

(35)

Zjawiska hemodynamiczne w naczyniach krwionośnych gałki ocznej

Hemodynamic phenomena in retrobulbar and eyeball vessels

Monika Modrzejewska

Z Kliniki Okulistyki Pomorskiego Uniwersytetu Medycznego w Szczecinie
Kierownik: prof. dr hab. n. med. Danuta Karczewicz

Streszczenie:	<p>Cel: celem doniesienia jest określenie czynników związanych z przepływem krwi i regulujących średnicę naczyń oraz przedstawienie niektórych parametrów wpływających na krążenie pozagalkowe, takich jak rodzaj oporności naczyniowej, budowa anatomiczna ściany naczynia i średnica naczynia. Zarówno czynniki neuro-, jak i angiogenne, reologiczny skład krwi, obecność przeszkód anatomicznych, jak i chorobowych na drodze przepływu oraz stopień wykształcenia dróg krążenia obocznego mają wpływ na objętość przepływu krwi w gałce ocznej i jego prędkość. Omówiono hemodynamikę krążenia galkowego, podkreślając znaczenie ciśnienia perfuzyjnego. Podkreślono również rolę czynników ryzyka wpływających na powstawanie zmian chorobowych w naczyniach doprowadzających krew do gałki ocznej, w tym w tętnicy szyjnej, w tętnicy ocznej (OA), jak i w odchodzących od niej gałęziach pobocznych, w tętnicach krążenia siatkówkowego (CRA) i naczyniówkowego (PCAs) oraz w układzie żylnym odprowadzającym krew z gałki ocznej.</p> <p>Wniosek: wyniki wielu badań przepływu krwi w tętnicach pozagalkowych w różnych schorzeniach okulistycznych o etiopatogenezie naczyniowej wskazują, że rejestracja parametrów przepływu krwi oraz indeksów oporności naczyniowej z jednoczesną rejestracją zakresu przepływu krwi w tętnicach doprowadzających krew do gałki ocznej mogą wnieść wiele interesujących informacji służących ocenie charakteru patologicznych zmian krążenia siatkówkowo-naczyniówkowego.</p>
Słowa kluczowe:	zjawiska hemodynamiczne w gałce ocznej, parametry prędkości przepływu krwi i oporu naczyniowego, czynniki zmieniające parametry przepływu krwi.
Summary:	<p>The purpose of this review was to evaluate factors connected with blood flow and indices regulating vascular diameter and some parameters influencing retrobulbar circulation such as type of vascular resistance, anatomical structure of vascular wall and vessel lumen. Neurogenic and angiogenic factors, rheological blood composition, presence of anatomical and pathological obstructions on blood flow pathway as well as degree of development of collateral circulation pathways – have influence on the volume and blood flow velocity in eyeball. There were discussed bulbar circulation hemodynamics, emphasizing the importance of perfusion pressure. The role of risk factors was underlined for pathological lesions in vessels supplying blood to eyeball and in ophthalmic artery (OA) and its collaterals, in central retinal artery (CRA) as well as posterior ciliary arteries (PCAs), and in venous system carrying away blood from eye.</p> <p>In conclusion – the results of many studies of retrobulbar blood flow in different types of ophthalmic diseases of the vascular etiopathogenesis indicate that registry of the mean values of blood flow parameters and vascular resistance indices parallel to measurement of blood flow spectrum in OA, CRA, PCAs arteries, might contribute much information to explain or to evaluate nature of pathological changes in retinal and choroidal circulation.</p>
Key words:	hemodynamic phenomena in eyeball, blood flow velocity parameters, vascular resistance, factors influencing vascular blood flow.

Przepływ krwi w naczyniach tętniczych i żylnych różnych narządów odbywa się zgodnie z różnicą wartości ciśnień naczyniowych skurczowych i rozkurczowych oraz jest zależny od wielu czynników związanych z regulacją zmiany średnicy naczynia, takich jak: rodzaj oporności naczyniowej, budowa anatomiczna ściany naczynia czy średnica naczynia. Czynniki neuro- i angiogenne, reologiczny skład krwi, obecność przeszkód anatomicznych, jak i chorobowych na drodze przepływu oraz stopień wykształcenia dróg krążenia obocznego mają wpływ na objętość i prędkość przepływu krwi. Niezbędnym warunkiem obecności przepływu krwi w naczyniach różnych narządów, w tym gałki ocznej, jest obecność tak zwanego ciśnienia napędowego. Jest to różnica między ciśnieniami w odcinkach układu naczy-

niowego oka – początkowym i końcowym. Ciśnienie to zwane jest również ciśnieniem perfuzyjnym i ma istotne znaczenie dla hemodynamiki krążenia galkowego. Zmiany wartości ciśnienia perfuzyjnego i związane z tym zaburzenia przepływu krwi mogą być przyczyną zaburzeń ukrwienia różnych struktur oka. Czynniki ryzyka dla tych patologii mogą być zmiany chorobowe występujące w dużych naczyniach doprowadzających krew do gałki ocznej, a więc w aorcie, w dorzeczu tętnicy szyjnej wspólnej oraz jej odgałęzieniach – w tętnicach szyjnych zewnętrznej lub wewnętrznej. Istotne znaczenie ma stan morfologiczny w tętnicy ocznej i w odchodzących od niej gałęziach pobocznych, w tętnicach krążenia siatkówkowego i naczyniówkowego oraz w układzie żylnym odprowadzającym krew z gałki ocznej (żyły

oczne górna i dolna, żyła środkowa siatkówki, żyły wirowe, nadtwardówkowe, żyły pochewki wewnętrznej nerwu wzrokowego oraz zatoki żyłne) (1). Do zaburzeń przepływu miejscowego krwi dochodzi najczęściej w miejscu podziału naczyń tętniczych lub ich anatomicznych zagięć. Zjawisko to może być następstwem zmian w oporze obwodowym łożyska naczyniowego lub też może być związane z różną zdolnością do skurczu i rozkurczu naczyń. Niewątpliwie dodatkowymi czynnikami zmieniającymi przepływ krwi mogą być przeszkody utrudniające to zjawisko jak obecność lub brak wykształconych dróg krążenia obocznego. Wymienione powyżej pierwotne lub wtórne czynniki tzw. naczyniowe lub też inne, lokalne albo śródbłonkowe, zmieniające właściwości reologiczne krwi mogą wpływać na zaburzenia przepływu w krążeniu. W piśmiennictwie wyróżniane są 2 typy przepływu krwi: laminarny – związany z równoległym przepływem elementów morfotycznych krwi, oraz turbulentny – pojawiający się w przypadkach zaburzeń poruszania elementów morfotycznych krwi. Przepływ turbulentny opisywany jest bezwymiarową liczbą Reynoldsa (Re):

$$Re = v \sigma r / \mu$$

v – liniowa prędkość przepływu krwi,
 σ – gęstość cieczy,
 r – promień naczynia,
 μ – lepkość krwi.

Miejscami szczególnie podatnymi na rozwój zaburzeń w przepływie krwi w tętnicach dogłowych są początkowy odcinek tętnicy szyjnej wewnętrznej i zatoka tętnicy szyjnej wspólnej (2). Parametr lepkości krwi nie jest wielkością stałą i zależy od wartości hematokrytu oraz prędkości przepływu krwi. Przyjmuje się, że dla wartości hematokrytu 45% i fizjologicznej różnicy ciśnień lepkość krwi stabilizuje się na stałym poziomie pomiędzy 4 cP i 5 cP (1 cP = 0,01 P, puaz). Zgodnie z założeniem, że gęstość i lepkość są parametrami stałymi, parametrami mającymi wpływ na pojawienie się przepływu turbulentnego są średnica naczynia oraz prędkość przepływu krwi. Wartość liczby Re 1000-2000 jest charakterystyczna dla przepływu turbulentnego. W przepływach pulsujących czasami obserwuje się tzw. przepływ zaburzony, który powstaje wówczas, gdy wartości liczby Re są niższe. Występowanie tego rodzaju przepływu może być związane z obecnością podziałów, zagięć lub zapętlenia naczyń bądź też z występowaniem niewielkich naczyniowych zmian przyściennych. Najczęściej ten typ przepływu obserwowany jest w zatoce tętnicy szyjnej wspólnej, w początkowym odcinku lub w opuszcce tętnicy szyjnej wewnętrznej. Przepływ burzliwy pojawia się zazwyczaj w prawidłowym naczyniu krążenia obocznego lub w odcinku poza zwężeniem naczynia, a jego przyczyną jest zwiększenie prędkości przepływu krwi. Podatne na tworzenie turbulencji są naczynia niskooporowe, a więc kilkumilimetrowej średnicy tętnice szyjne, tętnice segmentowe nerki czy tętnice pozagalkowe w wielkości do 1 mm i mniejszej (3,4). Innym istotnym parametrem opisującym przepływ krwi w naczyniach jest opór naczyniowy, który ukazuje zależność między ciśnieniem a przepływem krwi. Parametr ten zależy przede wszystkim od zmian w średnicy naczynia. Prawo Poiseuille'a opisuje zależność między spadkiem ciśnienia (ΔP), przepływem objętościowym krwi (Q), długością naczynia (l) i lepkością krwi (μ) (2-4).

$$\Delta P = 8 Q l \mu / \pi r^4$$

Opór naczyniowy zwiększa się odwrotnie proporcjonalnie do 4. potęgi promienia naczynia (r). Główna część oporności naczyniowej przypada na małe i bardzo małe tętniczki oraz na łożysko naczyń włosowatych. Zmniejszenie ciśnienia, które może być związane np. z występowaniem sił tarcia w miejscu zwężonego naczynia, jest proporcjonalne do lepkości krwi, długości zwężonego odcinka naczynia i przepływu objętościowego krwi, natomiast odwrotnie proporcjonalny do 4. potęgi promienia naczynia, co może oznaczać, że zmiana oporu obwodowego jest skuteczna tylko do pewnego poziomu narastania zmian w dużych naczyniach. Liczne badania wykazały, że przy określonej wielkości zwężenia brak jest dalszej możliwości poszerzania średnicy tętniczek i pojawia się wówczas wywołany zwężeniem naczynia spadek ciśnienia (2-4). Wykazano, że 90% koncentrycznego zwężenia pola naczynia odpowiada 68% zwężenia średnicy naczynia, zgodnie ze wzorem:

$$\text{stopień zwężenia} = (1 - A1/A2) 100\%$$

A1 – przepływ objętościowy w naczyniu przed zwężeniem,
 A2 – przepływ objętościowy w naczyniu w obrębie zwężenia (3).

W tętnicy szyjnej zmniejszenie pola przekroju naczynia o 75% odpowiada redukcji średnicy o 50%. W odcinku zwężonym obserwowany jest wzrost prędkości przepływu krwi rejestrowany do ok. 85% redukcji średnicy, powyżej tej wartości zwężenia prędkość ulega obniżeniu i ciśnienie zmniejsza się, wraz z jednoczesnym obniżeniem przepływu objętościowego krwi, biorąc pod uwagę, że: $Q = v A$, gdzie Q – oznacza przepływ objętościowy krwi, v – prędkość liniową przepływającej krwi, A – przekrój łożyska naczyniowego (3-5). Zmiany oporu obwodowego w naczyniach gałkowych w warunkach chorobowych mogą być związane z zaburzeniami struktury ściany naczyń krwionośnych. Procesy miażdżycowe, stany zapalne mogą prowadzić do skurczu naczyniowego, uszkodzenia komórek śródbłonka naczyniowego i uwalniania substancji zmieniających średnicę naczynia. Do znanych czynników wazoaktywnych należą: dwutlenek węgla, tlen, endotelina-1, angiotensyna, tromboksan A2, prostaglandyny, bradykinina, prostacyklina, serotonina, tlenek azotu. Załamanie regulacji krążenia obejmuje również procesy krzepnięcia i fibrynolizy oraz wzmożoną agregację i adhezję płytek krwi w uszkodzonym odcinku naczynia. Czynniki ogólne, takie jak nadciśnienie, jak również i niedociśnienie tętnicze, cukrzyca, miażdżycy, zaburzenia krążenia mózgowego, mają udział w dysfunkcji śródbłonka naczyń tętniczych, dysregulacji naczyniowej, których następstwem jest zmiana wartości oporu obwodowego i zmniejszenie przepływu krwi w siatkówce, naczyniówce oraz w głowie nerwu wzrokowego (3,6-9). Parametry prędkości przepływu krwi, jak i wartości ciśnienia perfuzyjnego w tętnicach gałki ocznej zależne są od zmian drożności tętnic szyjnych oraz naczyń położonych dystalnie od nich. Wytworzenie dróg krążenia obocznego (jednoimienna tętnica szyjna zewnętrzna, tętnice łączące przednie i tylne, tętnica szyjna wewnętrzna strony przeciwległej, tętnica podstawna mózgu, dodatkowe połączenia w oponie miękkiej, gałęzie poboczne od tętnic obu półkul mózgowych) ma istotne znaczenie dla zachowania przepływu krwi w przypadku wystąpienia niedrożności tętnicy szyjnej wewnętrznej. Największa redukcja ciśnienia w naczyniu doprowadzającym występuje przy umiejscowieniu przeszkody bliżej gałki

ocznej, co uwidacznia się jako brak przepływu dopplerowskiego obserwowanego przykładowo w zatorze tętnicy środkowej siatkówki, kiedy nie jest możliwe wytworzenie krążenia obocznego z powodu funkcjonalnie końcowej czynności tych naczyń. W przypadku niedrożności jednej lub obu tętnic rzęskowych tylnych bądź też grupy (kilku lub kilkunastu) tętnic rzęskowych tylnych krótkich następuje przerwanie przepływu na określonym obszarze zaopatrywanym przez te tętnice z powodu uznawania ich za funkcjonalnie końcowe (3,5). Przepływ wówczas może mieć charakter zdecydowanie obniżony, turbulentny, bez obecności tzw. fazy rozkurczowej (7). Podobny charakter ma przepływ naczyniowy w warunkach utrudnionego odpływu, czyli zwężenia umiejscowionego obwodowo od miejsca badanego (4,5,7). Poziom ciśnienia krwi poza zwężeniem zależny jest również od stanu wydolności dróg krążenia obocznego. W przypadku prawidłowej ich drożności ciśnienie poza zwężeniem będzie prawidłowe, natomiast występowanie nieprawidłowości może być przyczyną turbulencji przepływu, niskich wartości ciśnienia poststenotycznego, a prędkość przepływu będzie zależna od miejsca naczynia, w którym dokonywany jest pomiar. W przypadku poszerzenia naczynia występującego po odcinku zwężenia rejestrowany jest scharakteryzowany wcześniej przepływ zaburzony, który cechuje się znacznym zmniejszeniem prędkości przepływu krwi, wypełnieniem okna widmowego oraz odwróceniem kierunku przepływu (4,5,7). Szczególnym rodzajem widma jest „widmo tam i z powrotem”, które spotykane jest w przypadku badania przepływu tuż za miejscem jego niedrożności, tzw. „ślepy koniec” naczynia (4,5,7). Tego typu zaburzony przepływ obserwowany jest w okulistyce najczęściej w przypadku niedrożności albo też zamknięcia tętnicy środkowej siatkówki lub tętnic rzęskowych tylnych. Ocena dopplerowska przepływu krwi w układzie żylnym jest bardziej utrudniona w porównaniu do systemu tętniczego, głównie ze względu na niskie ciśnienie napędowe oraz specyficzną budowę anatomiczną tych naczyń w różnych narządach (np. więcej mięśni gładkich w naczyniach żylnych podudzi, a mniej w żyłach pachowych). Dodatkowo wydolność mięśnia sercowego, wartość ciśnienia w prawym przedsionku, zmiany w częstości oddychania mają wpływ na zmianę objętości przepływu krwi, szczególnie w żyłach obszaru pozagałkowego, stąd też ocena przepływu krwi w tym układzie naczyniowym jest wątpliwa (4,5,7,10,11,12,13).

Podsumowując, należy podkreślić, że zastosowanie nowych technik badawczych w ocenie zwężenia naczyń pozagałkowych i stopnia ich drożności oraz pomiar pola przekroju wewnątrznaczyniowego są metodologicznie trudne ze względu na bardzo małą średnicę tych naczyń oraz brak możliwości rejestracji zmian przyściennych w ich świetle w odróżnieniu do

dużych naczyń dogłowych. Wyniki wieloletnich doświadczeń różnych autorów wskazują, że pośrednia ocena przepływu krwi w obszarach pozagałkowym i wewnątrzgałkowym jest możliwa, aczkolwiek wymaga od badacza znajomości nie tylko mechanizmów regulujących krążenie oczne, ale również czynników i zjawisk biorących udział w kształtowaniu hemodynamiki krążenia ocznego.

Piśmiennictwo:

- Harris A: *Inhibitory anhydryzy węglanowej. Wpływ na krążenie mózgowe i oczne*. Górnicki Wydawnictwo Medyczne, Wrocław 2003, 23-61.
- Nowicki A: *Echografia dopplerowska*. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 1985, 186.
- Augustyniak E: *Ultrasonografia dopplerowska pulsacyjna – zastosowanie w okulistyce*. Akad Med w Łodzi, Łódź 1992.
- Nowicki A: *Podstawy obrazowania przepływów metodą dopplerowską*. Ultrasonografia Pol 1991, 1, 163-183.
- Małek G: *Postępy w ultrasonografii naczyń*. Ultrasonografia 2004, 15, 20.
- Mysior M, Grałek M, Czajkowski J, Wojciechowski A, Jędrzejczyk S: *Kolorowa ultrasonografia dopplerowska w diagnostyce naczyń gałki ocznej i oczodołu*. Klin Oczna 1994, 96, 305-308.
- Krzyszowski M, Łuszczyczka A: *Atlas ultrasonografii naczyń*. Wyd Medycyna Praktyczna, Kraków 1996.
- Modrzejewska M: *Zastosowanie kolorowej ultrasonografii dopplerowskiej w okulistyce*. In: *Metody obrazowania w okulistyce*. Eds: T.P. Kęćik, P. Lewandowski, D. Kęćik. Alcon, Warszawa 2001, 81-100.
- Modrzejewska M, Karczewicz D, Wilk G: *Use of color Doppler ultrasonography in primary vasospastic syndrome and assessment of ocular blood flow in patients with transient monocular blindness*. Pol J Radiol 2007, 72, 9-14.
- Nowicki A: *Podstawy obrazowania przepływów metodą dopplerowską*. Ultrasonografia Pol 1991, 1, 163-183.
- Lieb WE, Cohen SM, Merton DA, Shields JA, Mitchell DG, Goldberg BB: *Color Doppler imaging of the eye and orbit. Technique and normal vascular anatomy*. Arch Ophthalmol 1991, 109, 527-531.
- Rojanapongpun P, Drance SM: *Velocity of ophthalmic arterial flow recorded by Doppler ultrasound in normal subjects*. Am J Ophthalmol 1993, 115, 174-180.
- Baxter GM, Williamson TH: *Color Doppler imaging of the eye: normal ranges, reproducibility, and observer variation*. J Ultrasound Med 1995, 14, 91-96.

Praca wpłynęła do Redakcji 20.04.2009 r. (1259)
Zakwalifikowano do druku 10.01.2011 r.

Adres do korespondencji (Reprint requests to):
dr hab. n. med. **Monika Modrzejewska**
Klinika Okulistyki PUM
al. Powstańców Wlkp. 72
70-111 Szczecin
e-mail: monika_modrzej@op.pl