

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ АНАСТОМОЗА НА КРОВОТОК ВО ВНУТРЕННЕЙ СОННОЙ АРТЕРИИ

Ротков С. И., Попов Е. В., Мухин А. С., Яриков А. В.

ГБОУ ВПО Нижегородская ГМА Минздрава РФ, Нижний Новгород, e-mail: prof.mukhin@mail.ru

ФГБОУ ВПО Нижегородский архитектурно-строительный университет Министерства образования и науки Российской Федерации, Нижний Новгород, e-mail: anton-yarikov@mail.ru

Цель исследования. Оценить влияние положения анастомоза после операции эверсионной каротидной эндартерэктомии на кровоток во внутренней сонной артерии методом математического моделирования. **Материалы и методы.** Целью исследования являлось изучение влияния положения анастомоза после операции эверсионной каротидной эндартерэктомии на характер и распределение кровотоков во всех сонных артериях и сравнение этого влияния. Схема исследуемого участка сонных артерий после проведения реконструкций, выполненных по способу Kieny R. и оригинальному способу. Для составления расчетной схемы использована геометрическая модель, созданная медицинским дизайнером Аароном и представленная на сайте GrabCAD. Модель, изначально созданная в системе SolidWorks, была модифицирована в системах Компас3D и AutoCAD. **Результаты.** Гидродинамические расчеты производились с помощью системы инженерного анализа CFD Flex разработки Autodesk, реализующей метод конечных элементов применительно к решению нестационарных задач гидродинамики и теплопроводности. Анализ представленных данных показывает, что влияние формы анастомоза на кровоток (массовый и объемный) во внутренней сонной артерии колеблется в пределах 0.4–8 %, а в наружной сонной артерии – в пределах 0.7–12 % по отношению к кровотоку в «здоровой» артерии. Причем нижние значения отклонений, то есть 0.4 и 0.7 %, соответствуют реконструкции, выполненной по оригинальному способу, а верхние (8–12 %) – по Kieny R. Это свидетельствует о том, что анастомоз предлагаемой конфигурации влияет на кровоток во всех ветвях общей сонной артерии незначительно по сравнению с анастомозом по Kieny R., влияние которого более существенно. **Заключение.** Предложенный новый способ эверсионной каротидной эндартерэктомии является более физиологическим и эффективным с точки зрения оценки кровотока по внутренней сонной артерии методом математического моделирования.

Ключевые слова: реваскуляризация головного мозга, внутренняя сонная артерия, эверсионная каротидная эндартерэктомия, реконструкция сонных артерий, математическое моделирование кровотока.

MODELING THE INFLUENCE OF GEOMETRY ON ANASTOMOTIC BLOOD FLOW IN THE INTERNAL CAROTID ARTERY

Rotkov S. I., Popov E. V., Mukhin A. S., Yarikov A. V.

Nizhny Novgorod state medical Academy, e-mail: prof.mukhin@mail.ru

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: anton-yarikov@mail.ru

The purpose of the study. To evaluate the influence of the position of the anastomosis after surgery eversion carotid endarterectomy on blood flow in the internal carotid artery by the method of mathematical modeling. **Materials and methods.** The aim of the study was to investigate the effect of the position of the anastomosis after surgery eversion carotid endarterectomy on the nature and distribution of flow in all carotid arteries, and the comparison of this influence. Scheme of the investigated area of the carotid arteries after the reconstructions made by the method Kieny R. and original way. To compile a design scheme used a geometric model created by the medical designer of Aaron and presented on the site GrabCAD. The model is originally created in SolidWorks, and was modified in Компас3D systems and AutoCAD. **Results.** Hydrodynamic calculations were made using system engineering and CFD analysis, Flex design Autodesk that implements the finite element method for the solution of nonstationary problems of hydrodynamics and thermal conductivity. The analysis of the presented data shows that the influence of the shape of the anastomosis on blood flow (mass and volume) in the internal carotid artery varies in the range 0.4–8 %, and in the external carotid artery – in the range of 0.7–12 % relative to blood flow in healthy arteries. The lower the variance, i.e. 0.4 and 0.7 %, consistent with the reconstruction made according to the original method, and the upper (8–12 %) – according to Kieny R. This suggests that the proposed bypass configuration affects the blood flow in all the branches of the common carotid artery slightly to the anastomosis on Kieny R., the impact of which more significantly. **Conclusion.** Proposed a new method of eversion carotid endarterectomy is more physiological and effective from the point of view of assessment of blood flow in the internal carotid artery by the method of mathematical modeling.

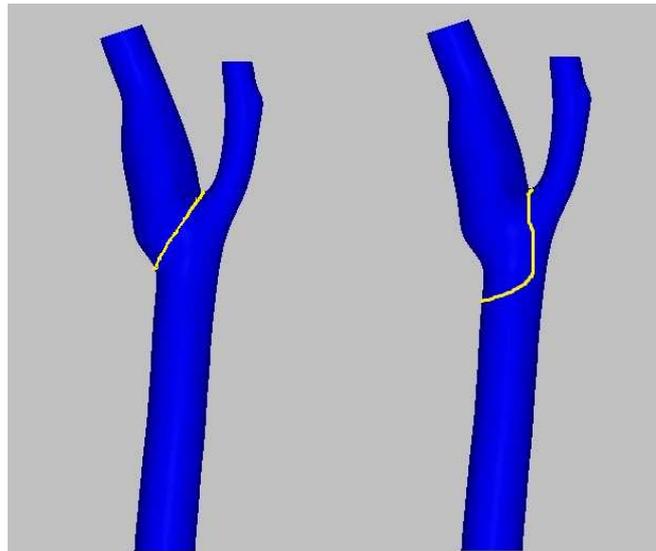
Keywords: revascularization of the brain, the internal carotid artery, eversion carotid endarterectomy, carotid reconstruction, mathematical modeling of blood flow.

В настоящее время каротидная эндартерэктомия (КЭАЭ) является самым эффективным способом предотвращения острых нарушений мозгового кровообращения (ОНМК) по ишемическому типу у больных определенных групп [8]. В течение последних двух десятилетий в мировой ангиохирургической практике лечения атеросклероза сонных артерий (СА) лидирующее место завоевывают методики классической каротидной эндартерэктомии с пластикой заплатой и эверсионной КЭАЭ (ЭКЭАЭ) [5, 6]. По данным некоторых исследователей, ЭКЭАЭ является методом реконструкции СА, которая связана с меньшим риском развития рестенозов, окклюзий внутренней сонной артерии (ВСА) и ОНМК в послеоперационном периоде [2, 6]. Сторонники ЭКЭАЭ указывают на ее преимущества: сохранение ангиоархитектоники СА, адекватная коррекция кровотока без использования инородного материала, снижение риска возникновения турбуленции кровотока, оптимальные условия для гемодинамики [2, 6, 7]. Основной задачей современной каротидной хирургии является разработка способа реконструкции, задачей которого является дальнейшее улучшение отдаленных результатов данного оперативного вмешательства [6]. Математическое моделирование кровотока может существенно помочь в разработке новых и улучшении существующих методов лечения и профилактики цереброваскулярных осложнений, в устранении побочных эффектов. В настоящее время нами предложен новый модифицированный способ ЭКЭАЭ [4, 6]. В проведенной работе планируется изучить влияние нового способа реконструкции СА на кровоток во ВСА методом математического моделирования.

Цель. Оценить влияние положения анастомоза после операции ЭКЭАЭ на кровоток во ВСА методом математического моделирования.

Материалы и методы. Математическая постановка задачи

Целью исследования являлось изучение влияния положения анастомоза после операции ЭКЭАЭ на характер и распределение кровотоков во всех СА и сравнение этого влияния. Схема исследуемого участка СА после проведения реконструкций, выполненных по способу Kieny R. и оригинальному способу, представлены на Рис. 1.



а)

б)

Рис. 1. Схема реконструкций СА, выполненных по способу Kieny R. (а) и оригинальному способу (б)

Для составления расчетной схемы использована геометрическая модель, созданная медицинским дизайнером Аароном и представленная на сайте GrabCAD [10]. Модель, изначально созданная в системе SolidWorks, была модифицирована в системах Компас3D и AutoCAD. Окончательная геометрическая модель, послужившая основой для исследований, представлена на рис. 2. Для проведения расчетов были подготовлены расчётные схемы для трех расчетных случаев, а именно: исходная артерия без атеросклеротического поражения, артерия после выполнения ЭКЭАЭ по Kieny R. и ЭКЭАЭ по оригинальному способу. Расчетные схемы представлены на рис. 2 и 3. Зона анастомоза во всех случаях моделировалась с помощью тела сложной полуцилиндрической формы радиусом 0.2 мм.

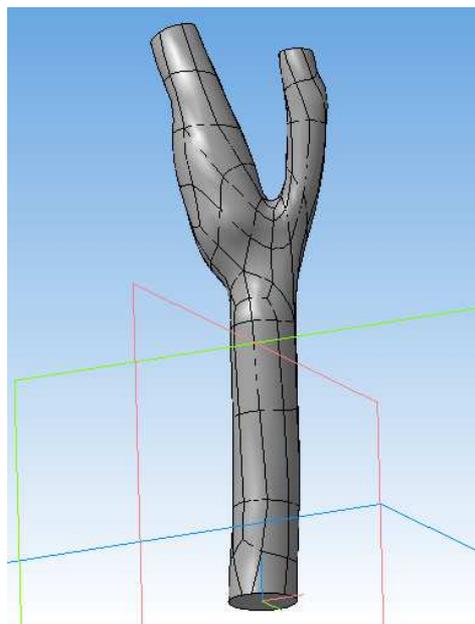


Рис. 2. Исходная геометрическая модель участка СА

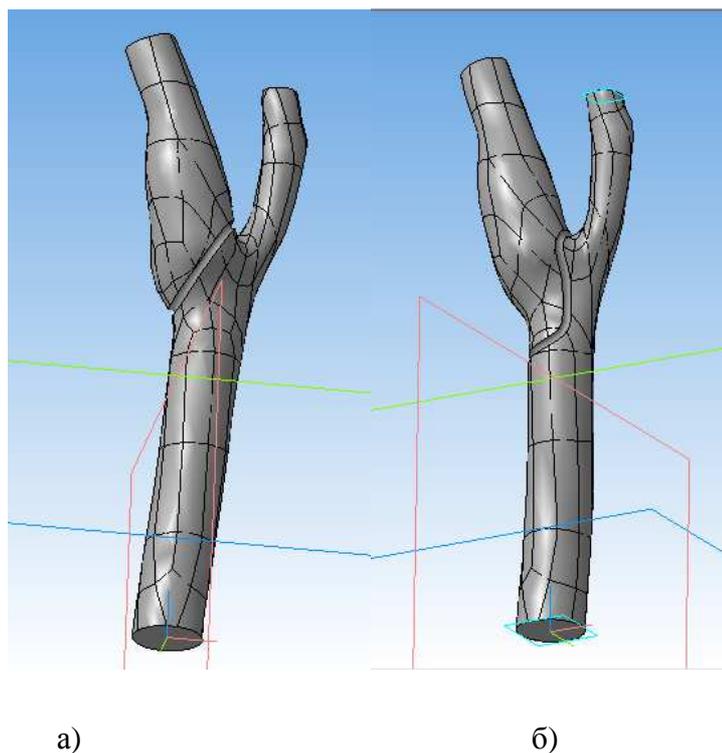


Рис. 3. Расчетные схемы реконструкций СА, выполненных по способу Кієну R. (а) и оригинальному способу (б) (Изображены только внутренние полости без ткани артерии.)

Исследования проводились с применением гидродинамических расчетов. Кровь предполагалось однородной, несжимаемой ньютоновской жидкостью. Ее движение описывается системой гидродинамических уравнений в векторном виде для несжимаемой жидкости [3]:

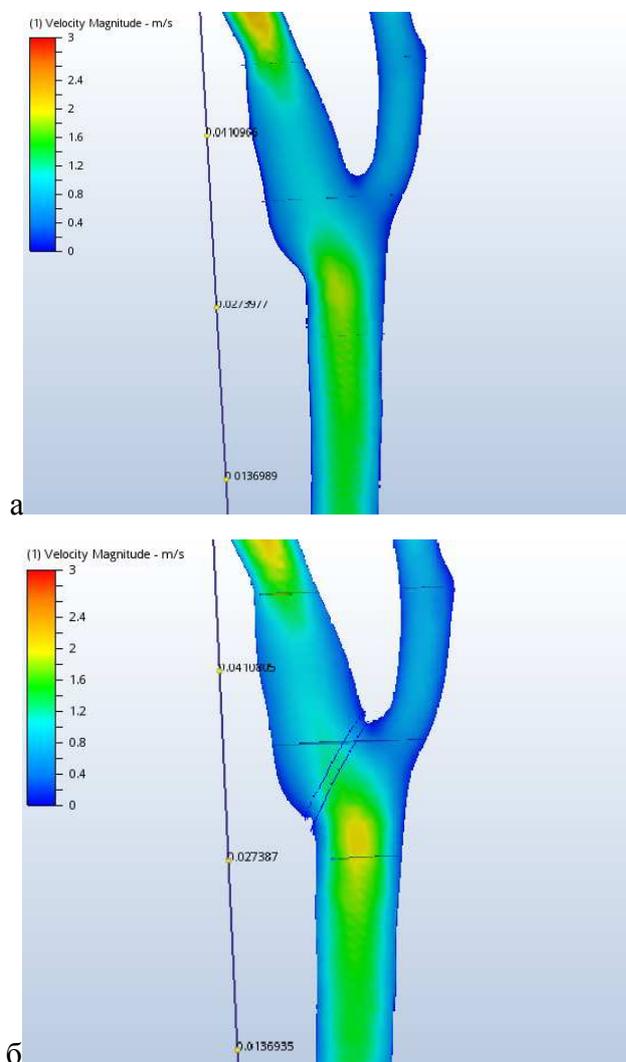
$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[-pI + \eta (\nabla \vec{u} + (\vec{u})^T) \right] + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = 0, \\ \nabla \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $\vec{u}(u, v, w)$ – вектор скорости крови, p – давление крови, I – единичная матрица, ρ – плотность жидкости, η – динамический коэффициент вязкости жидкости.

Поскольку целью исследования являлось сопоставление влияния места расположения и формы анастомоза на кровоток, механические характеристики крови и артерии были взяты в виде $\rho = 1050$ кг/м³, $\eta = 0.0037$ Па·с [1]. С целью упрощения расчет производился в стационарной постановке. В качестве граничных условий на входящих и выходящих торцах всех трех моделей была задана скорость 1,0 м/с. На входящих торцах было задано давление 19000 Па (~145 мм рт. ст.), а на выходящих торцах – 0 Па.

Результаты расчетов и их анализ. Гидродинамические расчеты производились с помощью системы инженерного анализа CFD Flex разработки AutoDesk [9], реализующей метод конечных элементов применительно к решению нестационарных задач гидродинамики и теплопроводности.

Результаты расчета в виде полей распределения скоростей кровотока по длине артерии представлены на рис. 3 для трех расчетных моделей, а именно: СА без атеросклеротического поражения, а также участка СА после проведения ЭКЭАЭ, выполненных по Кієну R. и оригинальному способу. Из рис. 3 видно, что в СА наличие анастомоза любой конфигурации достаточно слабо влияет на общую картину поля скоростей. Влияние в виде наличия турбулентностей вблизи анастомоза носит сугубо локальный характер. В то же время влияние формы анастомоза на кровоток существует, что необходимо исследовать более детально.



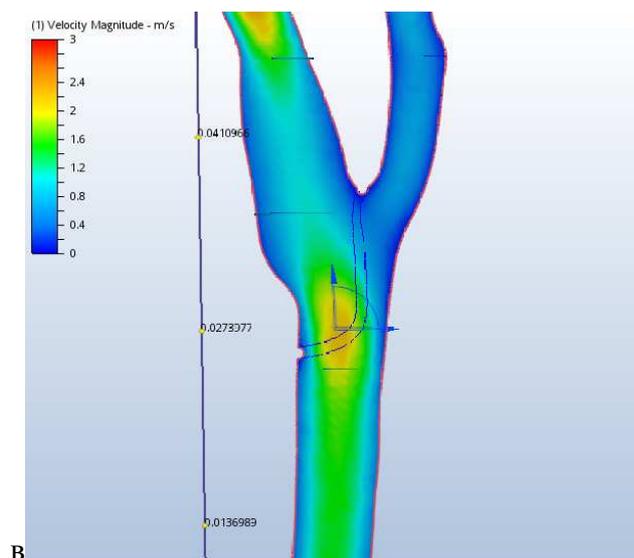


Рис. 4. Распределение скоростей кровотока по длине СА

а) «здоровой» СА; б) после ЭКЭАЭ по Кієпу R.; в) после ЭКЭАЭ по оригинальному способу

С целью детального сравнительного анализа влияния типа анастомоза на кровотоки во всех СА были вычислены кровотоки в нескольких сечениях артерии по высоте, как представлено на рис. 4.

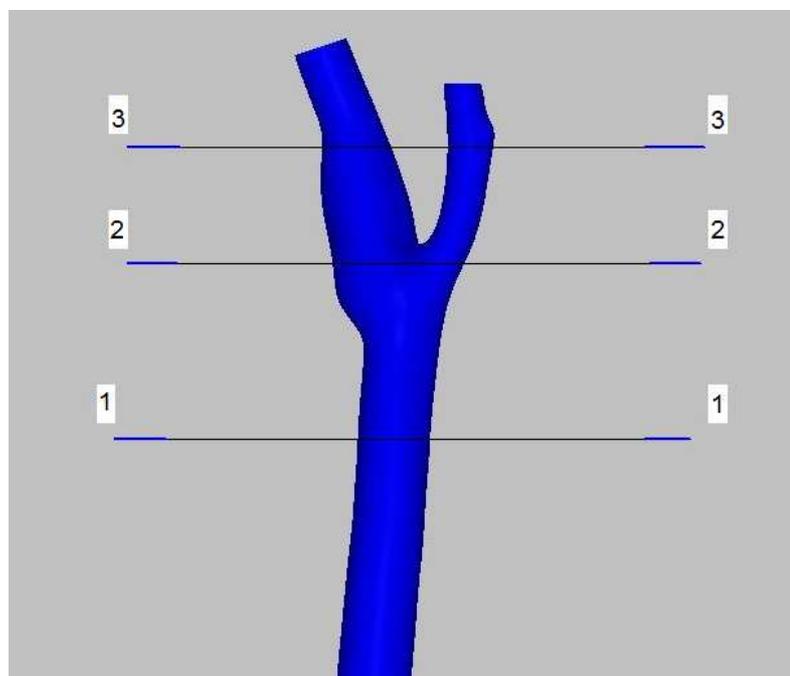


Рис. 5. Расчетные сечения артерии по высоте для определения кровотоков

Результаты расчета кровотоков и давлений крови в сечениях представлены в таблице 1. Анализ представленных данных показывает, что влияние формы анастомоза на кровоток (массовый и объемный) во ВСА колеблется в пределах 0.4–8 %, а в наружной сонной

артерии (НСА) – в пределах 0.7–12 % по отношению к кровотоку в «здоровой» артерии. Причем нижние значения отклонений, то есть 0.4 и 0.7 %, соответствуют реконструкции, выполненной по оригинальному способу, а верхние (8–12 %) – ЭКЭАЭ по Kienu R. Это свидетельствует о том, что анастомоз предлагаемой конфигурации влияет на кровоток во всех ветвях ОСА незначительно по сравнению с анастомозом ЭКЭАЭ по Куену R., влияние которого более существенно. Кроме того, как видно из таблицы, анастомоз по Kienu R. вызывает повышение давления крови во ВСА на ~27 %. В связи со сказанным можно сделать вывод о том, что новый способ реконструкции СА является более предпочтительным, чем способ Kienu R.

Расчетные значения массового и объемного кровотоков, а давлений крови в нескольких сечениях сонной артерии

	Сечение (рис. 4)	Расчетные значения показателей
«Здоровая» артерия	1	REGION # 1 and Area 2.85221e-05, m ² Mass Flowrate, 0.0288645, kg/s Volumetric Flowrate, 2.87781e-05, m ³ /s Pressure, 1.21982e+04, Pa
	2	REGION # 2 and Area 6.51812e-05, m ² Mass Flowrate, 0.0292449, kg/s Volumetric Flowrate, 2.91574e-05, m ³ /s Pressure, 8411.93, Pa
	3	HCA REGION # 3_1 and Area 1.01433e-05, m ² Mass Flowrate, 0.00411474, kg/s Volumetric Flowrate, 4.10243e-06, m ³ /s Pressure, 2712.28, Pa
		BCA REGION # 3_2 and Area 2.16558e-05, m ² Mass Flowrate, 0.0240919, kg/s Volumetric Flowrate, 2.40199e-05, m ³ /s Pressure, 5803.02, Pa
ЭКЭАЭ по Kienu R.	1	REGION # 1 and Area 2.86868e-05, m ² Mass Flowrate, 0.0294094, kg/s Volumetric Flowrate, 2.93215e-05, m ³ /s Pressure, 1.54991e+04, Pa

	2	REGION # 2 and Area 6.46701e-05, m2 Mass Flowrate, 0.0296378, kg/s Volumetric Flow, 2.95492e-05, m3/s Pressure, 9040.43, Pa	
		3	HCA
	BCA		REGION # 3_2 and Area 2.16639e-05, m2 Mass Flowrate, 0.0248357, kg/s Volumetric Flow, 2.47614e-05, m3/s Pressure, 6174.63, Pa
	ЭЖЭАЭ по оригинальному способу	1	REGION # 1 and Area 2.69261e-05, m2 Mass Flowrate, 0.0286851, kg/s Volumetric Flow, 2.85992e-05, m3/s Pressure, 1.27665e+04, Pa
2			REGION # 2 and Area 6.4607e-05, m2 Mass Flowrate, 0.029251, kg/s Volumetric Flow, 2.91636e-05, m3/s Pressure, 9066.64, Pa
		3	HCA
BCA			REGION # 3_2 and Area 2.15935e-05, m2 Mass Flowrate, 0.0242204, kg/s Volumetric Flow, 2.41479e-05, m3/s Pressure, 6145.46, Pa

Обсуждение. Главной целью гемодинамического моделирования является предсказание поведения потока крови в артериях, а также изучение комплексного воздействия разнообразных факторов на характеристики системы. Помимо моделирования параметров кровотока в артериях, значительный интерес представляет моделирование гемодинамики СА, подвергшихся реконструкции различными способами. Математическое моделирование кровотока может существенно помочь в разработке новых и улучшении существующих методов лечения и профилактики ОНМК, снижении специфических осложнений. Путем математического моделирования показано преимущество нового способа ЭКЭАЭ.

Выводы. Предложенный новый способ ЭКЭАЭ является более физиологическим и эффективным с точки зрения оценки кровотока по ВСА методом математического моделирования.

Список литературы

1. Иванов Д. В. Артерии человека с патологическими извитостями: клинические данные и численный эксперимент / Д. В. Иванов, Е. Л. Коссович // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2007: Материалы ежегодной Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2007. – С. 39–41.
2. Казанчян П. О. Эффективность реконструкций внутренних сонных артерий у пациентов, перенесших ишемический инсульт / П. О. Казанчян, Р. Н. Ларьков, А. В. Есяян, П. Г. Сотников, М. Г. Козорин // Болезни аорты и ее ветвей 2012; № 3: С. 48-51.
3. Седов Л. И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – С. 492.
4. Сергеев В. Л., Мухин А. С., Лютиков В. Г. Способы хирургической коррекции стеноза сонной артерии/ Патент на изобретение Российской Федерации № 2525529, 20.08.2014 г.
5. Сергеев В. Л. Опыт выполнения протезирования сонных артерий в региональном сосудистом центре / В. Л. Сергеев, А. В. Яриков, А. С. Мухин, В. Г. Лютиков // Медицинский альманах. – 2015. – № 3 (38). – С. 65-68.
6. Яриков А. В. Оценка отдаленных результатов нового способа эверсионной каротидной эндартерэктомии / А. В. Яриков, В. Л. Сергеев, А. С. Мухин, А. Э. Клецкин, В. Н. Волошин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 6 [Электронный ресурс]. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22939>.
7. Яриков А. В. Хирургические методы лечения стеноза сонных артерий / А. В. Яриков, А. В. Балябин, К. С. Яшин, А. С. Мухин // Современные технологии в медицине. – 2015. – № 4. – С. 189-200.

8. Babu M. A. The durability of carotid endarterectomy: long-term results for restenosis and stroke / M. A. Babu, I. Meissner, F. B. Meyer // Neurosurgery. 2013. Vol. 5, no. 72. P. 835-838.
9. CFD Flexx overview [Электронный ресурс]. <http://www.autodesk.com/products/cfd/overview>
10. GrabCAD Community [Электронный ресурс]. <https://grabcad.com/library/carotid-bifurcation>