

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Н. БУРДЕНКО» МИНИСТЕРСТВА
ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАФЕДРА НОРМАЛЬНОЙ АНАТОМИИ ЧЕЛОВЕКА

МОРФОЛОГИЯ – НАУКЕ И ПРАКТИЧЕСКОЙ МЕДИЦИНЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ПОСВЯЩЕННЫЙ
100-ЛЕТИЮ ВГМУ ИМ. Н.Н. БУРДЕНКО

ИПЦ «НАУЧНАЯ КНИГА»
2018

УДК 611.01
ББК 52.51
М-806

Редакционная коллегия:

Есауленко И. Э. – д-р мед. наук, профессор, ректор ВГМУ им. Н.Н. Бурденко (председатель редакционной коллегии);

Алексеева Н. Т. – д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой нормальной анатомии человека ВГМУ им. Н.Н. Бурденко (главный редактор);

Баженов Д. В. – д-р мед. наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой анатомии Тверского государственного медицинского университета;

Будневский А. В. – д-р мед. наук, профессор, проректор по научно-инновационной деятельности, зав. кафедрой факультетской терапии ВГМУ им. Н.Н. Бурденко;

Колесников Л. Л. – д-р мед. наук, профессор, акад. РАН, зав. кафедрой анатомии человека Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова;

Черных А. В. – д-р мед. наук, профессор, первый проректор, зав. кафедрой оперативной хирургии с топографической анатомией ВГМУ им. Н.Н. Бурденко;

Клочкова С. В. – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры анатомии человека Первого МГМУ им. И. М. Сеченова;

Никитюк Д. Б. – д-р мед. наук, профессор, чл.-корр. РАН, директор ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи;

Кварацхелия А. Г. – канд. биол. наук, доцент кафедры нормальной анатомии человека ВГМУ им. Н.Н. Бурденко;

Соколов Д. А. – канд. мед. наук, доцент кафедры нормальной анатомии человека ВГМУ им. Н.Н. Бурденко (ответственный редактор).

М-806 **Морфология – науке и практической медицине** : сборник научных трудов, посвященный 100-летию ВГМУ им. Н. Н. Бурденко. – Воронеж : ИПЦ «Научная книга», 2018. – 428 с.: ил.

В настоящем издании отражены результаты научных исследований коллективов морфологических кафедр медицинских вузов России, а также специалистов центральных и региональных научно-исследовательских институтов по итогам Межрегиональной научно-практической конференции. «Клинико-морфологические параллели в урологии» и Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы исследования в морфологии».

В сборнике опубликованы статьи, посвященные закономерностям морфогенеза анатомо-физиологических систем организма в норме и при некоторых заболеваниях, представлены работы, касающиеся особенностей преподавания морфологических дисциплин в медицинских вузах.

Материалы исследований представляют интерес для анатомов, гистологов, патологоанатомов и клиницистов.

УДК 611.01

ББК 52.51

© ФГБОУ ВО «ВГМУ им. Н. Н. Бурденко»
Минздрава России, 2018

© ИПЦ «Научная книга», 2018

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВОТОКА В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СОННОЙ АРТЕРИИ НА КОНЕЧНЫЕ ВЕТВИ

Н. А. Трушель, В. А. Мансуров

*УО «Белорусский государственный медицинский университет»,
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время фрагментарны сведения о влиянии гемодинамического фактора на строение стенки сосудов мозга, а также о взаимосвязи между строением стенки артерий с особенностями кровотока, что важно для понимания причин ишемического и геморрагического инсультов. Цель настоящего исследования – установить особенности кровотока в месте разделения внутренней сонной артерии на конечные ветви у взрослого человека. По морфометрическим параметрам, соответствующим разветвлению внутренней сонной артерии на переднюю и среднюю мозговые артерии, была построена геометрическая модель, в которой материнский сосуд разделялся на два дочерних сосуда. Моделирование проводилось с учетом имеющихся в латеральных углах разделения внутренней сонной артерии утолщений (атеросклеротических бляшек) у взрослого человека. Модельные расчеты проводились с помощью пакета численного моделирования кафедры Био- и наномеханики БГУ, который решает системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в двух измерениях. В результате математического моделирования установлено, что в дочерних сосудах геометрической модели дистальнее утолщений наблюдается тенденция к турбулизации кровотока ($Re > 300$), что может способствовать механическому воздействию на эндотелий сосудов у человека. Появление локальных завихрений кровотока в области латеральных углов бифуркации модели связано с тем, что ток проходит через место стеноза, обусловленное наличием бляшек, с большей скоростью и попадает в расширенный участок сосуда, где скорость тока снижается. Максимальное воздействие потока крови наблюдается на стенку апикального угла бифуркации, что может способствовать ее деформации. Таким образом, локальные завихрения кровотока дистальнее утолщений могут способствовать повреждению эндотелия сосудов внутренней сонной артерии и увеличению протяженности и толщины бляшек от центра бифуркации к периферии. Максимальное воздействие потока крови наблюдается на стенку апикального угла бифуркации, что может способствовать ее выпячиванию и образованию аневризмы.

Ключевые слова: артерии мозга, гемодинамика, атеросклеротические бляшки.

Mathematical modeling of blood flow through the branching area of the internal carotid artery into terminal branches

N.A. Trushel, V. A. Mansurov

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

At the moment, we still do not have enough information about the impact of hemodynamic factors on the wall of brain blood vessels structure as well as the relationship between the arteries wall structure and the blood flow characteristics, which are important for understanding of ischemic and hemorrhagic strokes causes. The purpose of this study is to determine features of blood flow in the branching area of the internal carotid artery into terminal branches in the adult humans. According to morphometric parameters corresponding to the branching of the internal carotid artery to the anterior and middle cerebral arteries, a geometric model was constructed in which the mother vessel was divided into two daughter vessels. The modeling was carried out taking into account the existing thickening (atherosclerotic plaques) of the internal carotid artery in the lateral corners in an adult. Model calculations

were carried out with help of a numerical modeling package of the Department of Bio- and Nanomechanics of BSU, which calculate the systems of nonlinear partial differential equations using finite element method in two space dimensions. As the result of mathematical modeling tendency to turbulation of blood flow ($Re > 300$) in the daughter vessels of the geometric model more distant than thickenings was found, which can foster the mechanical impact on the endothelium of blood vessels in humans. The appearance of local turbulence of blood flow in the area of lateral angles of bifurcations of the model is due to the fact that blood flow passes through the place of stenosis caused by the presence of plaques with greater speed and falls into the expanded portion of the vessel where the velocity of blood flow is reduced. The maximum effect of blood flow is observed on the wall of the apical bifurcation angle, which can contribute to its deformation. Thus, local blood flow swirls distal to thickening can contribute to damage of the blood vessels endothelium of the internal carotid artery and increase the length and thickness of plaques from the center of bifurcation to the periphery. The maximum effect of blood flow is observed on the wall of the apical bifurcation angle, which can contribute to its protrusion and aneurysm formation.

Keywords: cerebral arteries, hemodynamics, atherosclerotic plaques.

Введение. Известно, что в местах разветвления мозговых артерий крупного и среднего диаметра (как правило, сосудов виллизиева круга) у взрослого человека образуются атеросклеротические бляшки, которые уменьшают их просвет [2, 5]. Выявление влияния гемодинамического фактора на строение стенки сосудов в области разветвления мозгового отрезка внутренней сонной артерии на конечные ветви поможет понять возрастные изменения стенки артерий, способствующие возникновению стеноза либо аневризмы сосудов мозга.

Цель настоящего исследования – установить особенности кровотока в месте разделения внутренней сонной артерии на конечные ветви у взрослого человека.

Материал и методы исследования. Для изучения особенностей гемодинамики в области разветвления внутренней сонной артерии на конечные ветви и изучения механического воздействия кровотока на стенку апикального (места возможного образования аневризмы) и латеральных углов (места образования бляшек) бифуркации методом математического моделирования была построена геометрическая модель (рис. 1) по заданным параметрам (табл. 1).

В геометрической модели материнский сосуд (мозговой отрезок внутренней сонной артерии) разделялся на два дочерних сосуда (переднюю и среднюю мозговые артерии) таким образом, что площадь сечения отходящих сосудов равнялась суммарной площади сечения материнского сосуда (рис. 1). Начало системы координат приходится на точку, полученную в результате продолжения внутренних линий, построенных на внутренней границе разветвляющихся сосудов. Ось абсцисс (x) проходит параллельно оси основного сосуда. От нее отсчитываются 2 угла: α – отклонение более толстого сосуда от оси материнского сосуда, который равен 15° и угол β – отклонение более тонкого сосуда, который в результате исследования изменяли. Моделирование проводилось с учетом наличия в области разветвления внутренней сонной бляшек, которые в построенной

Параметры расчета

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Диаметр материнского сосуда	R	5	Мм
Диаметр первого дочернего сосуда	r1	3	Мм
Диаметр второго дочернего сосуда	r2	2	Мм
Длина материнского сосуда	L	15	Мм
Толщина бляшки	Dr	0,2 - 0,8	М
Угол отклонения первого дочернего сосуда	A	15	Градус
Угол отклонения второго дочернего сосуда	B	изменяли	Градус

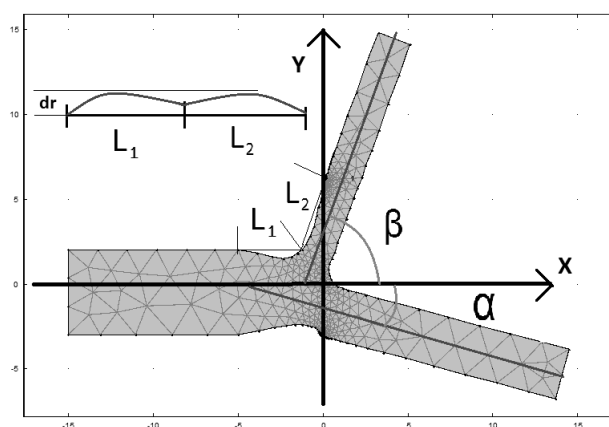


Рис. 1. Геометрическая модель, построенная по заданным параметрам.

пряжение сдвига на стенке, распределение давления крови, двумерное поле скоростей течения и число Рейнольдса. Параметры изучались при разных углах разветвления внутренней сонной артерии с учетом разной толщины бляшек (0,2; 0,6 и 0,8 мм). Кроме того, с помощью математической модели определялся оптимальный угол разветвления внутренней сонной артерии на переднюю и среднюю мозговые артерии, то есть тот, при котором существует наименьшая вероятность возникновения аневризм в результате механического воздействия кровотока на стенку сосуда.

При кровотоке возникает механическое (нормальное) напряжение, перпендикулярное к стенке сосуда (бляшке), связанное с динамическим и гидростатическим давлением в области бифуркации артерии и касательное (тангенциальное) напряжение, пропорциональное градиенту скорости (вязкое трение). Для удобства оценки напряженно-деформированного состояния стенки сосуда введена скалярная величина – квадрат суммы квадратов разностей всех напряжений, возникающих в области бифуркации артерий под действием кровотока – напряжение фон Мизеса, что с точностью до постоянного множителя соответствует энергии упругого формоизменения. Условие Мизеса можно сформулировать следующим образом: состояние текучести наступает тогда, когда энергия упругого формоизменения достигает некоторого критического значения [1].

модели представлены в виде развертки линии длиной $L_1 + L_2$. Сужение в области бифуркации описывалось уравнением четвертого порядка с локальным минимумом в области соединения внешних границ сосудов. С помощью математической модели были изучены такие параметры кровотока как напряжение фон Мизеса внутри бляшки в области апикального угла бифуркации сосуда, на-

При моделировании в качестве начальных условий было принято, что средняя скорость течения на входе в материнский сосуд есть постоянная величина, равная приблизительно 0,43 м/сек (у человека после 40 лет). На выходе разветвляющихся сосудов разность давления полагалась равной 0 (постоянная величина). Это условие соответствует постоянному расходу жидкости, протекающей через данный сегмент.

Вязкость крови, использованная в настоящем исследовании, вычислялась по формуле Каро [5]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2},$$

где η_0 – начальная вязкость, равная 29 мПа·с; η_{∞} – конечная вязкость, равная 4,3 мПа·с (модель ньютоновской жидкости); λ – структурный параметр, зависящий от деформируемости эритроцитов, равный 1,3 с; n – структурный параметр, зависящий от агрегируемости эритроцитов, равный 0,16, что соответствует нормальным показателям крови здорового человека.

Плотность жидкости полагалась равной 1050 кг/м³. Расчеты проводились с помощью пакета численного моделирования, который решает системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в двух измерениях [3].

Результаты и их обсуждение. В результате исследования установлено, что в дочерних сосудах геометрической модели наблюдается тенденция к турбулизации кровотока ($Re > 300$) дистальнее утолщений (бляшек), расположенных в области латеральных углов бифуркации, что может способствовать механическому воздействию на эндотелий сосудов в месте разветвления мозгового отрезка внутренней сонной артерии у человека. Появление локальных завихрений кровотока связано с тем, что кровь проходит через место стеноза, обусловленное наличием утолщений (приобретает большую скорость) и попадает в расширенный участок сосуда, в результате чего линия тока искривляется при сравнении с общим потоком. Локальные завихрения кровотока дистальнее бляшек могут способствовать повреждению эндотелия сосудов [2, 4, 6] и увеличению толщины, а также протяженности бляшки от центра бифуркации к периферии. Максимальное воздействие потока крови наблюдается на стенку апикального угла бифуркации (рис. 2, выделено красным цветом), что может способствовать ее деформации.

При увеличении толщины бляшек (dr) (нарастании стеноза) отмечается увеличение максимального числа Рейнольдса и уменьшение давления на весь апикальный угол бифуркации и, наоборот, чем меньше бляшка, тем меньше максимальное число Рейнольдса и больше давление крови, однако оно более равномерное на весь апикальный угол. Стеноз способствует тому, что площадь воздействия потока крови на стенку всего апикального угла ветвления сосуда уменьшается, однако увеличивается давление крови на меньший по площади участок стенки сосуда. Учитывая тот факт, что при стенозе увеличивается скорость и давление кровотока, а также проис-

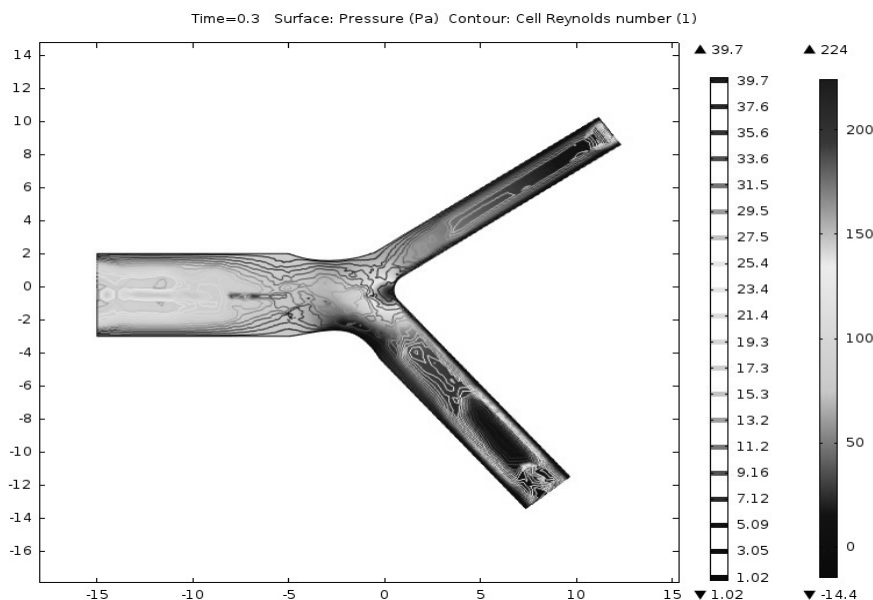


Рис. 2. Параметры изучаемой модели (число Рейнольдса, давление) при величине угла бифуркации $90^\circ(\alpha+\beta)$.

ходят возрастные дегенеративные изменения стенки сосудов (уменьшение толщины средней оболочки) [3], обусловленные атерогенезом, это может способствовать выпячиванию стенки артерии в данном месте и формированию аневризмы. Из полученных графиков видно, что значительное уменьшение числа Рейнольдса и снижение давления крови наиболее выражено при отклонении сосуда с меньшим диаметром (β) на $50\text{--}60^\circ$ (весь угол бифуркации $\alpha + \beta$ равен $65^\circ\text{--}75^\circ$). Это свидетельствует о том, что такой угол бифуркации является оптимальным, так как кровоток в нем проходит место стеноза, вызванное наличием утолщений, с минимальными энергетическими потерями. Однако в области разветвления внутренней сонной артерии таких углов нет, что обуславливает большую частоту аневризм в переднем отделе виллизиева круга.

При одинаковой толщине утолщений (бляшек), расположенных в области латеральных углов бифуркации модели, но при разной величине угла сила воздействия потока крови на апикальный угол разная. Наибольшая сила воздействия потока крови (давления) на апикальный угол наблюдается при величине угла 135° , меньше – при величине угла 90° , т.е. наибольшая вероятность выпячивания стенки артерии существует при тупом угле.

В результате исследования установлено, что при увеличении толщины бляшек максимальные значения давления крови, напряжения сдвига и напряжения фон Мизеса увеличиваются, что может вызвать выпячивание стенки апикального угла (образование аневризмы). При этом, чем больше толщина бляшек в латеральных углах бифуркации модели, тем больше воздействие на стенку апикального угла.

В результате изменения величины углов α и β геометрической модели было установлено, что при величине углов от 80° ($\alpha + \beta$) до 110° происходит значительное нарастание давления крови, напряжения сдвига на стенке сосуда и напряжения фон Мизеса. Это свидетельствует о том, что

сосудистые разветвления с величиной угла от 80° до 110° предрасполагают к возникновению расстройств мозгового кровообращения.

Таким образом, бляшки, расположенные в области бифуркации модели, влияют на кровоток. При небольшой толщине бляшек существует меньшая вероятность возникновения аневризмы, при большой толщине – вероятность возникновения аневризмы значительно повышается, что показано методом численного моделирования. Место деформации стенки апикального угла (образование аневризмы) происходит ближе к дочернему сосуду, имеющему меньший диаметр.

Бляшки, расположенные в области латеральных углов ветвления, изменяют кровоток (изменяют гемодинамику). Так, после соприкосновения потока крови со стенкой апикального угла, он отклоняется и направляется в дочерние сосуды, приближаясь к стенке латерального угла бифуркации дистальнее бляшек, что может способствовать повреждению эндотелия сосудов в этом месте и возникновению новых бляшек. Появление бляшек на протяжении сосуда вызывает искривление хода сосуда, то есть с возрастом человека артерия становится извитой. Чем больше в просвет сосуда выступает бляшка и чем больше угол бифуркации сосудов, тем дальше от центра бифуркации влияние потока крови. Это может приводить к увеличению протяженности бляшек от центра бифуркации к периферии.

Выводы

1. Бляшки, расположенные в области латеральных углов разветвления внутренней сонной артерии на конечные ветви, изменяют кровоток, приводя к увеличению их толщины, а также протяженности от центра бифуркации к периферии, что способствует стенозу сосудов (ишемии мозга). Появление бляшек на протяжении сосуда вызывает искривление хода сосуда - с возрастом человека артерия становится извитой.
2. При углах разветвления мозгового отрезка внутренней сонной артерии на переднюю и среднюю мозговую артерию от 80° до 110° существует максимальный риск возникновения аневризм. При увеличении толщины бляшек, расположенных в латеральных углах ее разветвления (нарастании стеноза), увеличивается давление крови на меньший по площади участок стенки сосуда апикального угла, что способствует образованию аневризмы. Локализация аневризмы в области апикального угла бифуркации артерии зависит от величины угла и диаметра сосудов. Гемодинамическая теория объясняет происходящие возрастные дегенеративные изменения стенки в месте разветвления мозгового отрезка внутренней сонной артерии.

Список литературы

1. Иванов Д. В., Фомкина О. А. Исследование механических свойств артерий виллизиевого многоугольника. Биомеханика 2008: тез. докл. IX Всерос. конф. по биомеханике. Н. Новгород, 2008: 189.
2. Расмуссен Т. Е., Клауз Л. В., Тоннессен Б. Г. Руководство по ангиологии и флебологии. М.: Литтерра, 2010: 555.

3. Трушель Н. А., Пивченко П. Г. Роль морфологического и гемодинамического факторов в атерогенезе сосудов виллизиева круга. Минск: БГМУ, 2013: 180.
4. Цвибель В. Д., Пеллерито Д. С. Ультразвуковое исследование сосудов. М.: Видар, 2008: 646.
5. Caro C. G. Discovery of the role of wall shear in atherosclerosis. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2009; 29: 158–161.
6. Sheffield E. A., Weller R. O. Age changes at cerebral artery bifurcations and the pathogenesis of berry aneurysms. *J. Neurol. Sci.* 1980; 46(3): 341–352.

Сведения об авторах

Трушель Наталия Алексеевна – д-р мед. наук, доцент, зав. кафедрой нормальной анатомии УО «Белорусский государственный медицинский университет» Республики Беларусь, 220116, г. Минск, пр. Дзержинского, 83, trusheln@rambler.ru

Мансуров Валерий Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры медицинской физики УО «Белорусский государственный медицинский университет» Республики Беларусь, 220116, г. Минск, пр. Дзержинского, 83.