

УДК 539.3

**АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ БИФУРКАЦИИ СОННОЙ АРТЕРИИ ЧЕЛОВЕКА
В НОРМЕ, ПРИ ПАТОЛОГИИ
И ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКТИВНОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА**

© 2011 г.

*К.М. Морозов¹, А.В. Каменский²*¹Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова²Университет Небраска-Линкольн, Небраска (США)

nano-bio@sgu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Исследование поведения бифуркации сонной артерии в норме, при патологии и после реконструктивной операции направлено на решение медицинской и социальной проблемы, связанной с оптимизацией хирургического лечения расстройств мозгового кровообращения.

Ключевые слова: численное моделирование, сонная артерия, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Нарушения мозгового кровообращения на протяжении многих лет занимают одно из лидирующих положений в структуре заболеваемости и смертности. По данным А.В. Покровского в современной России среди причин смертности на втором месте после инфаркта миокарда стоит инсульт головного мозга. В настоящее время установлено, что 80% инсультов имеют ишемический генез. Причиной ишемического инсульта может быть не только ишемия, связанная с резким уменьшением объемного кровотока вследствие стеноза или окклюзии сосуда, но и нарушение кровотока, вызванное эмболией сосудов головного мозга по типу артерио-артериолярной эмболии. Большинство авторов полагают, что причиной стенозов и окклюзий экстракраниальных отделов артерий головного мозга в 84–90% случаев ишемических поражений является атеросклероз, а источником артерио-артериолярной эмболии в 70% случаев является область бифуркации сонной артерии (БСА). Наиболее действенными способами хирургического вмешательства на БСА в настоящее время принято считать эндартерэктомию с пластикой артериотомного отверстия заплатой и стентирование. Для выработки объективных показаний к определенному виду оперативного вмешательства необходимым является предоперационное планирование, которое базируется на результатах компьютерного моделирования. Построение математической модели реальной артерии и изучение механики сосуда с точки зрения гемодинамической теории атерогенеза позволят максимально точно оценить состояние артерии конкретного пациента до операции, разрабо-

тать показания к применению пластики БСА заплатой (того или иного типа) или стентирования и провести прогнозирование результатов оперативного вмешательства. Суть теории атерогенеза сводится к отысканию гемодинамических факторов, влияющих на развитие атеросклероза, таких как низкое касательное напряжение на стенке (КНС), высокие циклические деформации (ЦД) и высокое эффективное напряжение (ЭН) в стенке сосуда. В зонах низкого значения КНС (< 1.5 Па) [1] наблюдается обильное прилипание моноцитов к эндотелию, что считается ранней стадией атерогенеза. Также установлено [2, 3], что повреждение эндотелиальной ткани, причиной которого может служить механическое воздействие, такое как высокое значение ЦД или ЭН, ведет к увеличению ее пропускной способности и является причиной накопления гладкомышечными клетками липидов. При прогрессировании процесса клетки погибают, формируя атеросклеротическую бляшку [4–6]. Работа над поставленной задачей велась по следующим направлениям:

– проведены серии экспериментов для определения физико-механических параметров стенок БСА (общей сонной артерии, наружной сонной артерии и внутренней сонной артерии), артерий виллизиевого круга, а также заплат из синтетических и биологических материалов, применяемых на сегодняшний день при пластике артерий [7–11];

– проведен сравнительный анализ гистологического строения общей сонной артерии и ее ветвей;

– на основе морфометрического исследова-

ния создана база данных геометрических и морфометрических параметров общей, наружной и внутренней сонных артерий человека с учетом возраста, пола и типа телосложения;

– разработан метод подбора параметров для моделей стенки сосуда и заплаты на основе экспериментальных данных;

– проведена трехмерная реконструкция профилей скорости по *in vivo* данным ультразвуковой доплерографии на различных участках БСА;

– разработана методика создания точных трехмерных геометрий артерий на различных стадиях заболевания и после хирургического вмешательства;

– проведено построение численно-аналитической трехмерной модели динамики кровотока и напряженного состояния для различных моделей стенок сосуда в зоне БСА в норме, при патологии (атеросклероз, извитость, аневризма), после реконструктивной операции [7–9, 11];

– рассмотрены все виды патологических извитостей (ПИ) сонной артерии (*S*-образная извитость, *C*-образная извитость, перегиб и петля), определено влияние различных видов ПИ на гемодинамические характеристики потока крови в сонной артерии [11];

– по результатам численного эксперимента получены данные по движению крови и стенок артерий, проведен анализ результатов и сравнение с клиническими данными [9];

– проведено моделирование сонной артерии с внедренным в нее стентом.

Результаты проведенных исследований позволили сделать ряд выводов. Моделирование сонной артерии (СА) в норме и на различных стадиях атеросклеротического поражения может осуществляться на основе *in vivo* данных (КТ, МРТ, УЗИ) пациента. Построенная 3D-модель позволяет детально исследовать поведение сосуда. Учет профилей скорости, податливости, ортотропии и гиперупругих свойств стенки сосуда и заплаты являются важными элементами моделирования. Исследование гемодинамики здоровой, пораженной и реконструированной СА с точки зрения механических факторов, связанных с атеросклерозом, следует проводить комплексно, т.е. рассматривать критерии низкого КНС и высоких ЦД и ЭН в совокупности. Моделирование реконструктивной операции должно проводиться с учетом индивидуальных особенностей сосуда пациента. При выборе заплаты, используемой для пластики артериотомного отверстия, необходимо учитывать механические свойства материала заплаты. Наличие стента в артерии оказывает существенное влияние на напряженно-деформирован-

ное состояние стенки артерии и гемодинамику. Определение критериев гемодинамически незначимых или малозначимых конфигурационных аномалий сонных артерий позволяет оценить их роль и место в развитии острых и хронических нарушений мозгового кровообращения. Росту аневризм способствуют высокие значения давления крови в области бифуркаций артерий. Концентрации высоких КНС и ЭН приводят к дегенеративным повреждениям стенки и вызывают ее ослабление.

Список литературы

1. Younis H.F. et al. Hemodynamics and wall mechanics in human carotid bifurcation and its consequences for atherosclerosis: investigation of interindividual variation // *Biomechan Model Mechanobiol.* 2004. V. 3. P. 17–32.

2. Howard B.V., Macarak E.I., Gunson D., Kefalides N.A. Characterization of the collagen synthesized by endothelial cells in culture // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1976. V. 73. P. 2361–2364.

3. Perktold K., Rappitsch G. Computer-simulation of local blood-flow and vessel mechanics in a compliant carotid-artery bifurcation model // *Journal of Biomechanics.* 1995. V. 28. P. 845–856.

4. Salzar R.S., Thubrikar M.J., Eppink R.T. Pressure-induced mechanical stress in the carotid artery bifurcation: a possible correlation to atherosclerosis // *J. Biomechanics.* 1995. V. 28. P. 1333–1340.

5. Thubrikar M.J., Robicsek F. Pressure-induced arterial wall stress and atherosclerosis // *Ann. Thorac. Surg.* 1995. V. 59. P. 1594–1603.

6. Vaishnav R.N., Young J.T., Patel D.J. Distribution of stresses and of strain-energy density through the wall thickness in a canine aortic segment // *Circ. Res.* 1973. V. 32. P. 577–583.

7. Kossovich L.Yu. et al. Mathematical modelling of human carotid in healthy, affected or post-corrective surgery conditions // *Topical Problem in Solid Mechanics / Eds. N.K. Gupta, A.V. Manzirov. Elite Publishing House Pvt. Ltd. India, IT Delhi.* 2008. P. 235–250.

8. Бокерия Л.А. и др. Реконструкция сонной артерии человека заплатами из различных материалов (поиск оптимального материала для улучшения результатов пластики сонных бифуркаций) // *Анналы хирургии.* 2008. №2. С. 5–19.

9. Kamenskiy A. et al. Finite element model of the patched human carotid // *Vascular and Endovascular Surgery.* 2009. V. 43, No 6. P. 533–541.

10. Иванов Д.В. Исследование артерий виллизиевого круга человека в норме и при патологии // *Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Математика. Механика. Информатика.* 2010. Т. 10(1). С. 35–44.

11. Павлова О.Е. и др. Гемодинамика и механическое поведение бифуркации сонной артерии с патологической извитостью // *Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Математика. Механика. Информатика.* 2010. Т. 10(2). С. 66–73.

**MODELING OF HUMAN CAROTID BIFURCATION IN NORMAL AND PATHOLOGICAL STATES
AND AFTER SURGICAL TREATMENT***K.M. Morozov, A.V. Kamenskiy*

The study of human carotid bifurcation behavior in normal and pathological states and after reconstructive surgery is focused on the solution of the medical and social problem connected with the optimization of surgical treatment of cerebral circulation.

Keywords: numerical modeling, carotid, stress-strain state, finite element method.