

*М. С. Супиченко*

## **ПОВЕДЕНИЕ КРОВОТОКА В РАЗЛИЧНЫХ БИФУРКАЦИЯХ ПРИ СТЕНОЗИРОВАНИИ ОДНОГО ИЗ ОТХОДЯЩИХ СОСУДОВ**

*Научные руководители: канд. техн. наук, доц. В. А. Мансуров,*

*д-р мед. наук, проф. Н. А. Трушель*

*Кафедра медицинской и биологической физики,*

*Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск*

*M. S. Supichenko*

## **BEHAVIOR OF THE BLOODFLOW IN DIFFERENT BIFURCATIONS WHEN STENOSING ONE OF THE BRANCH VESSELS**

*Tutors: assistant professor V. A. Mansurov,*

*professor N. A. Trushel*

*Department of Medical and Biological Physics,*

*Belarusian State Medical University, Minsk*

**Резюме.** В ходе математического моделирования кровотока в условиях нормы и при патологии на одном из дочерних сосудов было получено, что для определения критического уровня стенозирования для всех выделенных видов сосудистых бифуркаций характерно относительно устойчивое поведение при изменяющихся условиях для кровотока. Критический уровень стеноза составил для неровных толстых острых и подострых и для неровных тонких острых бифуркаций — 75-80%, для неровных тонких подострых — 70-75%, для ровных острых — 65-70%, для ровных подострых — 60-65%. Таким образом, наименее «устойчивыми» к возможным изменениям просвета видами бифуркаций оказались ровные, наиболее «устойчивыми» — неровные.

**Ключевые слова:** кровоток, гемодинамика, бифуркация, стеноз, стенозирование, математическое моделирование.

**Resume.** In the course of mathematical modeling of blood flow in normal conditions and in pathology on one of the daughter vessels, it was found that to determine the critical level of stenosis for all selected types of vascular bifurcations, relatively stable behavior under changing conditions for blood flow is typical. The critical level of stenosis was for curve thick acute and subacute and for curve thin acute bifurcations - 75-80%, for curve thin subacute - 70-75%, for straight sharp subarrays - 65-70%. Thus, the types of bifurcations that turned out to be the least “resistant” to possible changes in the lumen were straight, the most “resistant” - curve.

**Keywords:** blood flow, hemodynamics, bifurcation, stenosis, stenosing, mathematical modeling.

**Актуальность.** Для нормального функционирования всех органов и тканей тела человека необходимо выполнение условия их адекватного кровоснабжения. Из крови клетки получают питательные вещества и снабжаются кислородом, которые необходимы для обеспечения их нормальной жизнедеятельности. При изменении условий кровотока в тканях нарушается и их трофика, что может привести к повреждению клеток, невыполнению ими функций или их гибели. Патологические изменения гемодинамики могут быть связаны с нарушением состава крови, например, при эритроцитозе, повышенном содержании белков в крови или уменьшении содержания воды в плазме повышается вязкость крови, однако эти изменения также могут быть связаны с нарушениями структуры и строения артерий, например, таких, как стеноз (сужение просвета сосуда), окклюзия (полная блокада кровотока) или аневризма (па-

тологическое врождённое или приобретённое локальное расширение просвета сосуда) [2, 5, 6, 8]. В исследовании было изучено влияние стеноза на гемодинамику. Среди причин, приводящих к стенозу артерий, выделяют следующие: облитерирующий атеросклероз, облитерирующий эндартериит, неспецифический аорто-артериит (болезнь Такаясу), посттравматические и постэмболические облитерации, опухоли и рубцы средостения, шейный остеохондроз, нарушения шейно-грудного отдела позвоночника, травмы грудной клетки и шеи, нарушения обменных процессов в организме, воспалительные заболевания и другие [1]. В основном, стеноз связан с отложением жировых бляшек на повреждённых участках стенок артерий. На данный момент выдвинуто множество теорий, объясняющих этиологию атеросклероза, среди которых теория липопротеидной инфильтрации, теория дисфункции эндотелия, аутоиммунная, моноклональная, вирусная, перекисная, генетическая и гормональная теории. Также известно, что факторами риска появления атеросклеротических изменений в сердечно-сосудистой системе являются табакокурение, употребление алкоголя, артериальная гипертензия, гиподинамия (малоподвижный образ жизни), эмоциональное перенапряжение или выгорание, избыточное потребление холестерина с пищей, сахарный диабет, ожирение, гипотиреоз, постменопауза у женщин, гиперфибриногенемия, гомоцистеинурия, генетическая предрасположенность и другие [8]. Несмотря на огромное количество исследований в области гемодинамики, многие явления этой области остаются малоизученными. Изучение изменений кровотока и поведения различных видов бифуркаций в целом при сужении (стенозе) одного из дочерних сосудов поможет установить распределение гемодинамической нагрузки на сосуды бифуркации в условиях патологии, что, в свою очередь, поможет понять механизм образования дальнейших возрастных изменений в стенке артерий. Также результаты, полученные в ходе подобных исследований, дают возможность предположить возможную нагрузку на пути коллатерального кровообращения при затруднении кровообращения в области основного ветвления сосудов.

**Цель:** сравнить поведение кровотока (изменение скорости и давления кровотока) в различных по строению сосудистых бифуркациях при сужении просвета одного из дочерних сосудов.

**Задачи:**

1. Классифицировать сосудистые бифуркации.
2. Проанализировать поведение различных по морфометрии сосудистых бифуркаций при стенозировании одного из дочерних сосудов после проведённого математического моделирования.

**Материалы и методы.** С помощью метода компьютерной томографии с ангиоконтрастированием были изучены разветвления артерий организма человека, измерены апикальные углы типичных бифуркаций, диаметры сосудов, входящих в состав этих бифуркаций. На основе данных полученных в результате исследования КТ-снимков была создана классификация сосудистых бифуркаций. С помощью пакета численного моделирования COMSOL были построены идеализированные модели изучаемых бифуркаций и произведено математическое моделирование кровотока. Далее был проведён анализ полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. В основу исследования легли результаты КТ-снимков, с помощью которых были изучены основные характеристики участков разветвления сосудов. С учётом данных, полученных при морфометрическом исследовании артерий на КТ - снимках была предложена классификация, отражающая основные различия по ровности сосуда до и после его разветвления, величине апикального угла и соотношению диаметров дочерних сосудов (рис. 1).

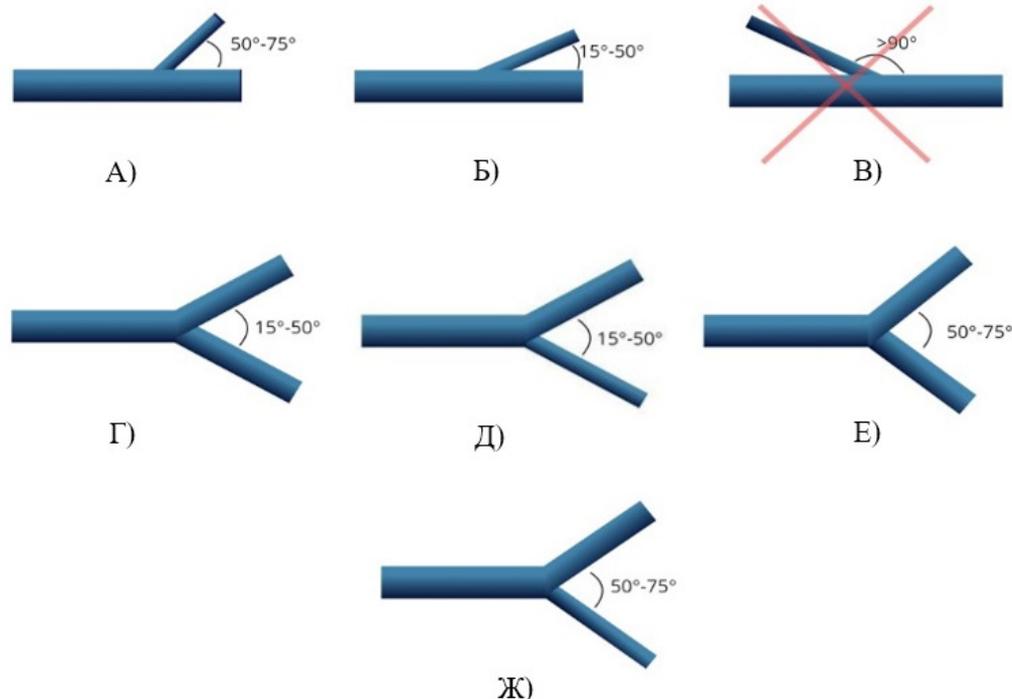


Рис. 1 – Классификация сосудистых бифуркаций

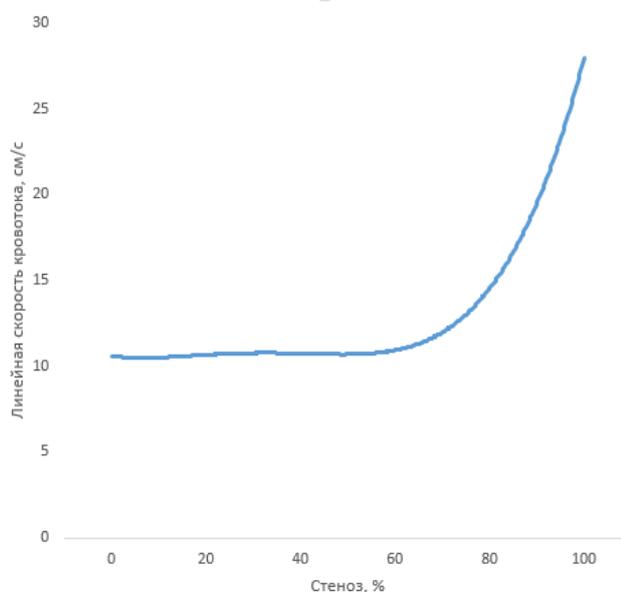
По ровности основных сосудов до и после их разветвления бифуркации были разделены на 2 класса: ровные (А, Б, В) и неровные (Г, Д, Е, Ж). По величине апикального угла (обозначен на рисунках) их разделили на 3 подкласса: тупые (возвращающиеся, атипичные) (В), подострые (А, Е, Ж) и острые (Б, Г, Д). Также можно выделить прямые бифуркации, величина апикального угла у которых лежит в промежутке  $75^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , однако в исследовании они не учитывались ввиду малой их распространённости. Также было выделено 2 вида среди неровных бифуркаций в зависимости от соотношения диаметров дочерних сосудов: толстые (равные) (Г, Е), для которых это соотношение равно 1:1, и тонкие (неравные) (Д, Ж), у которых диаметр одного из отходящих сосудов меньше, чем у второго. Ровные бифуркации в основном встречаются в артериях верхних и нижних конечностей, коронарных артериях, в месте отхождения сосудов от чревного ствола и аорты, иногда такой тип разветвления характерен для бифуркации общей сонной артерии. Возвращающиеся (тупые) бифуркации встречаются в сосудах конечностей, шеи и головы, однако служат они в основном для коллатерального кровообращения в условиях уменьшения скорости кровотока в магистральных артериях (особенно много подобных сосудов в области суставов), поэтому моделирование кровотока в них не проводилось. Наиболее распространёнными видами бифуркаций оказались подострые и острые неровные, которые встречались

повсеместно.

На основе предложенной классификации с помощью программы COMSOL Multiphysics были построены модели изучаемых участков сосудов. Ввиду сложности и субъективной вариабельности изучаемых параметров, при исследовании использовалась идеализация, то есть, упрощение. Сосуды — гладкие, цилиндрические трубки, их стенка неупругая, гладкая, поэтому не учитывались местные гидравлические сопротивления. Для математического моделирования использовалось приближение стационарного течения (давление на входе в бифуркацию соответствовало среднегемодинамическому артериальному давлению для артерий мелкого калибра  $\approx 95$  мм рт. ст. [3,4]). Кровь рассматривалась как ньютоновская жидкость с вязкостью  $4,5$  мПа\*с и плотностью  $1,05$  г/см<sup>3</sup> [7]. Исходный диаметр материнских сосудов на входе составлял  $0,4$  см; дочерних на выходе — по  $0,16$  см для толстых типов бифуркаций,  $0,22$  см и  $0,14$  для тонких, для ровных бифуркаций эти параметры были схожи.

В ходе исследования создавалось условное сужение просвета сосуда дистальнее бифуркации, параметр этот задавался путём создания дополнительного местного гидравлического сопротивления на стенозируемом участке сосуда. Условный стеноз задавался цилиндрический, длиной  $1$  см, при изменении просвета на  $S/S_0$ , где  $S$  — площадь просвета сосуда при его стенозировании,  $S_0$  — площадь просвета сосуда в норме (без стеноза).

После проведённого математического моделирования кровотока с помощью пакета численного моделирования COMSOL были получены результаты изменений (в ответ на уменьшение просвета одного из дочерних сосудов) линейной скорости и давления кровотока на выходе из второго дочернего сосуда, просвет которого не изменялся. Данные анализа изменения линейной скорости кровотока для неровных тонких подострых бифуркаций показан на рисунке 2.



**Рис. 2** – Изменение линейной скорости кровотока на выходе в одном из дочерних сосудов в ответ на стенозирование второго

На графике видно, что заметный изгиб кривой, соответствующий повышению

линейной скорости в  $\approx 1,4$  раза, лежит в диапазоне значений стеноза 70-75%. Аналогичным образом проводились моделирование и анализ полученных данных для всех остальных видов бифуркаций.

#### **Выводы:**

1 Была произведена классификация бифуркаций сосудов по основным характеристикам их разветвления (ровность сосуда до и после бифуркации, величина ангиокального угла и соотношение диаметров дочерних сосудов).

2 Результаты, полученные в ходе математического моделирования кровотока в условиях нормы и при патологии на одном из дочерних сосудов, были использованы для определения критического уровня стенозирования (такой уровень стеноза, при котором величина основных параметров гемодинамики, давления и линейной скорости кровотока, во втором дочернем сосуде повышается в 1,4-1,5 раза) для всех выделенных видов сосудистых бифуркаций. Критический уровень стеноза составил для неровных толстых острых и подострых и для неровных тонких острых бифуркаций — 75-80%, для неровных тонких подострых — 70-75%, для ровных острых — 65-70%, для ровных подострых — 60-65%. Таким образом, наименее «устойчивыми» к возможным изменениям просвета видами бифуркаций оказались ровные, наиболее «устойчивыми» — неровные.

#### **Литература**

1. Атеросклероз — основные теории развития / А. А. Мкртчян // Диабет. Образ жизни. — 2004. — № 6. — С. 22-28.
2. Гемодинамика и механическое поведение бифуркаций сонной артерии с патологической извитостью / О. Е. Павлова [и др.] // Известия. Саратовского ун-та. — Сер: Математика. Механика. Информатика - 2010. — Т. 10., №2. — С. 66-73.
3. Глотов, В. А. Структурный анализ микрососудистых бифуркаций / В. А. Глотов. — Смоленск: Амипресс - 1995. — 251 с.
4. Демин, В. В. Реконструкция трёхмерного изображения стентов на основе внутрисосудистого ультразвукового изображения. / В. В. Демин // Ангиология и сосудистая хирургия. — 2002. — Т. 8, № 4. — С. 43-47.
5. Скобцев, Ю. А. Моделирование и визуализация поведения потоков крови при патологических процессах / Ю. А. Скобцев, Ю. В. Родин, В. С. Оверко. — Донецк: Изд-во Заславский - 2008. — 212 с.
6. Трушель, Н.А. Роль морфологического и гемодинамического факторов в атерогенезе сосудов виллизиева круга / Н.А. Трушель, П.Г. Пивченко. — Минск: БГМУ - 2013. — 180 с.
7. Caro, C. G. Discovery of the role of wall shear in atherosclerosis / C. G. Caro // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. — 2009. — Vol. 29. — P. 158-161.
8. Carotid bifurcation atherosclerosis: Quantative correlation of plaque localization with flow velocity profiles and wall shear stress / C.K. Zarins [et al.] // Circ. Res. — 1983. — Vol. 53, № 4. — P. 502–514.