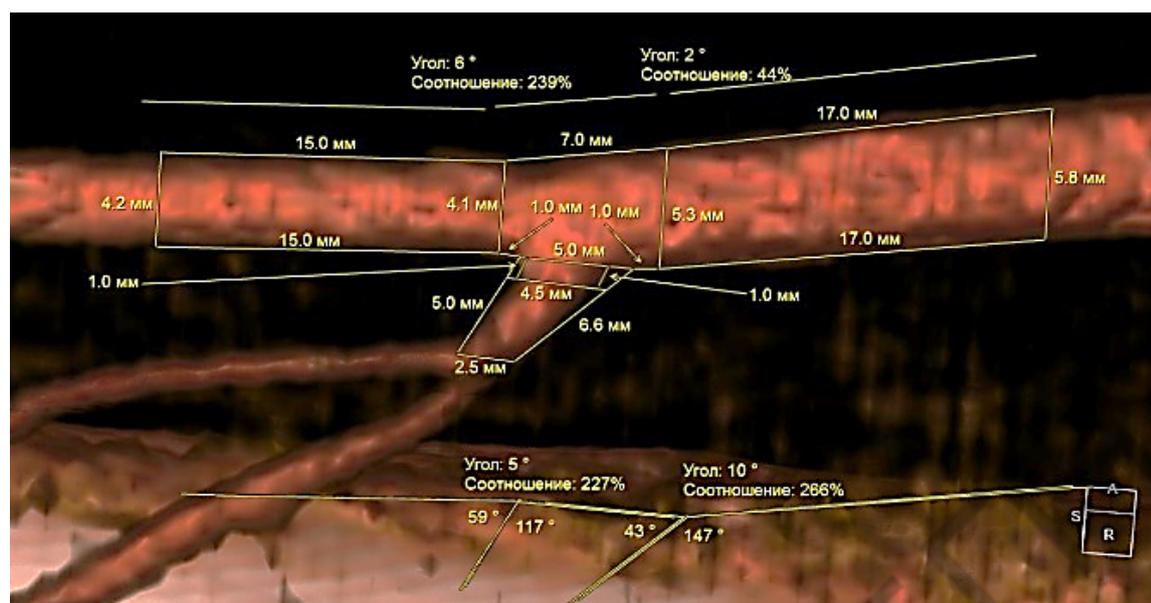


Рис. 1. Ответвление глубокой артерии плеча от плечевой артерии. Участок стеноза плечевой артерии находится дистальнее от бифуркации. Изображение получено методом КТ-исследования с ангиоконтрастированием

Кроме того, методом ультразвукового исследования (УЗИ) были установлены скорости течения в плечевой артерии и глубокой артерии плеча у 10 здоровых людей этого же возраста. Для изучения особенностей кровотока в ответвляющемся сосуде (глубокой артерии плеча) от основного (плечевой артерии) использовался метод математического моделирования кровотока. Для математического моделирования использовалось приближение стационарного течения (пульсовое давление для плечевой артерии составляет около 10 % минимального давления), также пренебрегали местными гидравлическими сопротивлениями.

Кровь рассматривалась как ньютоновская жидкость с вязкостью 5 мПа·с. Стеноз: цилиндрический, длиной 1 см, при изменении просвета $\lambda = S/S_0$, где S — площадь просвета, S_0 — площадь сосуда без бляшки. Изменение просвета приводит к появлению дополнительного гидравлического сопротивления.

Для проведения математического моделирования построена идеализированная гидравлическая схема сосудистой бифуркации с учетом давления на входе бифуркации, а также давления на конце участка основного сосуда. При этом учитывались гидравлическое сопротивление участка плечевой артерии до бифуркации, гидравлическое сопротивление дочернего участка артерии, гидравлическое сопротивление основного участка артерии, гидравлическое сопротивление стенозированного участка артерии (переменная величина) и общие гидравлические сопротивления бассейнов артерии после бифуркации.

Идеализированная гидравлическая схема в области ответвления глубокой артерии от плечевой артерии позволяет рассчитать взаимосвязь давления на конце участка сосудистой бифуркации P_x и P_{xl} в пренебрежении с местными гидравлическими сопротивлениями:

$$P_x = \frac{(X_l + X_{0l})(X_r + \Delta X + X_{0r})}{X_l + X_{0l} + X_r + \Delta X + X_{0r}} \cdot \frac{X_{0r}}{X_r + \Delta X + X_{0r}} P_0.$$

$$\frac{(X_l + X_{0l})(X_r + \Delta X + X_{0r})}{X_l + X_{0l} + X_r + \Delta X + X_{0r}} + X_b$$

Учитывая, что $X_{0l} \gg X_l$ и $X_r \gg X_{0r}$, данную формулу можно упростить:

$$P_x \approx \frac{\Delta X + X_{0r}}{\Delta X + X_{0r} + X_b}.$$

Также такое упрощение дает приблизительное соотношение между давлениями на материнском и дочернем участке разделяющихся артерий при появлении дополнительно гидравлического сопротивления (индексом 0 отмечены давления при отсутствии дополнительно гидравлического сопротивления):

$$\frac{P_{xl}}{P_x} \approx \frac{P_{xl0}}{P_{x0}} + \frac{\Delta X}{X_{0r}}.$$

Методом математического моделирования изучено трехмерное поле скоростей течения и распределение давления в области сосудистой бифуркации. Модельные расчеты проводились с помощью метода конечных разностей, который решает системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных в трех измерениях (рис. 2, 3).

Результаты и обсуждение. На первом этапе моделирования подбирались давления на материнском и дочернем сосуде, чтобы средняя скорость течения соответствовала данным УЗИ, и объемная, чтобы определить гидравлическое сопротивление. Давление на входе в бифуркацию — 13 300 Па (100 мм рт. ст.). Результаты приведены в таблице.

На втором этапе моделирования менялось гидравлическое сопротивление стенозированного участка и вычислялся перепад давления на концах дочернего и материнского сосудов согласно показанным выше расчетам по идеализированной гидравлической схеме. Основной интерес был направлен к концу дочернего сосуда (глубокой артерии плеча), где определялась средняя скорость течения. Результаты давления и средней скорости течения в дочернем сосуде с учетом дополнительно гидравлического сопротивления показаны на рис. 4 и 5.

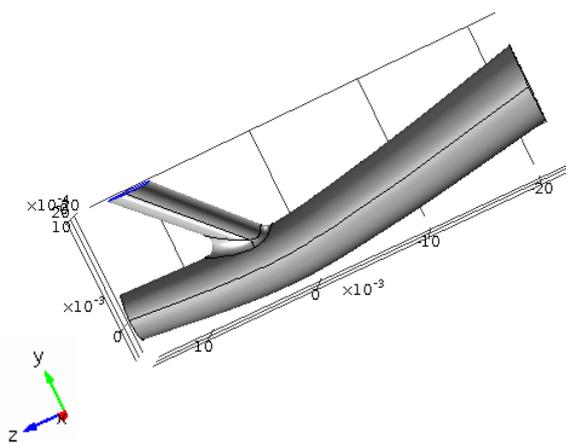


Рис. 2. Трехмерная модель бифуркации

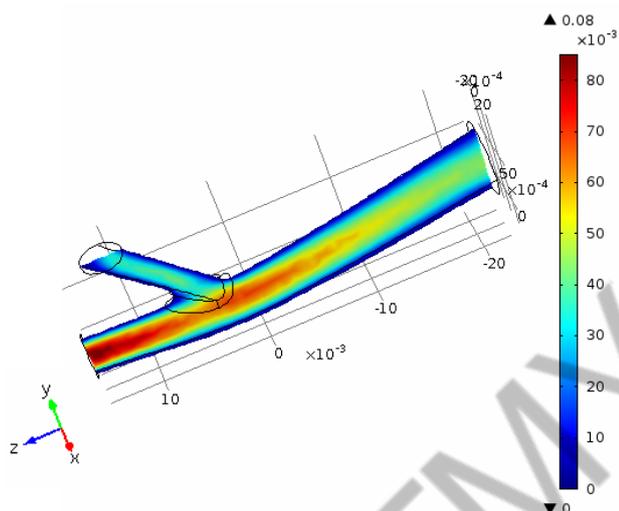


Рис. 3. Распределение скоростей течения в продольном разрезе бифуркации

Результаты моделирования кровотока без дополнительно гидравлического сопротивления

| Параметр, размерность | Выход материнского сосуда | Выход дочернего сосуда | Вход в бифуркацию |
|--|---------------------------|------------------------|---------------------|
| Давление, Па | 6264 | 6060 | 13 300 |
| Радиус, мм | 2,1 | 2 | 3,8 |
| Средняя скорость течения, см/с | 4,43 | 1,25 | 2,4 |
| Расход (объемная скорость), м ³ /с | $6,14 \cdot 10^{-7}$ | $1,57 \cdot 10^{-7}$ | $8,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Гидравлическое сопротивление, кг/м ⁴ ·с | $7,2 \cdot 10^{10}$ | $3,9 \cdot 10^{10}$ | $8,1 \cdot 10^9$ |

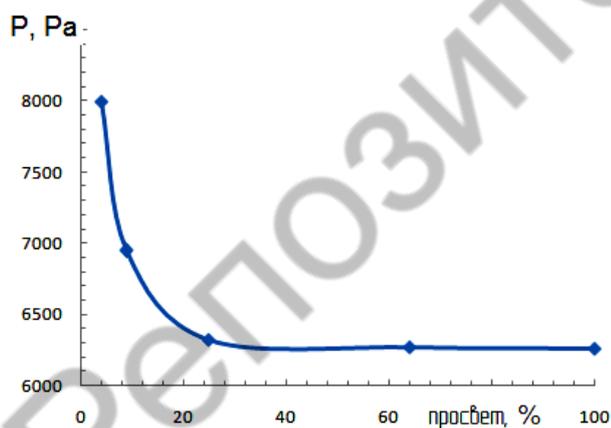


Рис. 4. Изменение давления в глубокой артерии плеча при стенозе плечевой артерии

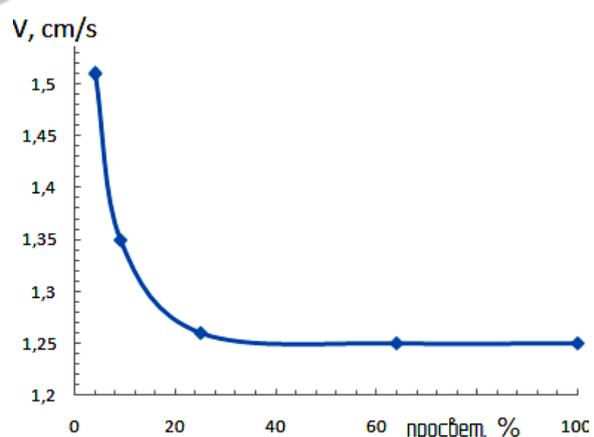


Рис. 5. Изменение средней скорости течения в глубокой артерии плеча при стенозе плечевой артерии

Выводы. Значительное уменьшение средней скорости течения и давления крови в глубокой артерии плеча наблюдаются при уменьшении просвета плечевой артерии на 20 %. Таким образом, следует полагать, что 20%-ное уменьшение просвета основного сосуда (плечевой артерии) явля-

ется критичным, приводящим к резкому перераспределению потоков крови в месте ответвления глубокой артерии плеча от плечевой артерии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Трушель, Н. А.* Роль морфологического и гемодинамического факторов в атерогенезе сосудов виллизиева круга / Н. А. Трушель, П. Г. Пивченко. Минск : БГМУ, 2013. 180 с.
2. *Carotid bifurcation atherosclerosis : quantative correlation of plaque localization with flow velocity profiles and wall shear stress / С. К. Zarins [et al.] // Circ. Res. 1983. Vol. 53, № 4. P. 502–514.*
3. *Карпов, Р. С.* Атеросклероз : некоторые современные вопросы патогенеза, диагностики, лечения и профилактики / Р. С. Карпов, В. А. Дудко // Клиническая медицина. 1999. № 12. С. 9–13.