

УДК: 612.76

Г. Башарова<sup>1</sup>, П.И. Бегун<sup>1</sup>, О.В. Тихоненкова<sup>2</sup>  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ В 3D-ПАКЕТЕ И БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ,  
ПИТАЮЩИХ МОЗГ**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

*Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью междисциплинарного подхода к методам диагностики и лечения всё возрастающего числа заболеваний брахицефальных артерий, питающих головной мозг. В связи с этим разработаны алгоритм и методика оценки состояния кровотока в кровеносных сосудах, питающих мозг в норме, при патологических изменениях и коррекции. При выполнении работы использованы компьютерные томограммы и ангиограммы сосудов головного мозга человека компьютерные программы SolidWorks, Cosmos,. По срезам томограмм в программе SolidWorks построены трехмерные компьютерные модели брахицефальных артерий с Виллизиевым кругом. В программе Cosmos проведен анализ напряженно-деформированного состояния сосудов, а в программе Ansys анализ кровотока. Механические свойства структур сосудистого русла введены для людей пожилой возрастной группы (65-75 лет). Проведен анализ скорости кровотока в сосудистом русле при различном уровне стеноза, как в левой так, и одновременно обеих внутренних сонных артериях. Анализ влияния геометрических параметров атеросклеротического осложнения в узле бифуркации, а кровотока в Виллизиевом круге. Перекрытие левой внутренней сонной артерии на 70% вызывает резкое увеличение скорости кровотока в средней мозговой артерии и передней соединительной артерии.*

**Ключевые слова:** брахицефальные артерии, кровотока, стеноз, компьютерные моделирование, скорость, давление

**Введение.** Число сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) ежегодно имеет тенденцию к увеличению [1]. Наиболее часто поражаемым отделом сонной артерии является область бифуркации синуса общей сонной артерии (Рисунок 1).

Успешное предупреждение и эффективное лечение нарушений мозгового кровообращения во многом зависит от диагностики параметров потока крови. При гемодинамически значимых стенозах выполняют операции двух видов: 1) каротидная эндартерэктомия, основана на удалении патологического образования (бляшки) открытым методом. 2) баллонная ангиопластика и стентирование артерий, основанная на дилатации бляшки и установки в этом месте стента, увеличивающих

просвет сосуда и восстанавливающих ход крови по кровеносному сосуду [2].

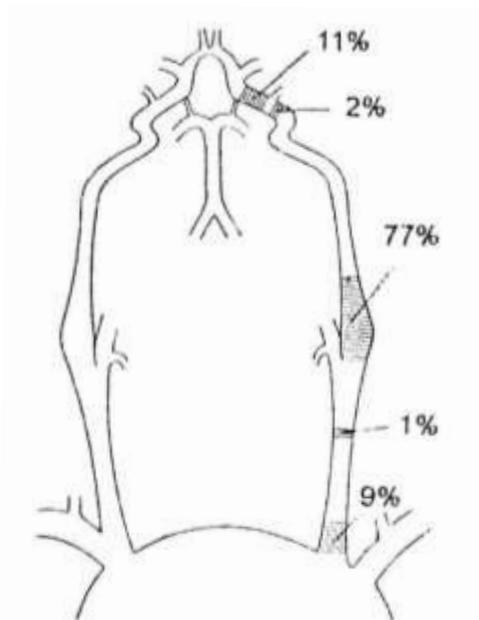


Рисунок 1 – Схема частоты поражений различных отделов общей сонной артерии

**Цель работы:** Разработка алгоритма и методики оценки состояния кровеносных сосудов, питающих мозг в норме, при патологических изменениях и коррекции.

Для реализации цели: 1) построены содержательные модели брахиоцефальных артерий (БЦА), питающих головной мозг; 2) по срезам компьютерных томограмм построены компьютерные геометрической модели кровеносных сосудов пациентов; 3) построены компьютерные модели и проведен анализ течения кровотока в кровеносных сосудах; 4) проведен анализ влияния атеросклеротических отложений на гемодинамику в Виллизиевом круге; 5) разработан алгоритм и методика исследования напряженно – деформированного состояния кровеносных сосудов при дилатации и стентировании.

**Метод исследования.** При построении алгоритма применен интегральный компьютерный метод [3].

В работе использованы компьютерные томограммы и ангиограммы сосудов головного мозга человека. По срезам томограмм в программе SolidWorks построены трехмерные компьютерные модель БЦА с Виллизиевом кругом. В программе Cosmos, конвертируемой с программой SolidWorks, проведен анализ напряженно – деформированного состояния

сосудов. Компьютерные модели экспортировались в программу Ansys, где созданы конечно-элементные модели для анализа кровотока.

При исследовании состояния кровеносных сосудов, питающих мозг, использованы клинические данные: КТ-ангиограммы и МРТ, полученные в отделении эндоваскулярной хирургии Городской многопрофильной больницы № 2 города Санкт-Петербурга (Рисунок 2).

Механические свойства структур сосудистого русла введены для людей пожилой возрастной группы (65–75 лет) в соответствии с [4]. По КТ- ангиограммам определены внутренний и внешний диаметры кровеносных сосудов.

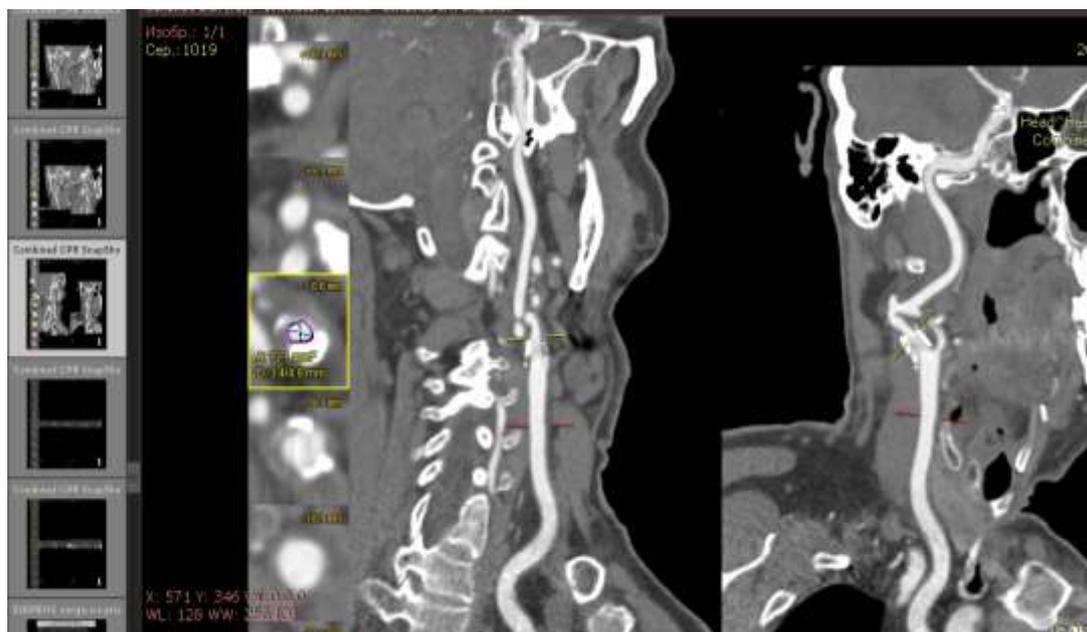


Рисунок 2 – КТ-ангиограммы пациента

Содержательная модель кровеносных сосудов построена при следующих допущениях: 1. Материал стенки кровеносного сосуда сплошной, однородный, изотропный; 2. Кровь - несжимаемая однородная вязкая ньютоновская жидкость с динамической вязкостью 0,004 Па·с и плотностью 1050; 3. Число Рейнольдса на входе в аорту 3000. 4. Давление на входе в аорту 15 кПа, на выходе из передней мозговой артерии - 9 кПа, скорость на входе в аорту 0,3; 5. Стенки кровеносных сосудов идеально-упругие с модулем нормальной упругости 0,55 МПа, коэффициентом

Пуассона 0,49, плотностью 1400 [6]. 6. Бляшка мягкая, модуль нормальной упругости 0,275 МПа, коэффициентом Пуассона 0,4.

Компьютерная трехмерная геометрическая модель, построенная в программе SolidWorks, приведена на Рисунке 3.

При вычислениях использован численный сеточный метод – метод конечных элементов. Введены линейные тетраэдральные конечные элементы. Определено число конечных элементов, на которые следует разбить – компьютерную модель при проведении вычислений. Выбрано число конечных элементов 470 тысяч, начиная с которого, при увеличении числа конечных элементов, изменение перемещений стенки сосуда незначительно (Рисунок 4).

Анализ течения кровотока в сосудистом русле проведен в модуле CFX программы Ansys.

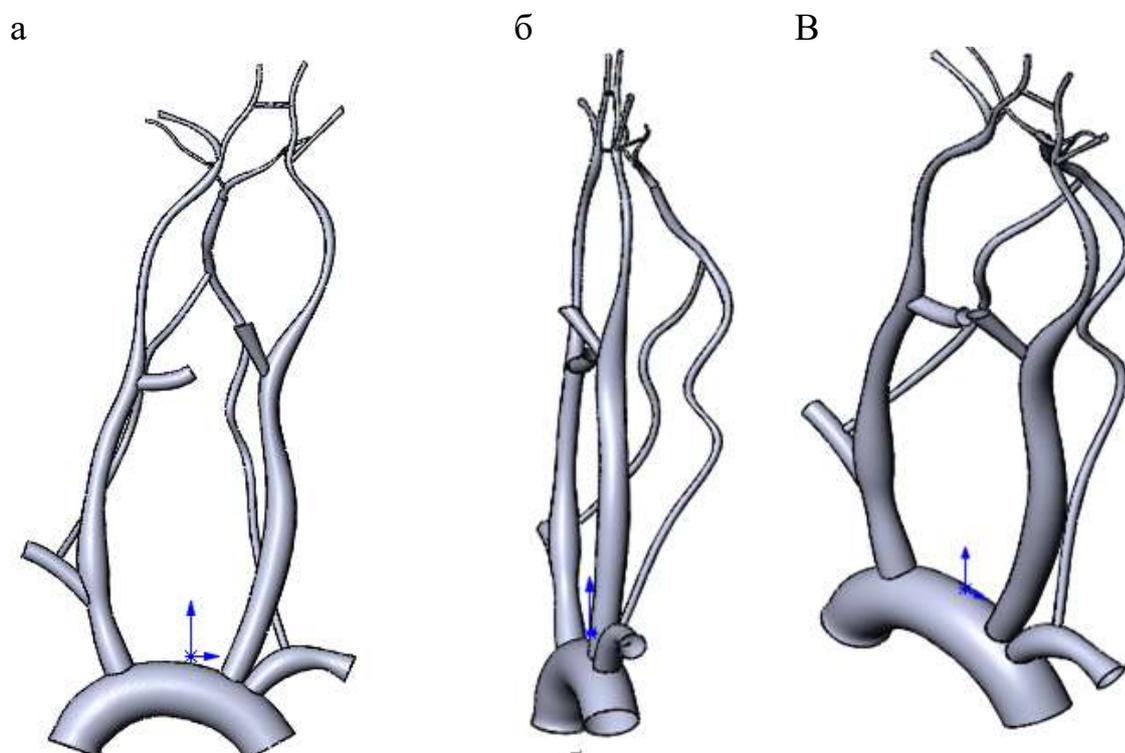


Рисунок 3 – Компьютерная геометрическая модель БЦА с Виллизиевым кругом: а) вид спереди, б) вид сбоку, в) изометрия

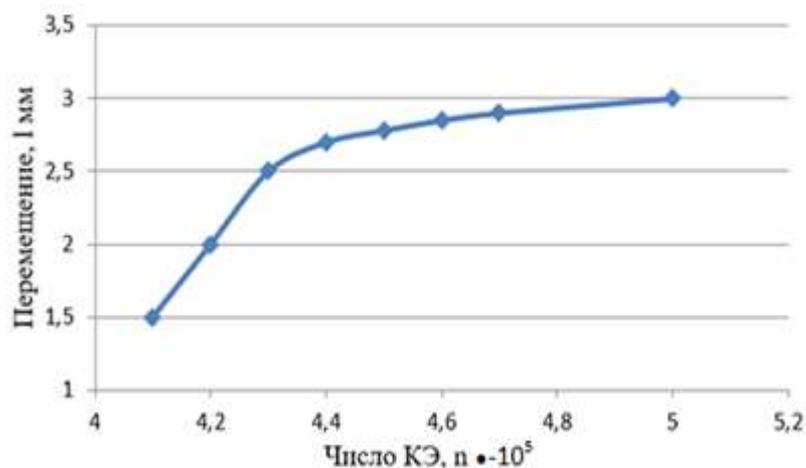


Рисунок 4 – Зависимость перемещения стенок сосудов от числа конечных элементов  $n$

На Рисунке 5 приведены скорости кровотока при 30 % и 70 % стенозе левой внутренней сонной артерии, а на Рисунке 6 при 30 % стенозе обеих внутренних сонных артериях.

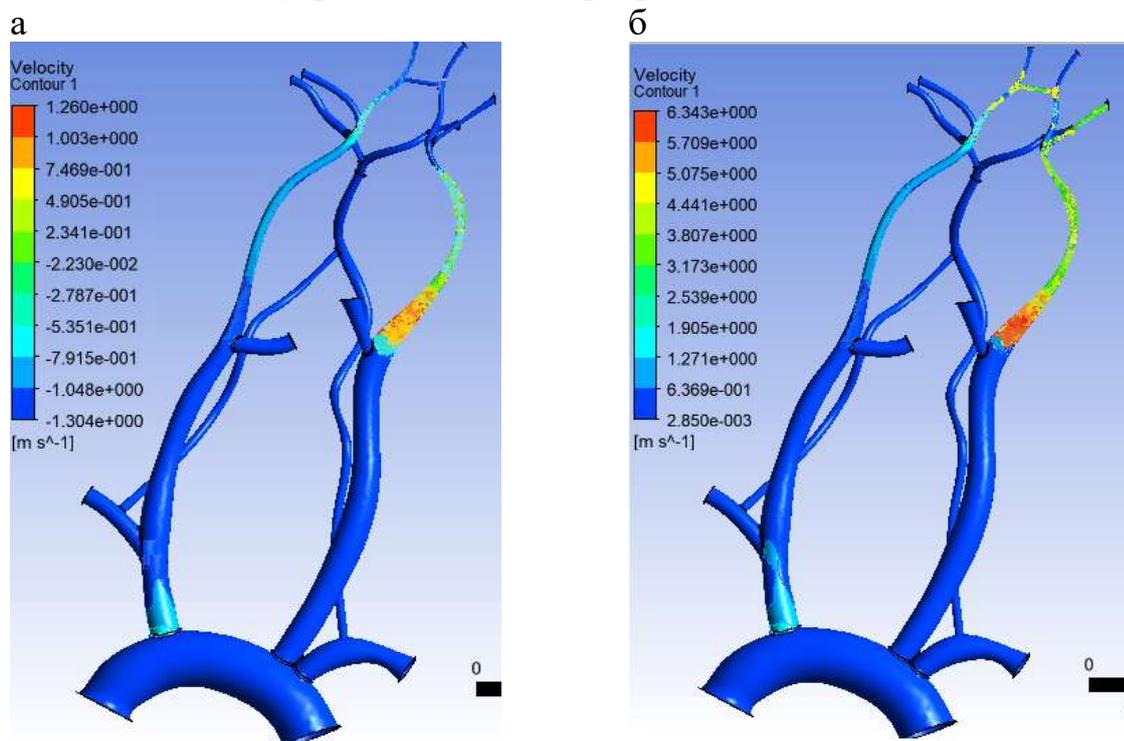


Рисунок 5 - Эпюры скорости кровотока при 30 % (а) и 70 % стенозе левой внутренней сонной артерии

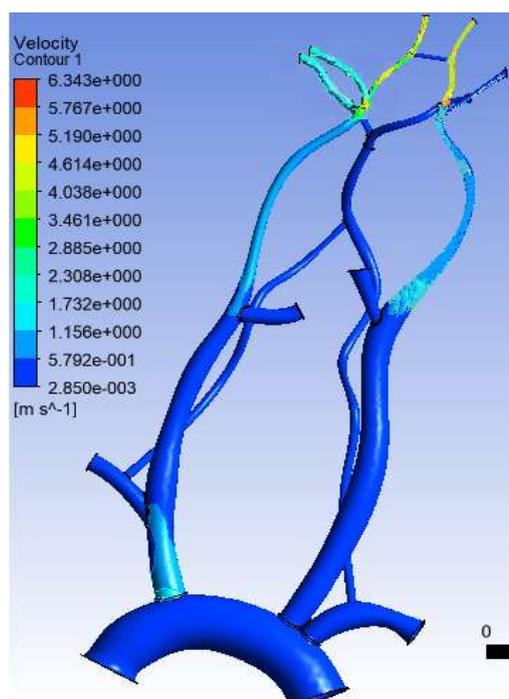


Рисунок 6 – Эпюра скорости кровотока при 30 % стенозе обеих внутренних сонных артериях

По сравнению с нормой скорости увеличиваются в месте стеноза и в Виллизиевом круге. При 30 % стенозе обеих ВСА происходят значительные изменения скорости кровотока в артериях Виллизиева круга.

#### **ОБСУЖДЕНИЕ**

Скорость кровотока при 30 % стенозе в месте сужения достигает значения 1,26, при 70 % стенозе – 6,1. Когда левая и правая внутренние сонные артерии стенозированы на 30 %, скорость крови в местах сужения 2,3, в передних мозговых артериях 4,3, в средних мозговых артериях - 1,15. При перекрытии сосуда менее чем на 30 % одной ВСА атеросклеротическая бляшка не значительно влияет на кровоток в Виллизиевом круге, т. к. незначительно увеличение скорости кровотока в месте стеноза. Перекрытие ВСА на 70 % вызывает резкое увеличение скорости кровотока в месте стеноза, в средней мозговой артерии слева и передней соединительной артерии. При этом скорость кровотока из правой ВСА заметно возрастает. При 30 % стенозе сразу двух ВСА скорость кровотока после стеноза в обеих ВСА увеличивается и приводит к увеличению кровотока в передней, средней и задней мозговых артериях: Результаты вычислений совпадают с результатами доплерографических измерений [5].

На Рисунке 7 приведены эпюры линий тока и скоростей в областях бляшек длиной  $l=0.036\text{м}$  с перекрытием сосуда на 70% (а) и 20% (б).

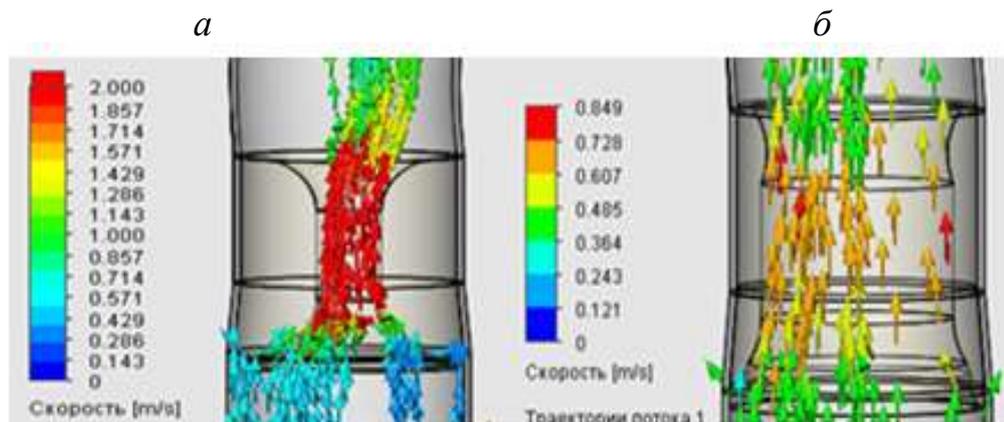


Рисунок 7 – Эпюры линий токов крови и скоростей в областях бляшек

На Рисунках 8 и 9 представлены графики изменения скоростей вдоль сонных артерий, когда просвет открыт на 30% и 80%. На графиках выделены участки: 1- правой общей сонной артерии, 2 –правой внутренней, 3 –передней соединительной артерии, 4 –левой внутренней сонной артерии, 5 –бляшки, 6 –левой общей сонной артерии. В сосуде открытом на 30% скорость в сужении возрастает до 7 , а скорость в передней соединительной артерии уменьшается.

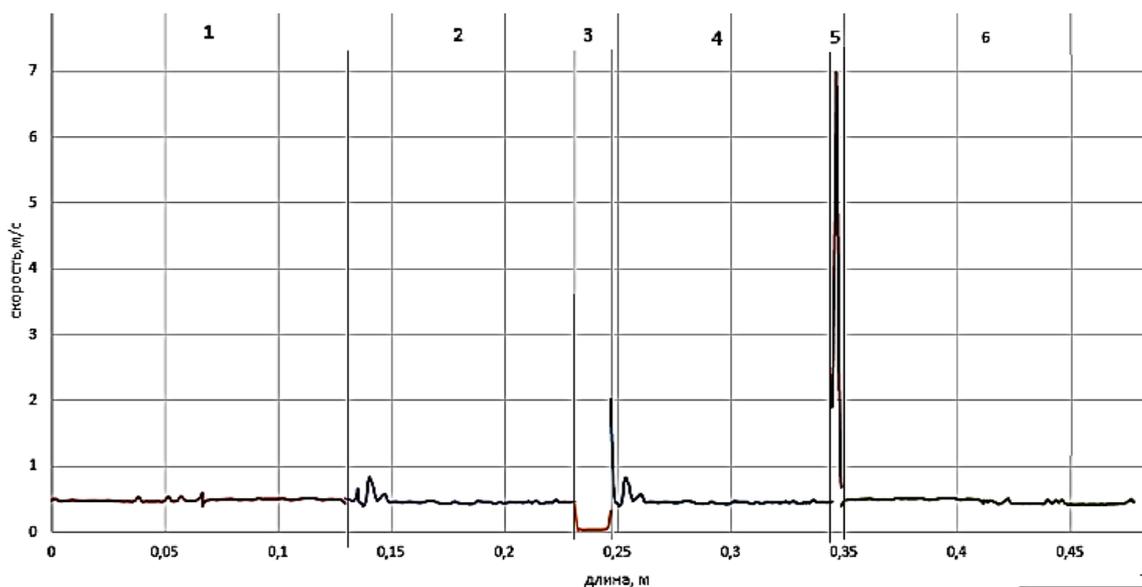


Рисунок 8 – График изменения скорости вдоль сонных артерий для случая, когда просвет открыт на 30%

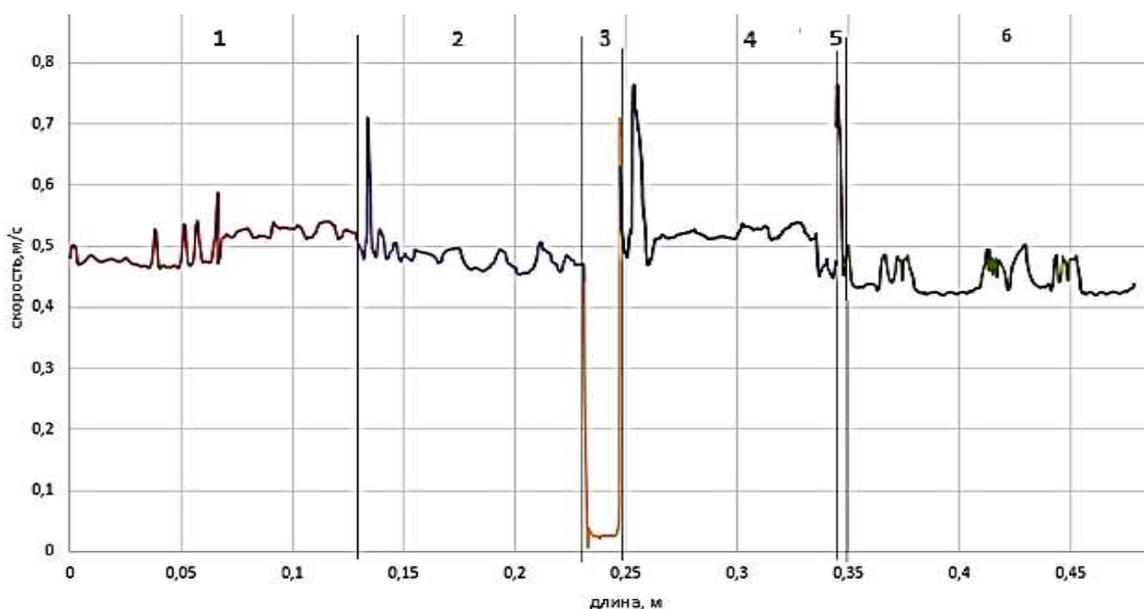


Рисунок 9 – График изменения скорости вдоль сонных артерий для случая, когда просвет открыт на 80 %

На Рисунке 10 приведены графики изменения скорости и завихренности вдоль передней соединительной артерии при просвете левой ВСА 80 %.

Завихренность крови в передней соединительной артерии при переходе от сонной артерии с бляшкой к здоровой сонной артерии, резко увеличивается.

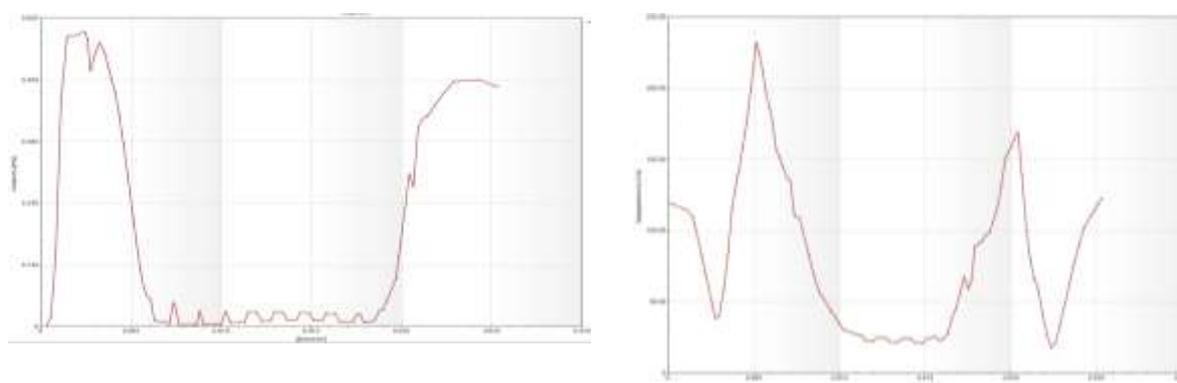


Рисунок 10 – Графики изменения скорости и завихренности вдоль передней соединительной артерии для случая, когда просвет внутренней сонной артерии открыт на 80 %

В алгоритме стентирования стенозированных ВСА учтены упругие и пластические деформации стента.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований могут быть использованы как дополнительный диагностический инструмент при анализе мозгового кровообращения в специфических анатомических случаях или в случае планирования операций при закупорке нескольких артерий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Суслина З.А. Сосудистые заболевания головного мозга: Эпидемиология. Патогенетические механизмы. Профилактика / З.А. Суслина, Ю.А. Варакин, Н.В. Верещагин, 2-е изд., доп. и перераб. М.: МЕДпресс-информ, 2009. 352с
2. Атеросклероз церебральных сосудов головного мозга // nprazdniki.ru [электронный ресурс] URL: nprazdniki.ru/sosudy/cerebralnyj-ateroskleroz-cto-jeto-takoe.html (дата обращения 20.03.2018)
3. Бегун П.И. Биомеханическое моделирование объектов протезирования: учебное пособие / П.И. Бегун. СПб.: Политехника, 2011. 464 с.
4. Морфометрические варианты задней соединительной артерии / Фомкина О.А., Николенко В.Н., Гладилин Ю.А. // Весенняя научная сессия кафедры анатомии человека Саратовского ГМУ им. В.И. Разумовского. 2014, вып. (№) 6. С. 948–951
5. Куликов В.П. Допплерографическая регистрация феномена винтового движения крови в общих сонных артериях у людей // Ультразвуковая и функциональная диагностика 2006 Вып. (№) 2, 96 – 98.

G. Basharova<sup>1</sup>, P.I. Begun<sup>1</sup>, O.V. Tikhonenkova<sup>2</sup>

### MODELING IN A 3D PACKAGE AND BIOMECHANICAL STUDY THE CONDITION OF BLOOD VESSELS FEEDING THE BRAIN

<sup>1</sup> *The First Electrotechnical University, St. Petersburg*

<sup>2</sup> *Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

*Cardiovascular diseases are the leading cause of death in the world. A serious problem of modern medicine is the creation of effective methods of treatment and prevention of cardiovascular diseases. Mathematical modeling and numerical calculations of blood flow in a network of vessels with pathologies play an increasing role in their development. They allow to predict surgical operations, to optimize the form of implants, to investigate their effects on hemodynamics. The article discusses the development of algorithm and methodology for assessment of blood vessels that feed the brain is normal, the pathological changes and the correction. To implement this: 1) built a conceptual model of*

*brachiocephalic arteries that supply the brain; 2) sections of computer tomograms built computer geometrical models of the blood vessels of the patients; 3) constructed computer models and the analysis of the flow of blood flow in blood vessels; 4) an analysis of the impact of atherosclerotic deposits on the hemodynamics in the circle Willis; 5) an algorithm and a method of studying the stress – strain state of blood vessels during dilation and stenting have been developed. The results of the study can be used as an additional diagnostic tool in the analysis of cerebral circulation in specific anatomical cases or in the case of planning operations with blockage of several arteries.*

**Keywords:** brachiocephalic arteries, blood flow, stenosis, computer modeling, pressure velocity

## REFERENCES

1. Suslina Z.A. Vascular diseases of the brain: Epidemiology. Pathogenetic mechanism. Prevention / Suslina Z.A., Varkin Y.A., Verechagin N.V., 2-e edition M.: MED press-inform, 2009. 352p
2. Atherosclerosis of cerebral vessels of the brain // nprazdniki.ru [electronic resource] URL: [nprazdniki.ru/sosudy/cerebralnyj-ateroskleroz-cto-jeto-takoe.html](http://nprazdniki.ru/sosudy/cerebralnyj-ateroskleroz-cto-jeto-takoe.html) (date of access 20.03.2018)
3. P.I. Begun. Biomechanical simulation of prosthetics objects: Textbook. – SPb.: Politechnika, 2011. – 464 p
4. Morphometric variants of the posterior communicating artery / Fomkina O. A., Nikolenko V. N., Gladilin, Y. A. // Spring scientific session ka-Phaedra of human anatomy, Saratov state medical University n. V. I. Razumovsky. 2014, issue. (N) 6. P. 948-951
5. Kulikov V. P. Dopplerographic registration of the phenomenon of screw blood movement in common carotid arteries in humans // Ultrasound and functional diagnostics 2006 Vol. (N) 2, P. 96 – 98.