

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕТИНАЛЬНОГО КРОВОТОКА ПРИ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ

Жалалова Д.З.

Самаркандский государственный медицинский университет

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6748982>

*Аннотация.* В настоящее время существует целый ряд инструментальных методов исследования, позволяющих осуществлять как качественную, так и количественную оценку состояния кровообращения в крупных сосудах глаза и орбиты. Однако, комплексная оценка кровотока в мелких сосудах ЦАС и ЦВС недоступна стандартными методами исследования.

*Ключевые слова:* В качестве граничных условий на «входе» в сосудистую сеть задаётся временной профиль скорости, определённый с помощью анализа спектра доплеровского сдвига частот (СДСЧ) для каждого пациента.

### MATHEMATICAL MODELING OF RETINAL BLOOD FLOW IN ARTERIAL HYPERTENSION

*Abstract.* Currently, there are a number of instrumental research methods that allow both qualitative and quantitative assessment of the state of blood circulation in the large vessels of the eye and orbit. However, a comprehensive assessment of blood flow in the small vessels of the CAS and CVS is not available using standard research methods.

*Keywords:* As the boundary conditions at the "entrance" to the vascular network, the temporal velocity profile is set, determined by analyzing the spectrum of the Doppler frequency shift (DSFS) for each patient.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует целый ряд инструментальных методов исследования, позволяющих осуществлять как качественную, так и количественную оценку состояния кровообращения в крупных сосудах глаза и орбиты. Однако, комплексная оценка кровотока в мелких сосудах ЦАС и ЦВС недоступна стандартными методами исследования.

В связи этим нами была разработана математическая модель глазного кровотока с учетом морфологических и функциональных особенностей ретинального кровообращения каждого обследованного пациента, и предложена компьютерная программа для определения количественных показателей гемодинамики в сосудах сетчатки.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основы использовалась одномерная сетевая динамическая модель кровообращения [98, 129, 272]. Модель описывает пульсирующее течение вязкой несжимаемой жидкости (поток крови) в сети эластичных трубок (сосудов). При выполнении данной работы впервые использовалась реконструкция ретинального сосудистого русла (артерий и вен) на основе данных калибromетрии. Проведен анализ показателей линейной скорости кровотока в ЦАС и ЦВС с дальнейшей гладкой аналитической аппроксимацией. Определение параметров (параметризация) этой аппроксимации выполнена с использованием индивидуальных показателей кровотока пациента — максимальной систолической ( $V_{syst}$ ) и конечной диастолической ( $V_{diast}$ )

скоростей, интервала от начала систолы до ее пика и от начала и до конца систолы. Данная методика использовалась для постановкипограничных значений на «входе» и «выходе» сосудистой сети модели, построенной по индивидуальным данным каждого пациента. Такой подход является универсальным и может использоваться при обработке данных ультразвукового дуплексного сканированияорбитальных сосудов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов параметров кровотока на примере 10 пациентов представлены в таблице17, судя по которым в большинстве случаев отклонения индекса резистентности не превышают 1% в а2. Значительное влияние на результаты расчетов может оказывать оценка диаметра ЦАС. При уменьшении диаметра ЦАС отличие временных профилей линейной скорости в ЦАС и а1(рис. 21) становится более существенным. Тем не менее, достаточное совпадение значений индекса резистентности в сосудах а1 и а2, несмотря на существенные отличия поперечногодиаметра сечения, свидетельствует об адекватности оценки ЦАС описанным способом.

Используя вышеуказанные методы и выведенные формулы, с целью автоматизации расчетов, была написана компьютерная программа, в которую вписан программный код с зафиксированной последовательностью вычислений,приведенных ранее. С помощью данной программыбылиопределены параметры гемодинамики в ретинальных сосудах у пациентов с субклиническим атеросклерозом, артериальной гипертензией 1-2степени и в группе контроля.

При анализе показателей ретинального кровотока у пациентов I группы отмечалось увеличение  $V_{syst}$  и  $RI$  ( $p < 0,001$ ) в артериях I порядка и повышение  $RI$  в артериях II порядка ( $p < 0,001$ ) по сравнению с таковыми показателями в контрольной группе (таблица 18). У пациентов II группы было выявлено повышение  $V_{syst}$  в артерияхII порядка ( $p < 0,01$ ) относительно группы контроля. В III группе отмечалось снижение  $V_{syst}$  и увеличение  $RI$  в артериях I и II порядка по сравнению с контрольной группой ( $p < 0,05$ ).

Регистрировали снижение линейной скорости кровотока в венах первого и второго порядка у всех пациентов по сравнению с таковым показателем в группе контроля.

Таблица 18 Средние показатели гемодинамики в ретинальных сосудах ( $M \pm m$ )

Ретинальные сосуды	I группа (n=43)	II группа (n=40)	III группа (n=48)	Группа контроля (n=29)
a1 $V_{syst}$ , см/с				
$V_{diast}$ , см/с	13,9± 0,48***	13,04 ± 0,58	10,55 ± 0,72***	12,39 ±
RI	4,6 ± 0,15	5,57 ± 0,44	3,58 ± 0,24	0,51
	0,7 ± 0,02*	0,57 ± 0,02	0,66 ± 0,01***	4,89 ± 0,3
				0,6 ± 0,02
a2 $V_{syst}$ , см/с				
$V_{diast}$ , см/с	10,45 ± 0,8	10,90 ± 0,42**	7,35 ± 0,84***	9,15 ± 0,39
RI	3,28 ± 0,25	4,82± 0,31	2,57 ± 0,27	3,73 ± 0,15
	0,68 ± 0,01*	0,56 ± 0,02	0,65 ± 0,01**	0,59 ± 0,02

v1 Vsyst, cm/c	3,8 ± 0,15**	3,44 ± 0,38***	3,07 ± 0,12*	4,35 ± 0,14
v2 Vsyst, cm/c	2,56 ± 0,35*	3,32 ± 0,1**	2,12 ± 0,06*	3,96 ± 0,21
$\Delta V_{a1 a2}$ syst	- 33%	- 17%	- 42%	- 26%
$\Delta V_{b1 b2}$ syst	- 29%	- 23%	- 33%	- 17%

Примечание: n - количество человек, a1, a2 - диаметры артерий первого и второго порядка, v1, v2 - диаметр вен первого и второго порядка;

$\Delta V_{a1 a2}$  – гемодинамический градиент между сосудами; \*p<0,001,

\*\*p<0,01, \*\*\*p<0,05 – статистически достоверно относительно показателей в группе контроля. На основании представленных данных математического моделирования ретинального кровообращения был определен гемодинамический градиент ( $\Delta V_{syst}$ ) в виде разницы параметров максимальной систолической скорости кровотока в сосудах I и II порядка, показатель определен в относительных единицах.

Средний показатель  $\Delta V_{syst}$  между артериями I и II порядка в группе контроля составил 26%, в I группе-33%, во II группе -17%, в III группе -42%.

Средний показатель  $\Delta V_{syst}$  между венами I и II порядка составил в группе контроля 17%, в I группе-29%, во II группе -23%, в III группе - 33%.

### ВЫВОДЫ

Наиболее выраженное увеличение  $\Delta V_{syst}$  (в два раза) между венами I и II порядка имело место у пациентов с субклиническим атеросклерозом и АГ 1-2 степени (III группа). Разработанная нами математическая модель ретинального кровотока позволяет учитывать морфологические и функциональные особенности сосудистого русла глаза конкретного индивидуума. На основе данных, полученных с помощью калибromетрии ретинальных сосудов и дуплексного сканирования орбитальных сосудов, выполнена методика построения обобщенной структуры ретинального сосудистого русла глаза, включающая ветви первого и второго порядка ЦАС и ЦВС с определением гемодинамических параметров в ретинальных сосудах. Разработан метод аналитической аппроксимации временного профиля линейной скорости в ЦАС, который позволяет определить значения параметров гемодинамики у каждого конкретного пациента. С помощью данной модели выполнено моделирование ретинального кровотока у здоровых лиц и у пациентов с атеросклерозом и АГ.

Следует отметить диагностическую значимость применения математического моделирования в оценке ретинальной гемоциркуляции, поскольку непосредственное измерение показателей гемодинамики в ретинальных сосудах не представляется возможным вследствие их малого диаметра. Таким образом, разработанная в виде компьютерной программы модель, является инструментальным методом виртуальной оценки гемодинамических показателей, измерение которых невозможно с использованием других способов. Этот программный комплекс может быть использован для ранней диагностики нарушений ретинального кровообращения и оценки степени тяжести изменений гемодинамики при сердечно-сосудистой патологии.

*Литература*

1. Долиев, М. Н., Тулакова, Г. Э., Кадырова, А. М., Юсупов, З. А., & Жалалова, Д. З. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ЦЕНТРАЛЬНОЙ СЕРОЗНОЙ ХОРИОРЕТИНОПАТИЕЙ // Вестник Башкирского государственного медицинского университета, (2016). (2), 64-66.
2. Жалалова, Д. З. Метод комбинированного лечения диабетической ретинопатии // Врач-аспирант, (2009). 37(10), 864-868.
3. Сабирова, Д. Б., Тулакова, Г. Э., & Эргашева, Д. С. Комплексное лечение диабетической макулопатии путем применения пептидного биорегулятора "Ретиналамин" и лазеркоагуляции сетчатки // Точка зрения. Восток-Запад, (2017). (2), 114-116.
4. Саттарова, Х. С., Жалалова, Д. З., & Бектурдиев, Ш. С. Причины слепоты и слабовидения при сахарном диабете // Академический журнал Западной Сибири, (2011). (6), 27-28.
5. Тулакова, Г. Э., Сабирова, Д. Б., Хамракулов, С. Б., & Эргашева, Д. С. Отдалённые результаты ксеносклеропластики при миопии высокой степени // Научный форум. Сибирь, (2018). 4(1), 80-80.
6. Юсупов А. А. Особенности офтальмотонуса и клиническое течение глаукомы у лиц с артериальной гипотонией // Актуальные вопросы офтальмологии: Юбилейн. Всерос. научно-практ. конф., посв.
7. Юсупов А. А. Результативность склеропластики при врожденной близорукости // Вестн. офтальмологии. – 1993. – №. 5. – С. 14-15.
8. Юсупов А.А. Патогенез, клиника и лечение врожденной близорукости. – Автореф. Дисс... д. мед.наук. – Москва, 1992 г.- С.12-13.
9. Van Buskirk E.M. Glaucomatous optic neuropathy. J. Glaucoma. 1994; Suppl. 3: 2-4.
10. Van Buskirk E.M., Cioffi G.A. Glaucomatous optic neuropathy. Am. J. Ophthalmol. 1992;113(4):447-452
11. Burgoyne C.F., Downs J.C., Bellezza A.J., Suh J.K., Hart R.T. The optic nerve head as a biomechanical structure: a new paradigm for understanding the role of IOP-related stress and strain in the pathophysiology of glaucomatous optic nerve head damage. Prog. Retin. Eye Res. 2005; 24(1): 39-73.