

УДК 004.942, 616-005.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРОВОТОКА СОННОЙ АРТЕРИИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ АНЕВРИЗМЫ

Д.А. БАЛЮК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 ноября 2018

Аннотация. Проведено моделирование гемодинамики кровотока крупных кровеносных сосудов в программном комплексе FlowVision методом конечных элементов. Исследовано влияние геометрии сосудистого русла сонной артерии на изменение гемодинамики ее кровотока.

Ключевые слова: сонная артерия, патологическая извитость, моделирование гемодинамических явлений, метод конечных элементов, гемодинамика.

Abstract. The finite element method was used in the hemodynamic large vessel blood flow simulation (as part of the FlowVision program). The bloodstream geometry influence on its hemodynamic modification was studied.

Keywords: carotid artery, aneurysm, the finite elements method, hemodynamic.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 117, No. 7, pp. 85-89
Simulation and evaluation of hemodynamic characteristics of carotid blood flow in the process of aneurysm formation
D.A. Baliuk

Введение

Нарушение мозгового кровообращения представляет одну из самых серьезных проблем, поскольку приводит к полной или частичной утрате трудоспособности и характеризуется высокой степенью летальности. Нарушение мозгового кровообращения ишемического характера имеет место при возникновении атеросклероза сонных артерий и патологическом развитии их сосудистого русла. На сегодняшний день актуальной задачей для медицины является необходимость возможного прогноза поведения сосуда в ближайшие периоды после хирургического вмешательства.

Целью работы является имитационное моделирование гемодинамики кровотока крупных кровеносных сосудов в программном комплексе FlowVision методом конечных элементов и исследование влияния геометрии сосудистого русла на изменение гемодинамики ее кровотока.

Методика эксперимента

Моделирование гемодинамических явлений кровотока сонной артерии с образованием аневризмы предусматривает создание твердотельной геометрической модели сосудистого русла в программном комплексе SolidWorks. Разработано 5 моделей сонной артерии с образованием аневризмы на внутренней сонной артерии: без патологии, веретенновидная, мешковидная, мешковидно-веретенновидная и псевдоаневризма. С помощью постпроцессора FlowVision производится визуализация результатов расчета.

Твердотельные геометрические модели применяются для имитационного моделирования кровотока человека методом конечных элементов в программном комплексе FlowVision с целью получения гемодинамических характеристик кровотока. При моделировании гемодинамики в артериях необходимо рассматривать: характеристики кровотока, модель и параметры материала стенки артерий, а также геометрическую форму сосуда. В качестве модели жидкости будем использовать модель вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости [1]. Для задания характеристик потока используем данные из литературных источников [2] или *in vivo* данные [3]. Параметры материала стенок артерий получаем на основе экспериментов по растяжению образцов артерий [4]. Течение крови ламинарное.

Результаты и их обсуждение

Ниже представлена визуализация распределения скорости кровотока в русле сонной артерии при образовании различного типа аневризм (см. рис. 1).

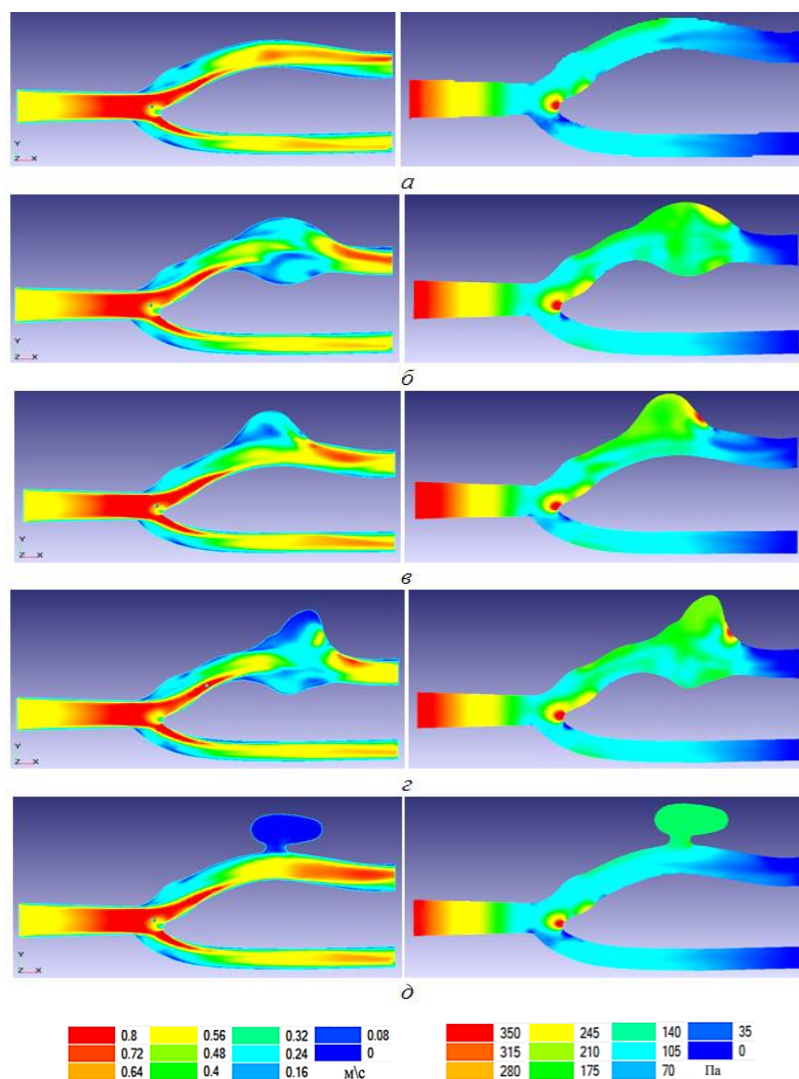


Рис. 1. Распределение скорости и давления кровотока в продольном сечении сосуда артерии при образовании аневризмы: *a* – без патологии; *б* – веретеновидная; *в* – мешковидная; *г* – мешковидно-веретеновидная; *д* – псевдоаневризма

Анализ результатов моделирования показал, что при нарушении геометрии сосудистого русла наблюдается изменение ламинарного течения кровотока на вихревое (турбулентное) течение (см. рис. 2). Наиболее ярко это проявляется у мешковидной и мешковидно-веретеновидной аневризмы.

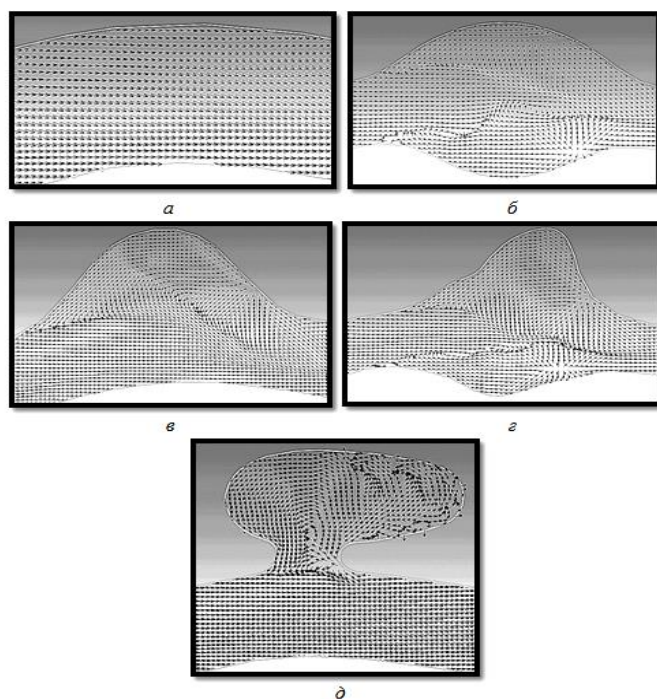


Рис. 2. Вектора скорости крови в просвете сосуда: *а* – без патологии; *б* – веретеновидная; *в* – мешковидная; *г* – мешковидно-веретеновидная; *д* – псевдоаневризма

Для диагностирования нарушения гемодинамики при образовании аневризм, определим объемную скорость кровотока на выходе из внутренней и наружной сонной артерии. На выходе каждой артерии было создано сечение артерии и разделено по цветовому критерию распределения скорости на элементарные площади, так как разные значения переменной окрашены разными цветами с помощью тоновой заливки (см. рис. 3) [5, 6].

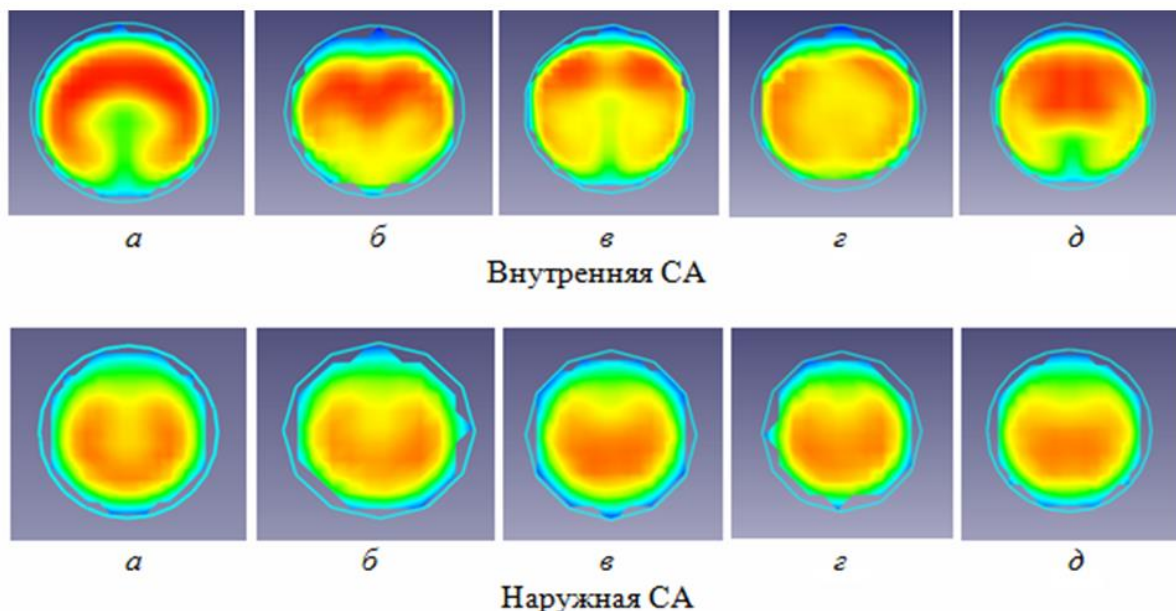


Рис. 3. Распределение скорости кровотока при образовании аневризмы в поперечном сечении сосуда: *а* – без патологии; *б* – веретеновидная; *в* – мешковидная; *г* – мешковидно-веретеновидная; *д* – псевдоаневризма

Объемная скорость кровотока на выходе рассчитана по формуле (см. рис. 4):

$$Q = \sum_{i=1}^i v_i \cdot S_j, \quad (1)$$

где v_i – скорость i -го цвета; S_j – площадь j -го цвета.

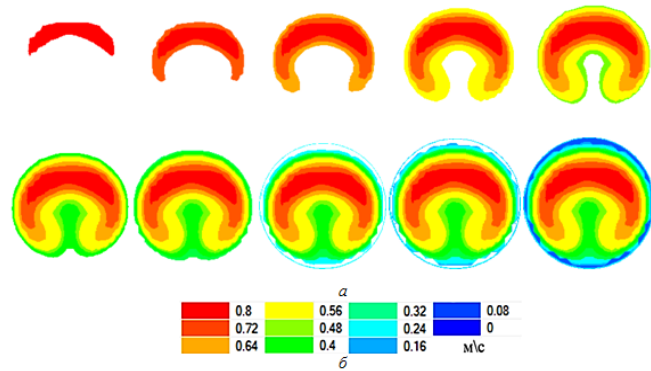


Рис. 4. Разбиение на элементарные площади по цветовому критерию распределения скорости в поперечном сечении артерии: $\alpha - S_j$ – площадь j -го цвета; $\beta - v_i$ – скорость i -го цвета

Распределение объемного кровотока на выходе из внутренней сонной артерии показало, что появление вихревого течения кровотока в области образования аневризмы незначительно влияет на искажение скорости течения кровотока в сонной артерии (в пределах 4 %). Мешковидно-веретеновидная аневризма является наиболее опасной, падение скорости в этом случае наблюдается порядка 8 % (см. таблицу).

Объемная скорость кровотока в сонной артерии (СА) при образовании аневризмы

| Тип СА | Объемная скорость кровотока во внутренней СА, % ($Q, \text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-6}$) |
|--|--|
| Без патологий | 100 (25,50) |
| С веретеновидной аневризмой | 96 (24,49) |
| С мешковидной аневризмой | 97 (24,84) |
| С мешковидно-веретеновидной аневризмой | 92 (23,43) |
| С псевдоаневризмой | 99 (25,39) |

На основании полученной визуализации распределения давления (см. рис. 1) видно, что наблюдается повышение давления, оказываемого кровью на стенку артерии, в месте образования аневризмы. Возникновение риска разрыва стенки сосуда в связи с ее утончением и растяжением в области образования аневризмы определяет опасность данного явления. Для псевдоаневризмы свойственна слабая циркуляция крови в ее полости, а также повышенное давление на стенке шейки аневризмы.

Заключение

В работе выполнено имитационное моделирование кровотока сонной артерии человека методом конечных элементов. Из результатов исследования видно, что особенно опасной является мешковидно-веретеновидная аневризма. При этой патологии наблюдается в большей степени падение объемной скорости во внутренней сонной артерии (порядка 8 %). Анализ полученных визуализаций распределения давления в русле артерии показал, что наиболее опасными видами аневризм являются мешковидная и мешковидно-веретеновидная. При развитии этих патологий кровотоков оказывает максимальное воздействие на стенку аневризмы.

Моделирование кровотока позволяет реализовать и разработать новые методы неинвазивной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний (без хирургического вмешательства) в клинической практике.

Список литературы

1. Alnses M.S. Finite element simulations of blood flow in the circle of Willis: master thesis. University of Oslo, 2006. 86 p.
2. Ivanov D. Mechanical properties of Willis circle arteries // CMM 2009. Short papers. Zielona Gora, 2009. P. 213–214.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1970. 904 с.
4. Прочностные свойства артерий основания головного мозга взрослых людей 1-го периода зрелого возраста / В.Н. Николенко [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. 2008. Т. 14, № 3. С. 123–124.

5. Балюк Д.А. Базик И.Ю., Витковский Е.Д. Моделирование параметров кровотока (скорости и давления) в зависимости от геометрических параметров сосуда // Докл. БГУИР. 2016 № 7 (101). С. 110–115.
6. Балюк Д.А. Моделирование и оценка гемодинамических характеристик кровотока сонной артерии // Матер. юбилейных XXV Междунар. чтений «Великие преобразователи естествознания: Нильс Бор». Минск, 2017. С. 214–215.

References

1. Alnæs M.S. Finite element simulations of blood flow in the circle of Willis: master thesis. University of Oslo, 2006. 86 p.
2. Ivanov D. Mechanical properties of Willis circle arteries // CMM 2009. Short papers. Zielona Gora, 2009. P. 213–214.
3. Lojčanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. M. : Nauka, 1970. 904 s. (in Russ.)
4. Prochnostnye svojstva arterij osnovaniya golovnogogo mozga vzroslyh ljudej 1-go perioda zrelogo vozrasta / V.N. Nikolenko [i dr.] // Angiologija i sosudistaja hirurgija. 2008. T. 14, № 3. S. 123–124. (in Russ.)
5. Baljuk D.A. Bazik I.Ju., Vitkovskij E.D. Modelirovanie parametrov krovotoka (skorosti i davlenija) v zavisimosti ot geometricheskikh parametrov sosuda // Dokl. BGUIR. 2016 № 7 (101). S. 110–115. (in Russ.)
6. Baljuk D.A. Modelirovanie i ocenka gemodinamicheskikh harakteristik krovotoka sonnoj arterii // Mater. jubilejnyh XXV Mezhdunar. chtenij «Velikie preobrazovateli estestvoznanija: Nil's Bor». Minsk, 2017. S. 214–215. (in Russ.)

Сведения об авторе

Балюк Д.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Baliuk D.A., PG student of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
 Минск, П.Бровки, 6
 Белорусский государственный университет
 информатики и радиоэлектроники
 тел. +375-29-361-89-56;
 e-mail: dan.baliuk@yandex.ru
 Балюк Денис Александрович.

Address for correspondence

220013, Belarus
 Minsk, P. Brovki st., 6
 Belarusian state university
 of informatics and radioelectronics
 tel. +375-29-361-89-56;
 e-mail: dan.baliuk@yandex.ru,
 Baliuk Denis Aleksandrovich.