

ANNA MARIA SZPERNALOWSKA¹, ANNA MARCINKOWSKA-GAPIŃSKA²

Historia hemoreologii

History of hemorheology

¹ Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu (<https://orcid.org/0009-0008-2016-5300>)

² Zakład Biofizyki. Katedra Biofizyki. Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu (<https://orcid.org/0000-0002-9180-2644>)

ABSTRAKT

W pracy przedstawiono historię rozwoju hemoreologii, czyli nauki o przepływie i lepkości krwi, łączącej zagadnienia biofizyki oraz medycyny, szczególnie w zakresie patogenezy chorób sercowo-naczyniowych. Ukazano, jak od początków badań nad układem krążenia, poprzez kluczowe odkrycia w zakresie hemodynamiki i reologii, zmieniło się spojrzenie świata medycyny na fizjologię układu krwionośnego, a co za tym idzie rozumienie patogenezy chorób krążenia oraz jak zmieniały się sposoby ich leczenia. Ponadto w pracy przybliżono najbardziej przełomowe odkrycia wybitnych naukowców, które przyczyniły się do rozwoju wyżej wymienionych nauk. Zaakcentowano fakt pogłębiania wiedzy z zakresu hemoreologii na przestrzeni wieków i podkreślono znaczenie dalszych badań, jak też mnogość zastosowań w praktyce klinicznej.

Słowa kluczowe: hemoreologia, historia hemoreologii, historia medycyny, układ sercowo-naczyniowy, bioreologia

ABSTRACT

The aim of this paper is exposition of the history of the scientific progress in hemorheology, the study relating to the blood flow and blood viscosity, which combines biophysics and medicine, especially in the field of cardiovascular diseases. Starting from the early beginnings of the research on circulatory system, through pivotal discoveries in hemodynamics and rheology, we show the changes in medical understanding of the vascular system physiology, by extension pathogenesis of its disorders and treatment methods. Moreover, we present groundbreaking discoveries of the leading scientists, which contributed to progress of the aforementioned disciplines. Considering the development of knowledge in hemorheology over centuries, we emphasize the significance of the further studies in this topic and the variety of its clinical applications.

Keywords: hemorheology, history of hemorheology, history of medicine, cardiovascular system, biorheology

WSTĘP

Termin „reologia” pochodzi z języka greckiego, a na jego znaczenie składają się „rheo” (‘płynąć’), oraz „logos” (‘nauka’) [1, s. 47]. Jest to więc nauka zajmująca się deformacją i przepływem materii, jednakże nie traktuje

ona przepływającej cieczy jako całości, ale koncentruje się na wzajemnym przemieszczaniu się elementów cieczy podczas jej ruchu. Z uwagi na to, że niemal wszystkie materiały mogą ulegać odkształceniom, „reologia”

to pojęcie bardzo szerokie. Poprzez dodanie przedrostka „haima” (‘krew’) zawężamy je do właściwości fizykochemicznych krwi oraz właściwości jej przepływu w naczyniach krwionośnych [2].

Parametrami, na których koncentruje się hemoreologia, są: lepkość krwi i osocza, hematokryt, zdolność erytrocytów do deformacji oraz ich tendencja do agregacji. Wspomniana lepkość krwi jest miarą jej tarcia wewnętrznego, czyli oporu między warstwami płynu przy jego przesuwaniu. Hemoreologia bada zmiany powyższych parametrów, zachodzące zależnie od średnicy i geometrii naczyń, prędkości przepływu oraz prędkości ścinania [3].

Znaczenie rozwoju tej dziedziny jest coraz częściej zauważane w patofizjologii chorób sercowo-naczyniowych. Zmiany w lepkości krwi i właściwościach czerwonych krwinek obserwuje się w takich chorobach, jak: miażdżyca, nadciśnienie tętnicze, zespół metaboliczny, cukrzyca, choroba niedokrwienna serca i zawał mięśnia sercowego oraz choroba Raynauda [3,4]. Wyodrębnienie się tak wąskiej dyscypliny naukowej nastąpiło stosunkowo późno, stąd też możemy myśleć o hemoreologii jak o młodej dziedzinie, która dopiero powoli odkrywa przed nami swoje tajemnice. Przez długi okres brakowało sprzętu pomiarowego o odpowiednim zaawansowaniu, pozwalającego na badanie parametrów hemoreologicznych, co skutkowało powstaniem rozmaitych, bardzo często błędnych i nieprawidłowo uzasadnionych teorii. Dopiero eksperymenty fizjologiczne i rozwój anatomii przyczyniły się do szczegółowego zrozumienia procesów zachodzących w naczyniach krwionośnych. Jednakże prostota uzyskania materiału badawczego, jakim jest krew, ciekawość jego właściwości oraz wpływu na dobrostan fizyczny spowodowały, że studia nad fizjologią krwi prowadzone są już od czasów starożytnych [5, s. 3–17].

POCZĄTKI BADAŃ NAD UKŁADEM KRĄŻENIA

Układ sercowo-naczyniowy już od początku rozwoju cywilizacji stanowił dla medyków i naukowców zagadnienie bardzo pociągające, gdyż oprócz bycia źródłem sił vitalnych i siły rozprowadzającej krew i tlen po organizmie łączyły się z nim również zagadnienia mistyczne i religijne. Starożytni Egipcjanie uważali serce za centrum układu krążenia oraz dostrzegali jego funkcjonalny związek z płucami – docierające do niego powietrze mieszało się w naczyniach z innymi substancjami, takimi jak: nasienie, ślina, łzy, moczu czy odchody. Nie jest pewne, czy wierzyli, że krew następnie wprost z naczyń rozlewa się po tkankach, jednak za strukturę ostatecznie zbierającą ciecze w ciele uznawali odbyty [6]. Pomimo wielu błędnych wyobrażeń na temat

układu krążenia, potrafili zarówno narysować serce, jak i rozpoznać jego związek z tętnem obwodowym. Przede wszystkim jednak serce stanowiło dla nich centrum intelektu i moralności [7].

Grecki uczyony, Empedokles z Akragas (494-434 p.n.e.), jako pierwszy określił serce jako centrum układu krwionośnego, rozprowadzające „pneumę”; tym samym stworzył zasadę czterech żywiołów składających się na byt [8]. Największy postęp wiedzy o układzie krążenia z czasów starożytnej Grecji zawdzięczamy jednak Hipokratesowi z Kos, który opisał z bardzo dużą dokładnością budowę serca i naczyń krwionośnych, wyróżnił pierwsze choroby sercowo-naczyniowe oraz określił sposób ich leczenia. Dodatkowo był twórcą teorii humoralnej – teorii mówiącej o tym, że ludzkie ciało składa się z czterech substancji: krwi, czarnej żółci, żółtej żółci i flegmy. Według niej stany chorobowe powodowane są zaburzeniem równowagi między czterema substancjami, a podstawą leczenia jest przywrócenie odpowiedniego ich balansu np. poprzez upuszczanie krwi. Podstawą diagnozowania chorób było badanie próbek krwi pobieranych od pacjentów; obserwowano zmiany charakteru przepływu oraz właściwości krwi np. podczas stanów zapalnych [2]. Można więc powiedzieć, że pierwsze odkrycia w zakresie hemoreologii miały miejsce już w starożytności. Zaobserwowanie sedymentacji składników krwi i jej rozdzielania na cztery warstwy (wspomniane cztery „humory”) jest zjawiskiem hemoreologicznym. Warstwę wierzchnią, nazywaną „żółtą żółcią” lub „cholera” (gr. *chole*), stanowiło osocze. Warstwa poniżej określana była „śluzem” lub „flegmą” (gr. *phlegma*) i składała się z krwinek białych, płytek krwi oraz fibryny. Kolejną zgromadzoną substancję stanowiła krew (łac. *sanguis*), na samym dole gromadziły się natomiast skrzepy, nazywane „czarną żółcią” lub „melancholią” (gr. *melaina chole*) [9].

Galen z Pergamonu (131-200) kontynuował rozwój teorii humoralnej. Wybitny medyk, lekarz rzymskich cesarzy i gladiatorów wyróżnił dwa rodzaje krwi: ciemną, żylną, wytwarzaną w wątrobie z żółtej żółci oraz jasną, tętniczą, powstającą w lewej komorze po wymieszaniu z „pneumą” (gr. *pneuma* – ‘oddech’, ‘tchnienie’). Korzystając z nauk Galena, średniowieczni medycy bardzo często stosowali flebektomię, która miała za zadanie przywrócenie równowagi między humorami, a więc przywrócenie zdrowia [10]. Pomimo braku potwierdzonej skuteczności upuszczania krwi, w świetle dzisiejszej wiedzy można interpretować ten zabieg jako próbę przeprowadzenia „hemodylucji”, czyli zmniejszenia lepkości krwi, co może być korzystne w kontekście patogenetyki chorób sercowo-naczyniowych [4].

PRZEŁOMOWE ODKRYCIA W OKRESIE XVII-XIX W.

Przełom w rozumieniu działania układu krążenia przyniósł dopiero XVII w., a najbardziej przyczynił się do niego angielski lekarz i anatom uważany za ojca hemodynamiki, William Harvey (1578-1657). W swoim dziele *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*, znanym jako *De Motu Cordis* (1628), opisał podstawy fizjologii przepływu krwi, takie jak: jego jednokierunkowość warunkowaną przez obecność zastawek naczyniowych, różnicę ciśnień panujących w naczyniach żylnych i tętniczych, jak również to, że jest on napędzany przez serce, a nie wątrobę, jak uważał dawniej Galen. Było to ogromne naukowe osiągnięcie, po raz pierwszy eksponujące cyrkulację krwi, jak też podkreślające znaczenie jej właściwości reologicznych. Harvey na długo przed powstaniem nauki, jaką jest hemoreologia, tworzył jej podwaliny, zauważając, że płynność krwi może się zmieniać. Twierdził bowiem, że krew żylna staje się bardziej płynna, gdy wraca do serca i wzbogaca się w „ ducha ” (ang. *spirit*), przepływając natomiast przez tkanki obwodowe zagęszcza się i „jałowiej ” [11]. Dorobek naukowy Williama Harveya jest podstawą dzisiejszego rozumienia fizjologii układu sercowo-naczyniowego i jednym z największych odkryć naukowych wszechczasów. Począwszy od jego spostrzeżeń, prace badawcze nad krążeniem krwi nabrały znacznego tempa.

Marcello Malpighi (1628-1694), włoski lekarz wykształcony na uniwersytecie w Bolonii, zrewolucjonizował świat nauki, jako pierwszy wizualizując pod mikroskopem naczynia włosowate (ryc. 1). Uważany za ojca anatomii mikroskopowej, Malpighi nie tylko uzupełnił model krążenia Harveya o element mikrokrażenia, ale dodatkowo w dziele *De Pulmonibus* opisał krew jako „złożoną z niemal nieskończonej liczby cząstek” [12]. Dodatkowo, sprzeciwiając się teorii humoralnej, wyróżnił dwie składowe krwi: część białą, którą nazwał osoczem, oraz część czerwoną [12]. Zauważył również przepływające krwinki czerwone, które jednak błędnie zinterpretował jako kulki tłuszczu [9]. Na trzy wieki przed matematycznym opisaniem zjawisk lepkości Malpighi wyprzedził świat nauki, głosząc, że krew składa się z partykuł, które mogą zależnie od okoliczności agregować lub oddzielać się od siebie i tym samym czynić ją bardziej zagęszczoną lub płynną. Opisywał również konsystencję skrzepów oraz metodę zapobiegania im poprzez mieszanie [12].

W historii badań nad przepływem krwi należy wspomnieć o znakomitych odkryciach z dziedziny fizyki. Isaac Newton (1642-1727) badał przepływ cieczy w zależności od ciśnienia, co zaowocowało funkcjonującym do dziś w nauce podziałem cieczy na newtonowskie (ich lepkość przy określonej temperaturze i ciśnieniu jest niezależna od naprężenia ścinającego)

i nienewtonowskie (ich lepkość jest niestała, zależna od naprężeń ścinających) [13]. Brytyjski fizyk Robert Hooke (1635-1703) sformułował natomiast prawo sprężystości, zwane prawem Hooke’a, mówiące o tym, że w ciałach doskonale sprężystych odkształcenie jest wprost proporcjonalne do przyłożonej siły [14,15]. Odkrycia te, pomimo iż nie odnosiły się bezpośrednio do organizmów żywych, nadały tor dalszym badaniom nad właściwościami przepływu cieczy, a co za tym idzie również przepływu krwi.

Jako pierwszy krwinkę czerwoną krążącą w naczyniach włosowatych opisał Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723) (ryc. 2), holenderski handlarz i naukowiec-samouk, niemający żadnego wykształcenia naukowego. Leeuwenhoek opracował system ścieńczania soczewek poprzez ich rozdrabnianie do grubości nawet 2 mm, którego sekret utrzymał w tajemnicy aż do śmierci. Początkowo soczewki dwuwypukłe miały mu służyć do kontroli jakości tkanin (w obliczaniu ilości nici na danej powierzchni materiału), później jednak Holender zaczął obserwować wszelkie otaczające go obiekty, do czego służył mu skonstruowany przez niego jednosoczewkowy mikroskop [16]. Doprowadziło to do opisanie w 1674 r. krwinek czerwonych, a dodatkowo przełomowego dostrzeżenia ich zdolności do deformacji, którą badacz opisał następująco: „Zaobserwowałem, że globuliny krwi są znacznie bardziej elastyczne niż kiedykolwiek sądziłem, że jest to możliwe [...]. Mogą wydłużyć swoje wymiary trzykrotnie, bez uszkodzenia błony tworzącej ich pęcherzyki. Zauważyłem również, że globuliny krwi przepływając obok siebie mogą przyjmować wiele kształtów” [17]. Leeuwenhoek zwrócił uwagę na tendencję erytrocytów do agregacji, którą zaobserwował w krwi ciężarnej kobiety, jak również zwiększoną sztywność tych krwinek w stanie choroby: „Kiedy byłem chory, globuliny mojej krwi były twarde i sztywne, ale stały się bardziej miękkie i elastyczne, gdy wróciłem do zdrowia [...]. Sądzę, że twarde krwinki mogą być przyczyną chorób [...]” [17]; dodatkowo głosił później, że „gęsta krew” u osób gorączkujących powoduje, że jej cyrkulacja jest utrudniona i wymaga intensywniejszej pracy serca [17]. Badacz opisał też „zapadnięty” kształt erytrocytów, uznał go jednak za artefakt; wciąż określał krwinki jako okrągłe „globuliny”. Najbardziej niesamowitym odkryciem Leeuwenhoeka wydaje się natomiast oszacowanie średnicy krwinki czerwonej, którą określił jako 25 tys. razy mniejszą od ziarnka piasku, a dokładnie 8.5 μm [16]. Odkrycia holenderskiego badacza przez stulecia były podstawą wiedzy na temat właściwości krwi oraz dały podwaliny pod współczesną hemoreologię. Od tamtego czasu rozważano, co decyduje o charakterze przepływu, wskazując na możliwość wpływu czynników neurologicznych, właściwości ścian naczyń oraz właściwości samej krwi.

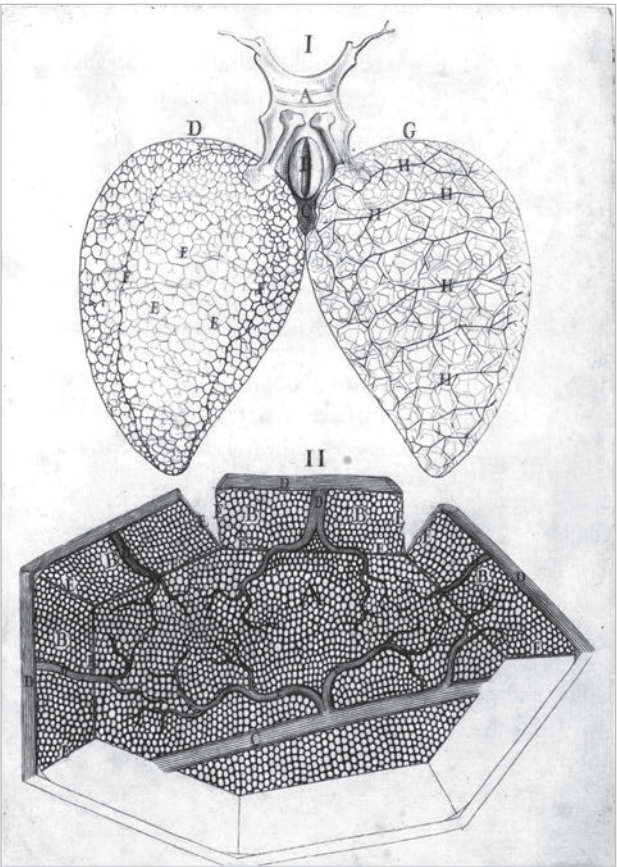
Kolejnym osiągnięciem było wprowadzenie w 1807 r. przez angielskiego fizyka Thomasa Younga (1773-1869) modułu sztywności, zwanego modułem Younga, charakteryzującego zachowanie się ciał sztywnych pod działaniem sił odkształcających. Prace Jamesa Maxwella (1831-1879) z zakresu relaksacji naprężeń w płynach doprowadziły do opracowania modelu zachowania się płynu sprężystolepkiego, czyli modelu Maxwella [18]. Były to podstawowe matematyczne modele; do dziś mają one zastosowanie w reologii.

Badania francuskiego fizyka, Jeana Poiseuille’a (1799-1869), przyniosły dalszy postęp, gdyż wykazał on, że przepływ krwi jest proporcjonalny do czwartej potęgi promienia naczynia i do różnicy ciśnień wywołujących przepływ, a odwrotnie proporcjonalny do lepkości cieczy i długości naczynia. Zależność ta została nazwana prawem Poiseuille’a, a opisuje ją wzór:

$$Q = \frac{\pi pr^4}{8\eta l}$$

gdzie Q oznacza prędkość przepływu, p odpowiada różnicy ciśnień, r i l oznaczają odpowiednio promień i długość naczynia, a η to lepkość cieczy [19,20]. Opublikowana w 1840 r. praca *Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires* liczyła sobie 110 stron i może to właśnie ogromna pieczołowitość i dokładność francuskiego fizyka spowodowała znaczne opóźnienie publikacji, gdyż równolegle swoje badania prowadzić zaczął niemiecki naukowiec, Gotthilf Hagen (1797-1884). Doszedł on do tych samych wniosków co Poiseuille, publikując niezależnie tę samą

regułę w 1840 r., stąd też wspomnianą zależność nazywamy współcześnie prawem Hagen–Poiseuille’a [21]. Wymienione odkrycia przyczyniły się znacznie do zrozumienia fizjologii przepływu krwi oraz pojęcia ciśnienia tętniczego. Najważniejsze osiągnięcia z zakresu badań nad ciśnieniem tętniczym przedstawiono w tabeli 1.



Ryc. 1. Szkic pochodzący z „De Pulmonibus”, obrazujący płuca oraz naczynia włosowate płuc żaby [23]

Data	Miejsce	Osiągnięcie
Ok. 2600 r. p. n. e.	Chiny	Pierwsza wzmianka o tętnie w „The Yellow Emperor’s Classics of Internal Medicine” – puls wyznacza przewagę siły Yin lub Yang w organizmie, czego wyznacznikiem jest słaby lub mocny puls
1733 r.	Anglia	Stephen Hales jako pierwszy dokonał pomiaru ciśnienia tętniczego we krwi u konia
1828 r.	Francja	Jean Poiseuille skonstruował rtęciowy manometr do pomiaru ciśnienia oraz określił jego jednostkę jako mmHg
1864 r.	Niemcy	Karl Ludwig opracował metodę graficznego opisu parametrów ciśnienia
1880 r.	Austria	Samuel Siegfried Karl Ritter von Basch skonstruował pierwszy nieinwazyjny ciśnieniomierz
1896 r.	Włochy	Scipione Riva-Rocci opracował manometr rtęciowy
1905 r.	Rosja	Nikolai Korotkov opisał metodę osłuchową badania ciśnienia skurczowego i rozkurczowego krwi

Tabela 1. Historia badań nad ciśnieniem tętniczym i tętnem [22]



ROZWÓJ HEMOREOLOGII NA PO CZĄTKU XX W.

Dalsze doniesienia w jej zakresie przyniósł dopiero przełom XIX i XX w., gdy w 1891 r. Wilhelm Ostwald (1853-1932) zaprezentował pierwszy wiskozymetr kapilarny. Urządzenie do dziś używane jest w pomiarach parametrów cieczy lepkosprężystych. W 1904 r. Ludwig Prandtl (1875-1953) opracował teorię warstwy granicznej oraz teorię przepływu turbulentnego (1910) [18]. Efekt warstwy granicznej, zwany też efektem Sigma, polega na powstawaniu w poruszającym się strumieniu na jego granicy ze ścianą stałą cienkiej warstwy substancji o własnościach odmiennych od rdzenia płynu [25]. Na początku lat 20. Brytyjczyk Armand de Waele i Niemiec Wolfgang Ostwald (1883-1943) wykazali niezależnie, że krzywe płynięcia wielu płynów nienewtonowskich można opisać za pomocą funkcji potęgowej. Spostrzeżenie to nazywamy modelem Ostwalda-de Waele'a [18].

Bardzo duży postęp wiedzy nastąpił wraz z publikacją pracy Fåhræusa i Lindquista. Robin Fåhræus (1888-1968) uważany jest za prekursora nowoczesnej klinicznej hemoreologii i hemoreologii eksperymentalnej, pomimo iż przyszło mu pracować na długo przed

powstawaniem oddzielnej nauki, jaką jest bioreologia. Szwedzki hematolog badał przepływ krwi przez naczynia włosowate krezki konia, w których zaobserwował, że krwinki płyną w agregatach przez centrum naczyń, podczas gdy w obwodowej części światła jest ich znacznie mniej. Doprowadziło to do opisania efektu Fåhræusa–Lindqvista, głoszącego, iż lepkość krwi maleje wraz ze spadkiem średnicy naczynia aż do momentu, gdy światło naczynia jest zbliżone do wymiarów krwinek, wówczas lepkość krwi zaczyna wzrastać [26]. Drugi człon nazwy zjawiska pochodzi od nazwiska młodego lekarza pracującego w laboratorium Fåhræusa, Torstena Lindqvista. Ponoć młody badacz, początkowo niezadowolony z tego, że nigdy nie otrzymywał takich wyników, jakich się spodziewał, usłyszał od swojego mentora: „Jeśli otrzymujesz nieoczekiwane wyniki, powinienes być cholernie szczęśliwy! Jeśli efekty zawsze będą takie, jakich się spodziewałeś, nie miej nadziei, że odkryjesz cokolwiek nowego!” [27]. Dodatkowo Fåhræus badał czynniki wpływające na opadanie krwinek czerwonych oraz jak zmienia się ono w zdrowiu, a jak w stanach chorobowych. Skutkowało to opisaniem w 1918 r. parametru, jakim jest tempo

sedymentacji erytrocytów (ang. *Erythrocyte Sedimentation Rate*, ESR), który do dziś jest podstawowym parametrem diagnostycznym stosowanym w praktyce klinicznej [28].

W Polsce powyższy parametr znany jest jako odczyn Biernackiego (OB), co jest nieprzypadkowym określeniem wskazującym na pewien niedoceniony rozdział polskiej nauki i medycyny. Edmund Faustyn Biernacki (1866-1911) (ryc. 3), polski lekarz i wychowanek Cesarskiego Uniwersytetu Warszawskiego, jako pierwszy badacz skonstruował urządzenie pomiarowe oraz obserwował tempo sedymentacji erytrocytów. Efekty swoich prac opublikował w 1894 i 1897 r., a opisywany parametr OB był w medycynie XX w. ważnym narzędziem diagnostycznym; do dzisiaj pozostaje istotnym wskaźnikiem np. w chorobach reumatologicznych [29,30,31]. Fåhræus w swojej pracy opublikowanej dopiero w 1918 r. nie wspomina badań Polaka, odnosi się do nich dopiero w jednej z późniejszych publikacji [26].

NARODZINY BIOREOLOGII I HEMOREOLOGII JAKO OSOBNYCH DYSCYPLIN

Wyodrębnienia dziedziny reologii z całości zagadnień fizycznych dokonał Markus Reiner (1886-1945). Urodzony w Czerniowicach (Austro-Węgry) fizyk, w 1926 r. opublikował pracę dotyczącą badań nad przepływem cieczy sprężystych, która wzbudziła międzynarodowe zainteresowanie. Na zaproszenie Eugene Bingham odwiedził w 1928 r. Lafayette College, co zaowocowało powstaniem odrębnej gałęzi fizyki, jaką jest reologia, oraz założeniem Amerykańskiego Stowarzyszenia Reologii (ang. The American Society of Rheology) w 1929 r. Fraza greckiego filozofa, Heraklita z Efezu: *παντα ρει*, czyli „wszystko płynie”, stała się emblematem powstałego z inicjatywy wymienionych naukowców Amerykańskiego Towarzystwa Reologicznego. Markus Reiner wprowadził pojęcia takie jak „liczba Debory” (definiującą różnicę między cieczą a ciałem stałym) oraz „efekt czajnika” [33].

Pomimo początkowej koncentracji na badaniu mechaniki cieczy w kontekście przemysłu reologia zaczęła rozwijać się również w kierunku bioreologii, czyli nauki zajmującej się reologią organizmów żywych. Jako pierwszy nazwę tę zasugerował Alfred Copley, podczas pierwszego Międzynarodowego Kongresu Reologii (ang. The International Congress on Rheology) w holenderskim Scheveningen w 1948 r. [34].

Istotnym matematycznym osiągnięciem było opisanie w 1959 r. modelu Cassona. Poprzez oszacowanie rzeczywistych zachowań krwi i jej składników pod wpływem czynników zewnętrznych matematyczne mo-

dele reologiczne umożliwiają odzwierciedlenie procesów zachodzących w naczyniach krwionośnych w warunkach fizjologicznych. Wspomniany model Cassona stał się podstawą opisywania właściwości reologicznych krwi, a jednocześnie dał bardzo obszerną wiedzę na temat zależności parametrów modeli od czynników organicznych, takich jak fibrynogen czy hematokryt [35,36].

Postacią, o której nie sposób nie wspomnieć przy omawianiu historii hemoreologii, jest niewątpliwie wspomniany Alfred Lewin Copley (1910-1992). Naukowiec, jak również artysta, wniósł ogromny wkład do badań nad procesem krzepnięcia krwi, jej lepkością oraz właściwościami tiksotropowymi i plastycznymi. Skonstruował własny lepkościomierz z opadającą kulą, tzw. wiskozymetr *rolling ball*, oraz przyczynił się do przystosowania przemysłowego reogoniometru Karla Weissenberga do badań nad krwią. To przełomowe dokonanie pozwoliło na standaryzację oraz porównywanie badań hemoreologicznych w laboratoriach na całym świecie [9,37]. To właśnie Copleyowi przypisuje się użycie po raz pierwszy terminu „hemoreologia”, definiowanego przez niego jako „nauk[a] zajmując[a] się deformacją, wliczając w to przepływ krwi i jej składników oraz tych elementów naczyń krwionośnych i otaczających tkanek, z którymi krew i jej składniki wchodzi w bezpośredni kontakt” [38]. Poza szerokim zakresem badań naukowych Copleyowi zawdzięczamy również znaczne rozpropagowanie wiedzy o hemoreologii – zaangażował się w utworzenie dwóch czasopism hemoreologicznych: „Biorheology”, wydanego po raz pierwszy w 1962 r. oraz w 1980 r. „Clinical Hemorheology”. Copley współorganizował również pierwszą Międzynarodową Konferencję Hemoreologiczną (ang. International Conference on Hemorheology), która odbyła się w 1966 r. na Uniwersytecie Islandzkim w Reykjavíku. Utworzono wówczas Międzynarodowe Towarzystwo Hemoreologiczne (ang. International Society of Hemorheology) oraz przyznano po raz pierwszy nagrodę Poiseuille Gold Medal, której laureatem został Robin Fåhræus. W 1969 r., z uwagi na chęć poszerzenia działalności towarzystwa, postanowiono zmienić jego nazwę na Międzynarodowe Towarzystwo Bioreologii (ang. International Society of Biorheology). Japonia była pierwszym państwem, które w 1977 r. utworzyło narodowe stowarzyszenie The Japanese Society of Biorheology, zrzeszające ok. 200 członków [39].

Rozwój czasopism, a także międzynarodowych, narodowych i regionalnych stowarzyszeń i grup zajmujących się hemoreologią przyczynił się do znacznego postępu wiedzy w jej zakresie. Dodatkowo zrzeszanie się badaczy oraz możliwość regularnego porównywania wyników badań zaczęły stanowić koło napędowe tego postępu.

PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ

Pomimo wieków badań nad hemodynamiką i reologią dopiero od niedawna zaczynamy rozumieć skomplikowaną naturę krwi. Coraz szersza wiedza na temat wpływu jej przepływu na zdrowie, a zwłaszcza na patogenezę chorób sercowo-naczyniowych, jak też ich diagnostykę i leczenie, spowodowała w ostatnich dekadach intensyfikację badań hemoreologicznych. Z czasem odkryto, że krew wykazuje znacznie bardziej skomplikowane właściwości, wliczając właściwości lepkosprężyste, lepkoplastyczne oraz tiksotropowe. W przeciwieństwie do tradycyjnych modeli newtonowskich nowoczesne multimodalne modele reologiczne uwzględniają wymienione właściwości krwi, dzięki czemu znacznie lepiej odzwierciedlają zjawiska fizjologicznie zachodzące w naczyniach krwionośnych. Zastosowanie modeli mikroskopowych i mezoskopowych pozwala na bardzo szczegółowe odzwierciedlenie w obliczeniach zachowania czerwonych krwinek oraz innych składników krwi [40].

Podkreśla się rolę parametrów hemoreologicznych w diagnostyce oraz w profilaktycznym wykrywaniu wczesnych objawów chorób, takich jak nadciśnienie, cukrzyca, hiperlipidemia, miażdżyca, zakrzepica, jak też chociażby w monitorowaniu i prognozowaniu powikłań u osób chorych na COVID-19 [4,41]. Popularnym kierunkiem rozwoju badań jest również wzajemna zależność stylu życia i lepkości krwi, jak też badanie wpływu aktywności fizycznej, jej rodzaju i intensywności na parametry hemoreologiczne [42].

Patrząc na ten imponujący postęp wiedzy w zakresie reologii układu krążenia, mamy nadzieję, że przyszłość przyniesie jeszcze więcej odkryć, które dadzą nam pełniejszy obraz skomplikowanego procesu cyrkulacji krwi w naczyniach krwionośnych, jak też innowacyjnych wizji wykorzystania tych informacji w profilaktyce, diagnostyce oraz leczeniu chorób.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Scott Blair G.W., Spanner D.C., *An Introduction to Biorheology*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (Nederland) 1974.
- [2] Baskurt O.K., Meiselman H.J., Blood Rheology and Hemodynamics. *Semin Thromb Hemos*, 2003, 29(5), 435–450.
- [3] Marcinkowska-Gapińska A., *Analiza statystyczna rozkładu wartości współczynników reologicznych krwi w grupie zakwalifikowanych krwiodawców*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego, Poznań (Polska) 2018.
- [4] Czerwiński F., Kopczyńska D.L., Musioł A.A. i wsp., Lepkość krwi jako czynnik reologiczny w patogenezie chorób naczyniowych, [w:] *Biofizyka a medycyna*, red. Kubisz L., Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego, Poznań (Polska) 2019, 32–58.
- [5] Baskurt O.K., Hardeman M.R., Rampling M.W. i wsp., *Handbook of Hemorheology and Hemodynamics*, IOS Press, Amsterdam (Nederland) 2007.
- [6] Boisaubin E.V., Cardiology in Ancient Egypt. *Tex Heart Inst J*, 1988, 15(2), 80–85.
- [7] Janeczka M., Skalec A., Pistor P., Ewolucja poglądów na temat układu sercowo-naczyniowego. Część I. Mezopotamia i starożytny Egipt. *Życie Weterynaryjne*, 2020, 95(10), 656–658.
- [8] Janeczka M., Skalec A., Pistor P., Ewolucja poglądów na temat układu sercowo-naczyniowego. Część II. Starożytna Grecja i starożytny Rzym. *Życie Weterynaryjne*, 2020, 95(11), 717–720.
- [9] Rampling M.W., A History of Haemorheology. A British Perspective. *Series on Biomechanics*, 2012, 27(1-2), 7–16.
- [10] Aird W.C., Discovery of the Cardiovascular System: From Galen to William Harvey. *J Thromb Haemost*, 2011, 9, 118–129.
- [11] Martins e Silva J., From the Discovery of the Circulation of the Blood to the First Steps in Hemorheology: Part 1. *Rev Port Cardiol*, 2009, 28(11), 1245–1268.
- [12] Malpighi M., De Pulmonibus, tłum. Young J., *Proc R Soc Med*, 1929, 1–11.
- [13] Kępińska M., Szyguła Z., Dąbrowski Z. i wsp., Czynniki wpływające na zmiany właściwości reologicznych krwi – przegląd piśmiennictwa. *Diagnostyka Laboratoryjna*, 2017, 53(4), 247–250.
- [14] Shapin S., Who was Robert Hooke?, [w:] *Robert Hooke: New Studies*, red. Hunter M., Schaffer S., Suffolk The Boydell Press, Woodbridge (England) 1989, 253–285.
- [15] Stephanis C.G., Mourmouras D.E., Tsagadopoulos D.G., On the Elastic Properties of Arteries. *J Biomech*, 2003, 36(11), 1727–1731.
- [16] Martins e Silva J., From the Discovery of the Circulation of the Blood to the First Steps in Hemorheology: Part 2. *Rev Port Cardiol*, 2009, 28(12), 1405–1439.
- [17] van Leeuwenhoek A., Microscopical Observations from Leeuwenhoek, Concerning Blood, Milk, Bones, the Brain, Spittle, and Cuticula, & c. Communicated by the Said Observer to the Publisher in a Letter, Dated June 1. *Philos Trans R Soc Lond*, 1674, 9121–9131.
- [18] Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J., *Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe reologii*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź (Polska) 2014.
- [19] Poiseuille J.L.M., Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires. *C R Acad Sci*, 1835(1), 554–560.

- [20] Rajzer M., Palka I., Kawecka-Jaszcz K., Znaczenie zjawiska lepkości krwi w patogenezie nadciśnienia tętniczego. *Nadciśnienie tętnicze*, 2007, 11(1), 1–11.
- [21] Scott Blair G.W., The History of Hemorheology. *Clinical Hemorheology*, 1981, 1, 445–449.
- [22] Paszun S., Stanisław B., Rys Historyczny – Nadciśnienie tętnicze, układ renina–angiotensyna i synteza pierwszego inhibitora enzymu konwertującego angiotensynę. *Nowiny Lekarskie*, 2008, 77(5), 392–398.
- [23] Malpighi M., *De pulmonibus observation*, 1661, [online] <https://www.europeana.eu/pl/item/9200579/jsxvzzsk> – 6.09.2024.
- [24] Leeuwenhoek A., Hoole S., *The Select Works of Antony van Leeuwenhoek: Containing His Microscopical Discoveries in Many of the Works of Nature*, 1800–1807, [online] <https://www.biodiversitylibrary.org/item/26601#page/14/mode/1up> – 6.09.2024.
- [25] Jaszczak-Skorupska M., Wroński S.K., *Wpływ zjawisk powierzchniowych na przepływ cienkich warstw cieczy ni-newtonowskich*. Małgorzata Jaszczak-Skorupska, vol. 1, Instytut Chemii Fizycznej PAN, Warszawa (Polska) 1976, [online] <https://rcin.org.pl/publication/44251/edition/25603/jaszczak-skorupska-malgorzata?language=pl> – 11.03.2024.
- [26] Fåhræus R., The Suspension Stability of the Blood, *Physical Review*, 1929, 9, 241–274.
- [27] Toksvang L.N., Berg R.M., Using a Classic Paper by Robin Fahraeus and Torsten Lindqvist to Teach Basic Hemorheology. *Adv Physiol Educ*, 2013, 37(2), 129–133.
- [28] Fåhræus R., Torsten L., The Viscosity of the Blood in Narrow Capillary Tubes. *American Journal of Physiology*, 1931, 96, 562–568.
- [29] Kucharz E.J., Sto pięćdziesiąta rocznica urodzin Edmunda Faustyna Biernackiego – twórcy testu pomiaru szybkości opadania krwinek czerwonych. *Forum Reumatol*, 2016, 2(4), 194–198.
- [30] Biernacki E., O stosunku osocza do ciałek czerwonych we krwi krążącej i o wartościach różnych metod oznaczania ogólnej objętości krążków. *Pam Tow Lek Warsz.*, 1894, 90, 32–72.
- [31] Biernacki E., Samoistna sedymentacja krwi jako naukowa i praktyczno-kliniczna metoda badania. *Gaz Lek*, 1897, 17, 962–1004.
- [32] Biernacki E., *Istota i granice wiedzy lekarskiej*, 1899, [online] <https://polona.pl/item-view/5ca013b3-313f-485d-b995-f37de339dd33?page=2> – 6.09.2024.
- [33] Markovitz H., Markus Reiner. *Physics Today*, 1976, 29(9), 70–71.
- [34] Copley A.L., Introduction: On the Way to Modern Clinical Hemorheology, [w:] *Clinical Hemorheology. Developments in Cardiovascular Medicine*, vol. 74, red. Chien S., Dormandy J., Ernst E. i wsp., Springer Dordrecht, Dordrecht (Nederland) 1987, 74, 1–8.
- [35] Casson N., A Flow Equation for Pigment-Oil Suspensions of the Printing Ink Type, [w:] *Rheology of Disperse Systems*, red. Mill C.C., Pergamon Press, Oxford (United Kingdom) 1959, 84–104.
- [36] Reiner M., Scott Blair G.W., The Flow of Blood through Narrow Tubes. *Natur*, 1959, 184, 354–354.
- [37] Witte S., Alfred L. Copley, the Teacher and Founder. *Biorheology*, 1992, 29, 11–14.
- [38] Ehrly A.M., *Therapeutic Hemorheology*, Springer Berlin, Heidelberg (Deutschland) 1991.
- [39] Chien S., The International Society of Biorheology – Past, Present, and Future: Celebration of the 30th Anniversary of the Japanese Society of Biorheology. *Journal of Japanese Society of Biorheology*, 2007, 21(3), 88–95.
- [40] Beris A., Jeffrey S., Horner J.S. i wsp., Recent Advances in Blood Rheology: A Review. *Soft Matter*, 2021, 17, 10591–10613.
- [41] Słowińska A., Marcinkowska-Gapińska A., Wpływ COVID-19 na lepkość krwi – najnowsze doniesienia, [w:] *Biofizyka a medycyna*, t. 11, red. Kubisz L., Hojan-Jezińska D., Matthews-Brzozowska T. i wsp., Wydaw. Uniw. Med. im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Poznań (Polska) 2022, 148–159.
- [42] Słowińska A., Marcinkowska-Gapińska A., Jak styl życia wpływa na parametry reologiczne krwi?, [w:] *Biofizyka a medycyna*, t. 9, red. Kubisz L., Hojan-Jezińska D., Matthews-Brzozowska T. i wsp., Wydaw. Uniw. Med. im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Poznań (Polska) 2020, 114–123.