

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВОТОКА СОННОЙ АРТЕРИИ ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Д.А. Балюк<sup>1</sup>, Н.А. Шевцов<sup>1</sup>, М.В. Давыдов<sup>1</sup>, А.Н. Осипов<sup>1</sup>, А.В. Фролов<sup>2</sup>*

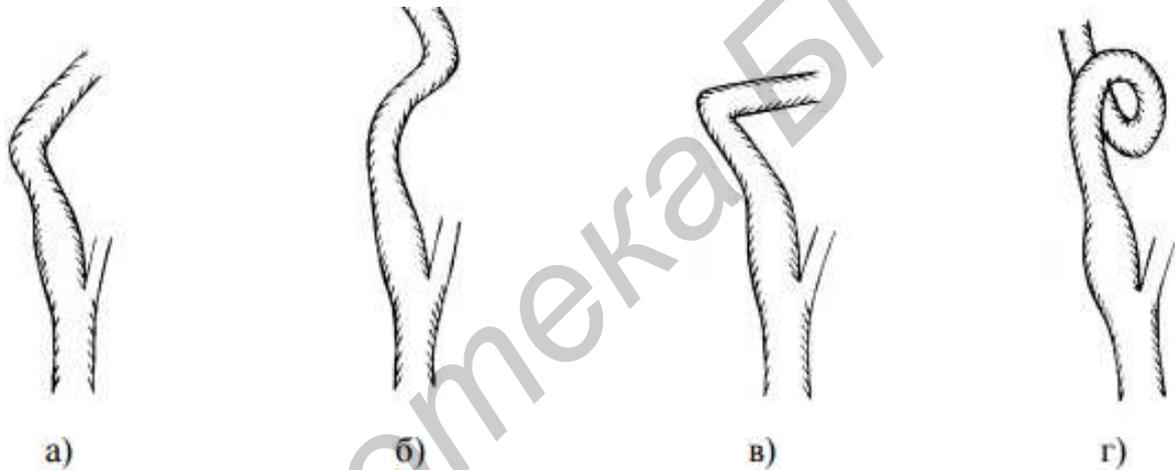
<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П.Бровки 6, БГУИР, 220013, Минск, Беларусь, тел.: +375 29 7636186  
E-mail: [shevtsov10089@gmail.com](mailto:shevtsov10089@gmail.com)

<sup>2</sup>РНПЦ «Кардиология», 220036, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Р. Люксембург, 110.

The basic pathology of human carotid artery. The results of modeling human blood flow finite element method through the program FlowVision.

Нарушение мозгового кровообращения представляет одну из самых серьезных проблем, поскольку приводит к полной или частичной утрате трудоспособности и характеризуется высокой степенью летальности. На данный момент среди причин смертности инсульт головного мозга занимает второе место после инфаркта миокарда.

Причинами нарушения мозгового кровообращения ишемического характера являются атеросклероз сонных артерий (СА) и их патологическая извитость (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Виды извитостей: а) С-образный изгиб, б) S-образный изгиб, в) перегиб, г) петля

Для восстановления кровообращения в пораженных сосудах помимо медикаментозного лечения нередко проводятся реконструктивные операции, и часто невозможно объективно оценить, какой тип оперативного вмешательства будет оптимальным для конкретного пациента.

Вопросы моделирования гемодинамики крупных кровеносных сосудов приобретают в последнее время все большую актуальность.

Это связано с медицинскими проблемами реконструкции сосудистого русла при атеросклеротических поражениях и необходимостью прогнозирования возможного поведения сосуда в ближайшие и отдаленные периоды после оперативного вмешательства.

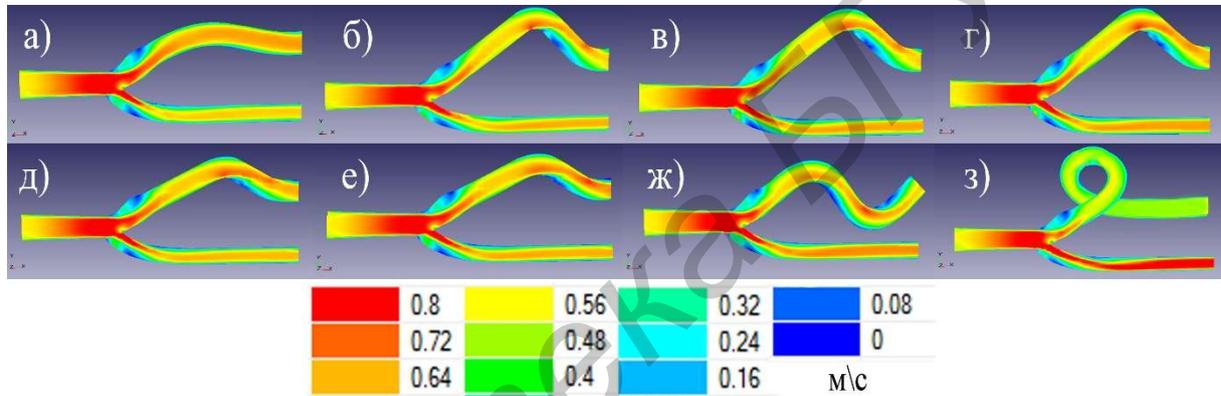
[1]

В данной работе было проведено моделирование кровотока человека методом конечных элементов. Для моделирования использовалась среда FkrowVision. При моделировании решены такие задачи как: построение геометрии сонной артерии, задание физических свойств сред, задание граничных и других условий модели (таблица 1). Проанализировали решение с помощью средств цветной графики.

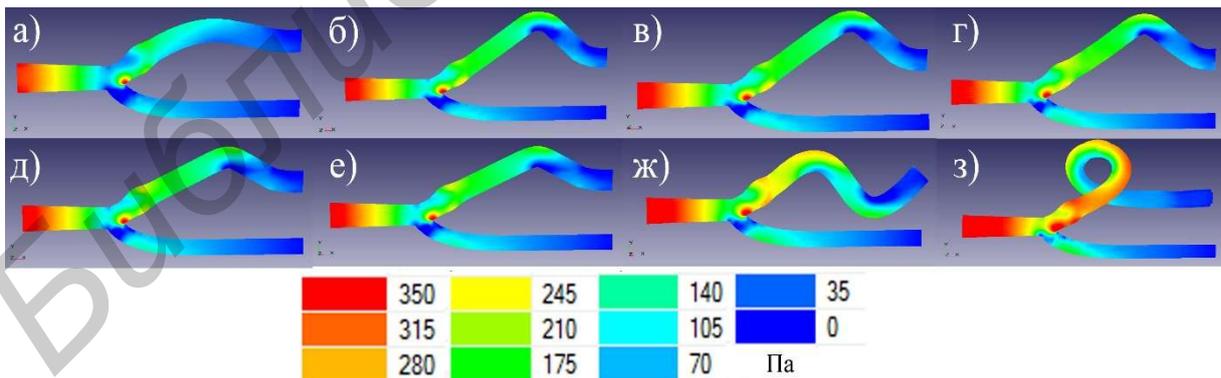
Ниже представлен анализ изменения параметров кровотока (скорость и давление) при S-образной патологии, петле и C-образной патологии с различным углом изгиба ( $130^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ) (рисунок 1,2).

Таблица 1 – Характеристики моделируемой сонной артерии

Тип СА	Диаметр, мм	Угол изгиба, град.	Скорость кровотока в сонной артерии, м/с
без патологий	6-8-10	0	0,5
с изгибом	6-8-10	130	0,5
с изгибом	6-8-10	120	0,5
с изгибом	6-8-10	110	0,5
с изгибом	6-8-10	100	0,5
с изгибом	6-8-10	90	0,5
с изгибом	6-8-10	S-обр.	0,5
с петлей	6-8-10	-	0,5



**Рисунок 2** – Распределение скорости в продольном сечении сосуда: а) без патологии, б) C-образная патология с углом изгиба  $90^{\circ}$ , в) C-образная патология с углом изгиба  $100^{\circ}$ , г) C-образная патология с углом изгиба  $110^{\circ}$ , д) C-образная патология с углом изгиба  $120^{\circ}$ , е) C-образная патология с углом изгиба  $130^{\circ}$ , ж) S-образная патология, з) петля



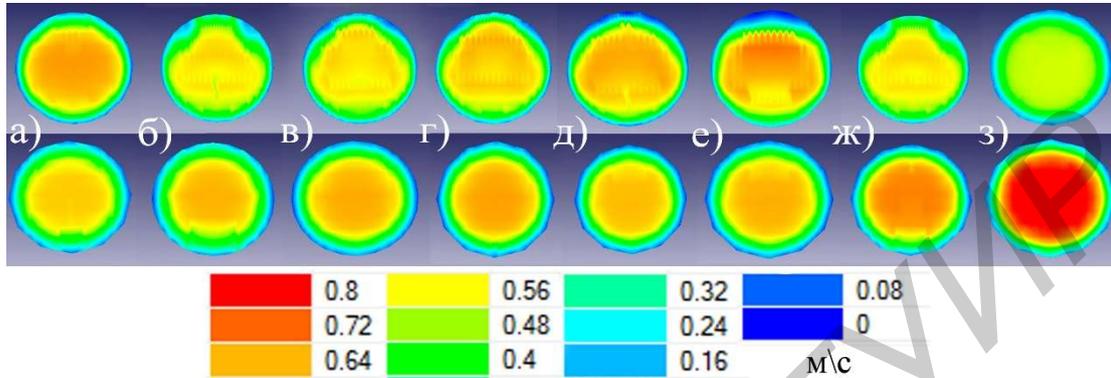
**Рисунок 3** – Распределение давления в продольном сечении сосуда: а) без патологии, б) C-образная патология с углом изгиба  $90^{\circ}$ , в) C-образная патология с углом изгиба  $100^{\circ}$ , г) C-образная патология с углом изгиба  $110^{\circ}$ , д) C-образная патология с углом изгиба  $120^{\circ}$ , е) C-образная патология с углом изгиба  $130^{\circ}$ , ж) S-образная патология, з) петля

После проведения моделирования была высчитана объемная скорость кровотока на выходе из внутренней и внешней сонной артерии (таблица 2). Для этого поперечное сечение артерии (рисунок 4) было разбито по цветовому критерию распределения скорости на

элементарные площади. Учитывая данный факт, объемная скорость кровотока была рассчитана по формуле:

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

где  $v_i$ ,  $S_i$  – скорость и площадь  $i$ -го цвета.



**Рисунок 4** – Распределение скорости в поперечном сечении сосуда: а) без патологии, б) S-образная патология с углом изгиба 90°, в) S-образная патология с углом изгиба 100°, г) S-образная патология с углом изгиба 110°, д) S-образная патология с углом изгиба 120°, е) S-образная патология с углом изгиба 130°, ж) S-образная патология, з) петля

Таблица 2 – Объемная скорость кровотока в СА

Тип СА	Объемная скорость кровотока во внешней СА $Q$ , $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-6}$	Объемная скорость кровотока во внутренней СА $Q$ , $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-6}$
без патологий	28,31	12,198
с изгибом 130	27,46	12,346
с изгибом 120	26,66	12,846
с изгибом 110	25,06	12,872
с изгибом 100	24,81	13,004
с изгибом 90	23,48	13,764
с изгибом S-обр.	21,01	13,963
с петлей	20,45	16,0367

В результате моделирования установлено, что уменьшение угла изгиба приводит к увеличению зоны низких скоростей и завихрений у выпуклой стенки изгиба сосуда. Возрастает перепад давления в поперечном сечении в месте изгиба. Это приводит к уменьшению объема крови, поступающей в мозг. Моделирование показало, что уменьшение объема крови, проходящей через внешнюю СА, сказывается на его увеличении во внутренней СА. Уменьшение угла изгиба приводит к области высоких эквивалентных и касательных напряжений на стенке в месте изгиба сонной артерии на вогнутой стороне стенки, что может привести к ее повреждению и возможности образования септы (складки). Данное осложнение может привести к схлопыванию артерии и полному перекрытию кровотока.

#### Литература

1. Патологическая извитость позвоночных и сонных артерий, сосудов головы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://sosudinfo.ru/>.