

УДК 53.08:621.317.7.082.743:542.6

**ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КРОВІ:
СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ**¹Гуцул О. В., ²Слободян В. З.¹*Буковинський державний медичний університет,
Театральна пл., 2, м. Чернівці, 58002, Україна*²*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012, Україна*

oksana.v.s@mail.ru

Проведено літературний аналіз інноваційних фізичних методів гематологічних досліджень, що використовуються або знаходяться на стадії впровадження в сучасну клінічну практику. Розглянуто основні напрямки сучасних тенденцій дослідження крові. Порівняння методів дослідження крові оптичних, електрофізичних та ін., спонукає до пошуку нових ідей розробки комплексу пристроїв, які б задовольняли широкий спектр вимог сучасної медицини.

Ключові слова: фізичні методи дослідження, гематологічні дослідження, кров.

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРОВИ:
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**¹Гуцул О. В., ²Слободян В. З.¹*Буковинский государственный медицинский университет,
Театральная пл., 2, г. Черновцы, 58002, Украина*²*Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, г. Черновцы, 58012, Украина*

oksana.v.s@mail.ru

Проведен літературний аналіз інноваційних фізичних методів гематологічних досліджень, які використовуються або знаходяться на стадії впровадження в сучасну клінічну практику. Розглянуто основні напрямки сучасних тенденцій дослідження крові. Порівняння методів дослідження крові оптичних, електрофізичних та др., побуждає до пошуку нових ідей розробки комплексу пристроїв, які б задовольняли широкий спектр вимог сучасної медицини.

Ключевые слова: физические методы исследования, гематологические исследования, кровь.

PHYSICAL METHODS OF BLOOD: CURRENT STATE AND PROSPECTS¹Gutsul O.V., ²Slobodyan V.Z.¹*Bukovinian State Medical University,
2, Theatralna sq., Chernivtsi, 58002, Ukraine*²*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsjubynskyi Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine*

oksana.v.s@mail.ru

Modern literature, dealing with a study of the innovative hematologic research of physical methods used or under implementation in current clinical practice, has been analyzed. The main areas of contemporary research trends of blood. Comparison of methods for blood tests optical, electro and others, leads to the search for new ideas develop a set of devices with wide range of modern medicine requirements.

The paper reviews an analysis of literature the new for physical investigations of blood. We describe some of the fundamentals for measuring the viscosity of whole blood and plasma and its application to the diagnosis of patients and describe some of general principles of clinical laboratory viscosity measurement. The 3 main categories of instrumentation for viscosity measurement – capillary, falling-sphere, and rotational viscometers – are discussed. We compare the various types of instrumentation for their usefulness with various types of clinical specimens. Relevant features that may be important in selecting a viscometer are described. We hope the information in this review will be useful to scientists and clinical laboratory staff in explaining the available choices for investigation plasma and whole blood. Development, creation, production and introduction into clinical practice of modern measuring and diagnostic systems that find their application in all areas of the health system, is of great practical importance. The advantages of modern automated systems integrate several methods of analysis, the ability of many tests with a tube using a minimum sample volume, guarantee high precision studies,

automated quality control. Analysis of the literature showed that the development of new diagnostic methods is an urgent task medical equipment. Despite the advances in the study of blood rheology urgent task is the development of methods of analysis hemorheology that objectively reflect the aggregation and rheological properties of blood. Modern methods of hematological studies are quite diverse. From the physical properties of blood has important diagnostic value determination of its specific gravity, viscosity and speed of coagulation, and erythrocyte sedimentation reaction. At the heart of rheological measurements in medicine lies precisely measure blood viscosity, which depends on: hematocrit, plasma protein concentration, flow velocity and other external factors. Blood viscosity is a major factor in a lot of diseases and very important in heart diseases. When blood viscosity increases, it damages blood vessels and increases the risk of heart attacks. Currently, the only method of treatment is to take drugs such as aspirin, which has, however, several unwanted side effects. Here we report our finding that blood viscosity can be reduced with magnetic fields of 1 T or above in the blood flow direction. One magnetic field pulse of 1.3 T lasting ~1 min can reduce the blood viscosity by 20%-30%. After the exposure, in the absence of magnetic field, the blood viscosity slowly moves up, but takes a couple of hours to return to the original value. The process is repeatable. Reapplying the magnetic field reduces the blood viscosity again. This technology has much potential for physical therapy. Everything diversity of modern devices and methods viscosimeter does not allow for analysis of blood viscosity in conditions in vivo. This leads to finding innovative approaches in the development of non-trivial devices and methods for the study of biological fluids. Numerous clinical and biophysical studies have shown that exposure to magnetic fields reduces blood rheology, accelerates erythrocyte sedimentation rate, etc. We described a novel optical approach, Laser Speckle Rheology (LSR), to evaluate a patient's coagulation status by measuring the viscoelastic properties of blood during coagulation. It should be noted that to date there is no sufficient data set that can provide the most effective impact parameters (amplitude, frequency magnetic field, the action, etc.), so all research in this area is urgent. So creating new innovative devices of high quality and great range of functionality is the urgent task of modern medical equipment.

Key words: physical methods of investigation, hematologic studies, blood.

Аналіз літературних даних показав, що розробка нових діагностичних методів є актуальним завданням медичного приладобудування [1]. Для ранньої діагностики онкологічних захворювань перспективним є метод, заснований на вимірюванні електрофізичних параметрів крові [2]. Незважаючи на успіхи в дослідженні реологічних властивостей крові, актуальним залишається завдання розробки методів аналізу гемореології, що об'єктивно відтворюють агрегаційні й реологічні властивості крові. Поява будь-якого принципово нового методу завжди означає розширення можливостей дослідника та створення передумов для висвітлення проблеми з нового боку. Сучасні методи гематологічних досліджень досить різноманітні. З фізичних властивостей крові важливе діагностичне значення має визначення її питомої ваги, в'язкості й швидкості згортання [3, 4], а також реакції осідання еритроцитів. В основі реологічних вимірів у медицині лежить саме вимірювання в'язкості крові, яка залежить від: гематокрита, концентрації білка в плазмі, швидкості кровотоку та інших зовнішніх факторів.

Вивчення залежності процесів агрегації в рухомій крові від електричних параметрів клітин [5-7] на основі дослідження електромагнітної взаємодії поляризованих клітин з урахуванням просторового розділення заряду потребує відповіді на питання про характер розподілу клітин у рухомому потоці.

Наразі багато дослідників приділяють значну увагу вивченню реологічних властивостей крові на рівні мікроциркуляції [8-12], проте використання різних методів визначення гемореологічних параметрів не дозволяє знайти стандарти кількісного контролю, що необхідно для клінічної практики.

Непрямі методи визначення в'язкості ґрунтуються на застосуванні різних методів, основними з яких є метод капілярного витікання, метод падаючої кульки, ротаційний і вібраційний методи [13-15]. Для вимірювання в'язкості рідин використовують спеціальні прилади – віскозиметри: для вимірювання кінематичної в'язкості – капілярні, для динамічної – ротаційні.

Капілярний віскозиметр підходить для дослідження ньютонівських рідин (плазма), проте для не ньютонівських рідин (кров) використання метода Оствальда значно ускладнюється. У віскозиметрі такого типу рідина піддається дії напруженню зсуву, яке змінюється у широкому інтервалі, причому це напруження завжди максимальне поблизу стінок та рівне нулю біля осьової лінії.

Технічні складності віскозиметрії пов'язані насамперед з тим, що кров є не однорідною рідиною. У медицині використовуються капілярні віскозиметри (віскозиметр ВПЖ, ВНЖ, ВК-4). Визначення в'язкості крові у взаємозв'язку з рядом інших аналізів дозволяє об'єктивно оцінити стан людського організму. Проте слід відзначити, що наразі не існує єдиної методики вивчення в'язкості крові. Зараз розроблено мікрорідинні динамічні системи для вимірювання швидкості і в'язкості біологічних рідин (наприклад, крові в коронарних артеріях) [16, 17].

Усе різноманіття сучасних пристроїв та методів віскозиметрії не дозволяє проводити аналіз в'язкості крові в умовах *in vivo*. Це спонукає до пошуку нестандартних підходів під час розробки нетривіальних приладів та методів дослідження біологічних рідин.

Реологічні властивості крові проявляються при течії по судинах менше 300 мікрон – при зменшенні діаметра судини відносна спостережувана в'язкість $\eta_{\text{від}}$ зменшується [8]. Це явище відоме, як ефект Фареуса-Ліндквіста – залежність в'язкості крові від діаметра кровоносної судини рис. 1.

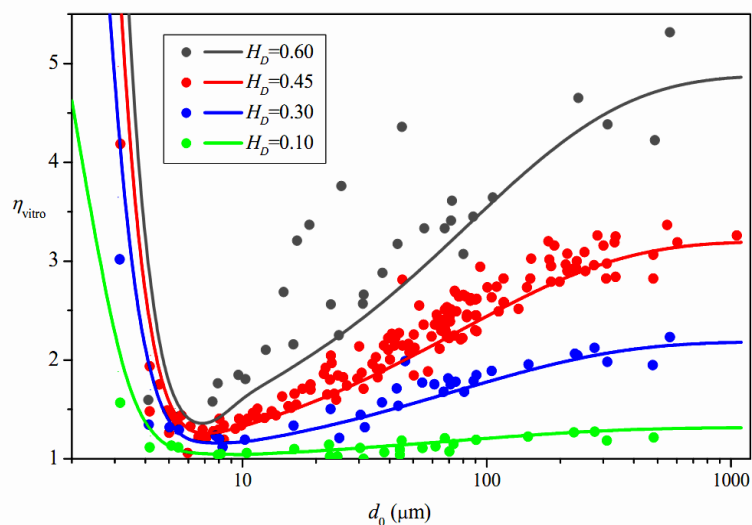


Рис. 1. Залежність відносної в'язкості η_{vitro} від діаметра судини d_0 для чотирьох фіксованих значень середнього по потоку показника гематокриту H_D [9]. Значки – експериментальні дані з [18] для скляних трубок, лінії – розраховані за апроксимаційною формулою

Зменшення відносної в'язкості пояснюють сепарацією еритроцитів до центру кровоносної судини і утворенням коло стінки вільного від еритроцитів шару плазми, у якому в'язкість менше. У процесі руху по судинах еритроцити деформуються, обертаються, злипаються, утворюють конгломерати. Усі ці процеси необхідно враховувати в математичній моделі течії крові.

Для розрахунку відносної та ефективної в'язкості крові відомий цілий ряд емпіричних залежностей, наведених у роботах [8-10, 13]. У роботах [8-11, 19-26] вивчають реологічні властивості крові та розглядають теоретичні моделі, які описують рух крові судинами. Для опису течії рідин використовують різні математичні моделі. Кров, загалом, може бути добре описана з використанням моделі Кессона [12].

В'язкість крові визначається наявним вмістом еритроцитів, у свою чергу, відомо, що магнітні властивості еритроцита загалом визначаються співвідношенням наявних у ньому форм гемоглобіну Hb. Найбільш сильно парамагнітні властивості виражені у metHb, вміст якого в нормальній крові менше 4% (залежно від віку еритроцита), але значно зростає при деяких патологічних станах. З огляду на це, важливою є оцінка величини магнітного моменту та магнітної сприйнятливості еритроцита. У роботі [6] наведено величину магнітного моменту еритроцита: $M_s = \chi_v w_0 H = -6,334 \cdot 10^{-17} H$, де χ_v – об'ємна сприйнятливості внутрішньоклітинного розчину. У роботі [27] також проведено оцінку величини магнітного моменту еритроцита, попередньо визначивши його магнітну сприйнятливості

$\chi = -4\pi \cdot 0,736 \cdot 10^{-6}$. Експериментально встановлено, що магнітна сприйнятливості крові залежить від величини прикладеного магнітного поля. В артеріях спостерігається зменшення, а у венах навпаки збільшення магнітної сприйнятливості зі зростанням величини прикладеного магнітного поля (рис. 2).

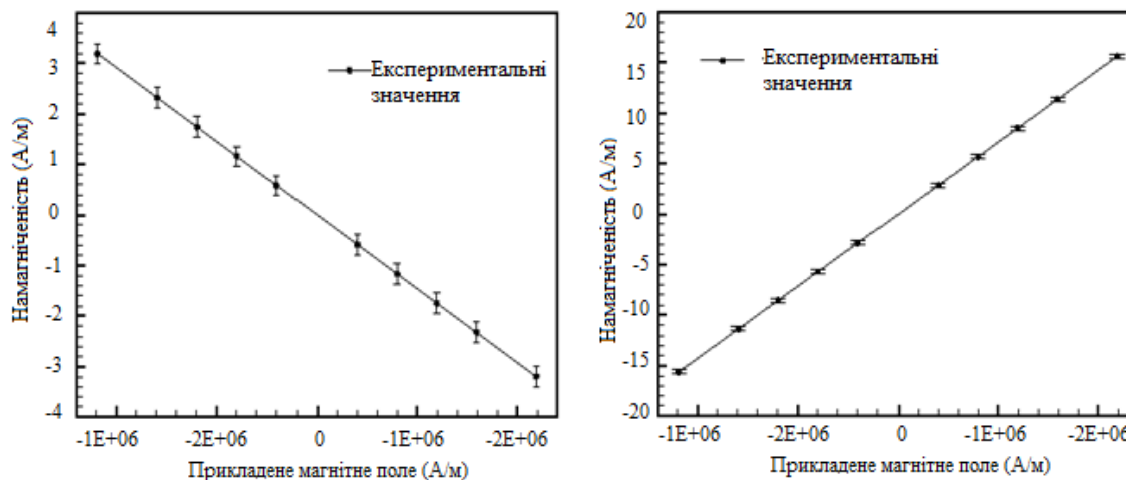


Рис. 2. Магнітна сприйнятливості крові в артеріях (1) та венах (2)

Крім магнітних сил між еритроцитами діють ще сили молекулярного притягання і електростатичного відштовхування. Під час дослідження балансу сил агрегації клітин у зовнішньому магнітному полі, необхідно враховувати їх взаємодію як наведених магнітних диполів. Реальне ж індуковане поле клітини буде відрізнятися від поля диполя і сильно залежить від форми еритроцита.

У магнітному полі (МП) еритроцити здатні орієнтуватися і агрегувати в ланцюжки подібно до магнітних частинок (рис. 3). Дія МП ($B = 0,5 \text{ Тл}$) викликала помітну зміну електричних властивостей клітин крові [28]. Експериментально виявлено вплив МП на гемодинаміку, причому найбільш значні зміни відбуваються на рівні мікроциркуляції.



Рис. 3. Після впливу магнітних імпульсів (1,33 Тл) еритроцити згрупувалися в ланцюжки (зображення отримано за допомогою оптичного мікроскопа)

Експериментальні дані досить суперечливі: частина з них вказує на те, що МП викликає розширення кровоносних судин, а інша частина – що залежно від початкового стану організму МП призводить або до розширення, або до звуження судин [29]. У серії експериментів виявлено, що уповільнення руху крові досягає 25%, якщо величина прикладеного поля становить 10 Тесла [30]. При значенні поля в 1 Тесла (характерна величина для МРТ-пристроїв), в'язкість змінюється менш, ніж на 0,3%.

Встановлено, що осмотична стійкість еритроцитів лінійно залежить від індукції магнітного поля. Слабкі поля активують утворення активних форм кисню в нейтрофілах, а сильніші поля призводять до загибелі еритроцитів. Експериментуючи з величиною магнітної індукції та тривалістю впливу, автори [3] підібрали такі параметри, за яких червоні кров'яні тілця поляризуються і починають злипатися в дуже короткі ланцюжки, більш важчі ланцюжки еритроцитів спрямовуються до середини судинного русла, завдяки такому ефекту в'язкість крові знижується на 20-30%. Цього ефекту вдалося досягти, помістивши кров усього на одну хвилину в поле з індукцією в 1,3 Тесла – приблизно така ж, як у апарата магнітно-

резонансної томографії. Еритроцити згрупувалися в ланцюжки після впливу магнітних імпульсів (1,33 Тл), зображення отримане за допомогою оптичного мікроскопа (рис. 3).

Важливим діагностичним показником також є час згортання крові. Для дослідження згортання крові необхідно застосовувати велику кількість дорогих лабораторних тестів, що вимагають тривалого часу. Проте інноваційна розробка вчених [4] дозволила отримати максимум інформації під час лабораторного тестування методом лазерної спекл-реології (laser speckle rheology). При цьому властивості крові (текучість, в'язкість, здатність до коагуляції) досліджуються за допомогою лазера. У процесі пропущеного лазерного променя через зразок утворюється спекл-структура. Зразок крові просвічують лазерним променем, при цьому клітини крові й, зокрема, тромбоцити розсіюють світло, формуючи спекл. Схема пристрою та зображення спекл-структури представлена на рис. 4.

У крові зі звичайними показниками згортання об'єкти, що розсіюють світло, переміщуються вільно. У крові з підвищеними показниками в'язкості, з високою концентрацією фібриногену рух клітин крові сповільнений, обмежений, що зменшує мерехтіння спекла порівнянно зі спеклом звичайної крові.

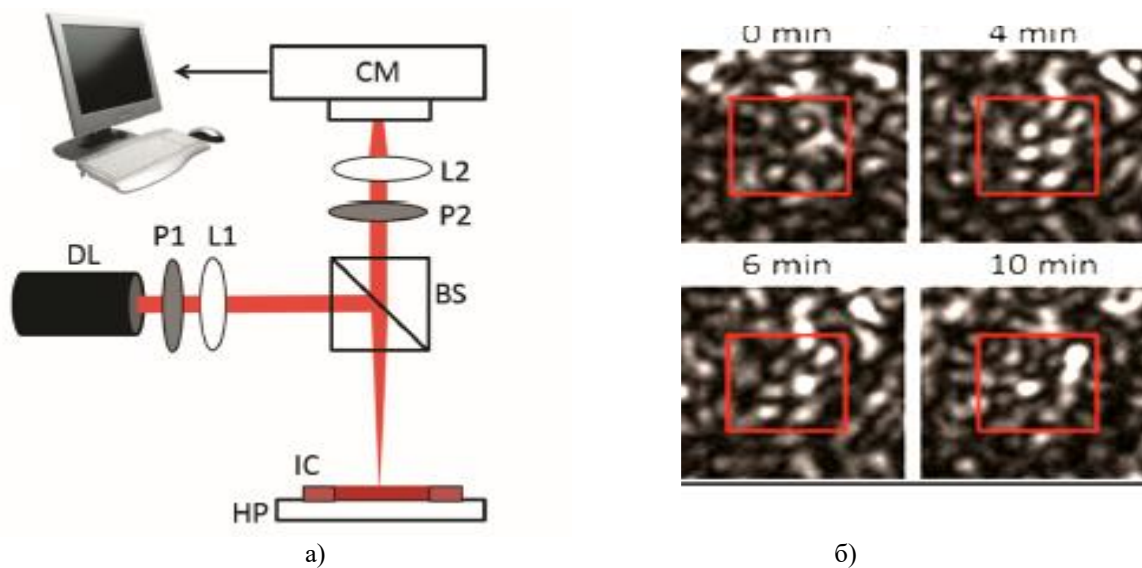


Рис. 4. а) Оптична схема пристрою: DL – діодний лазер (690 нм); P1, P2 – поляризатор; L1, L2 – лінзи; BS – пластинка, що розбиває промінь; CM – CMOS камера; IC – зразок; HP – пластина

Спекл кривої інтенсивності автокореляції $g_2(\tau)$, вимірний при 0, 6, 10 і 12 хвилин у процесі згортання крові зі зразка крові людини, представлено на рис. 5.

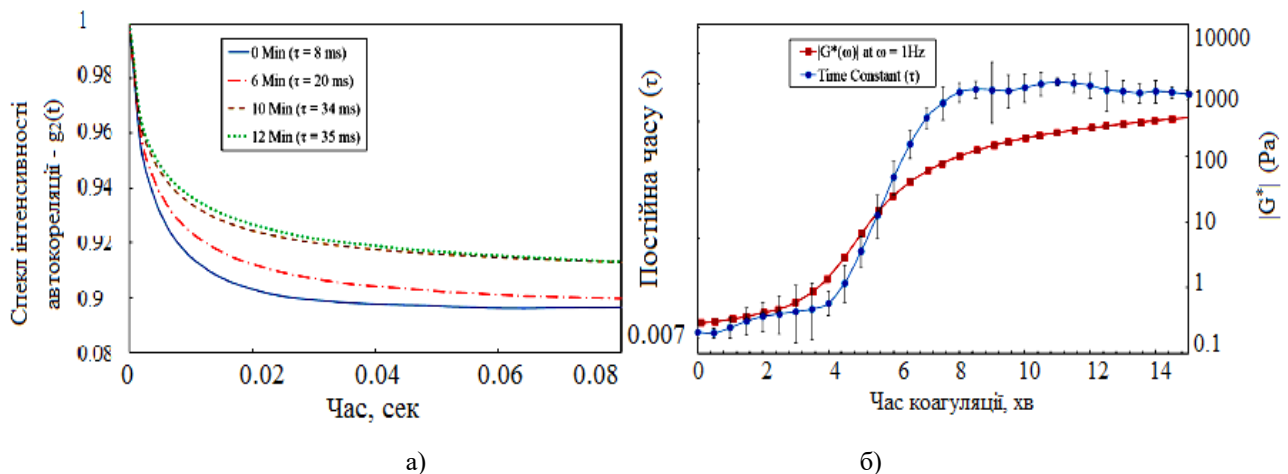


Рис. 5. Спекл інтенсивності кривої автокореляції (а) та спекл автокореляції постійної часу (б) для зразка крові людини

Спостерігається зменшення інтенсивності $g_2(\tau)$ зі збільшенням процесу згортання крові.

У пацієнтів з нормальним аРТТ і РТ спостерігали коротший час згортання порівняно із збільшеними аРТТ і РТ значеннями (рис. 6 (а)). Максимальний час утворення згустку (τ_{Max}) визначають на кривій залежності $\tau(t)$ (рис.6 (б)). Зростання τ_{Max} спостерігали для зразків крові пацієнтів з високим рівнем фібриногену і зменшення для зразків крові пацієнтів з нормальним вмістом фібриногену.

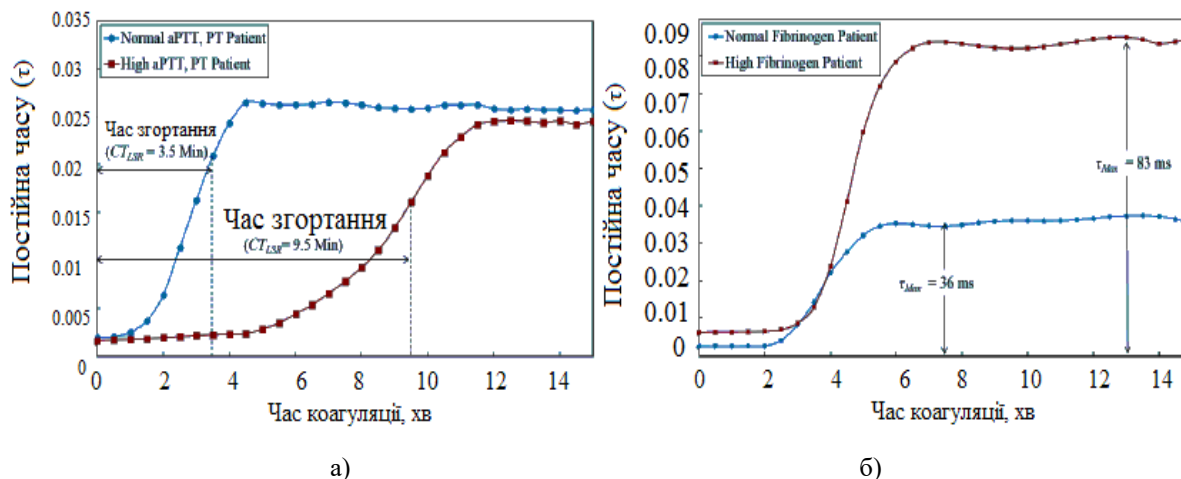


Рис. 6. Залежність часу коагуляції від спеклу автокореляції постійної часу $\tau(t)$: а) зразки крові пацієнтів з нормальним та високим аРТТ і РТ; б) зразки крові пацієнтів з нормальним та високим рівнем фібриногену

Сьогодні багато дослідників приділяють велику увагу вивченню реологічних властивостей крові на рівні мікроциркуляції [31-33], які визначаються її агрегаційними характеристиками [34], на агрегацію еритроцитів впливають імуноглобуліни всіх класів, імунні комплекси й компоненти комплементу, що може відігравати істотну роль у хворих бронхіальною астмою.

ВИСНОВОК

На жаль, накопичені знання не одержали поки що належного застосування в практичній діяльності лікаря через відсутність надійних і доступних методів діагностики. Внаслідок взаємозв'язку між агрегаційною здатністю еритроцитів і в'язкістю крові для оцінки реологічних властивостей крові необхідний комплексний аналіз цих показників. Разом із цим, на сьогодні використання різних методів визначення гемореологічних параметрів не дозволяє знайти стандарти кількісного контролю, що необхідно для клінічної практики. Отже очевидно, що створення конкурентоздатних та інноваційних приладів високої якості та з великим спектром функціональних можливостей є актуальним завданням сучасного медичного приладобудування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Солдаткин В. В. Анализы погрешностей и методы повышения точности измерительных приборов и систем : учеб. пособие / В. В. Солдаткин, В. М. Солдаткин. – Казань : Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009. – 248 с.
2. Романов А. Н. Изменение характеристик электромагнитных волн микроволнового диапазона при прохождении через биологические жидкости человека / А. Н. Романов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2011. – № 3. – С. 16-19.
3. Tao R. Reducing blood viscosity with magnetic fields / R. Tao, K. Huang // Phys. Rev. – 2011. – E 84, 011905. – P. 5.
4. Tripathi Markandey M. Assessing blood coagulation status with laser speckle rheology / Markandey M. Tripathi, Zeinab Hajjarian, Elizabeth M. Van Cott, Seemantini K. Nadkarni // Biomedical Optics Express. – 2014. – Vol. 5, Issue 3. – P. 817-831.

5. Колесникова А. В. МГД – модели гемодинамики и движения столбика эритроцитов в переменном магнитном поле : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук : спец. 05.13.18 / А. В. Колесникова. – ТГУ, Томск, 2007. – 17 с.
6. Kizilova N. Blood Rheology, erythrocyte aggregation and sedimentation: Experimental and theoretical study / N. Kizilova // 4th Eurosummer School on Biorheology. – Varna, 2012.
7. Черевко В. А. Математическое моделирование суспензий агрегирующих частиц / В. А. Черевко, Н. Н. Кизилова // Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях. Сб. тезисов междунар. конф. – Харьков, 2012. – С. 129.
8. Медведев А. Е. Двухфазная модель течения крови в крупных и мелких кровеносных сосудах / А. Е. Медведев // Математическая биология и биоинформатика. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 228-249.
9. Pries A. R. Blood Flow in Microvascular Networks / A. R. Pries, T. W. Secomb ; R. F. Tuma, W. N. Dura, K. Ley (Eds.). – Handbook of Physiology : Microcirculation. Academic Press, 2008. – P. 3-36.
10. Damiano E. R. Estimation of viscosity profiles using velocimetry data from parallel flows of linearly viscous fluids: application to microvascular haemodynamics / E. R. Damiano, D. S. Long, M. L. Smith // J. Fluid Mech. – 2004. – Vol. 512. – P. 1-19.
11. Рахимов А. А. Особенности течения крови в капиллярах при малых перепадах давления / А. А. Рахимов, Ю. В. Бурдюк, А. Т. Ахметов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – Режим доступа : www.science-education.ru/103-6375.
12. Вышлова М. А. Вискозиметрические и агрегационные корреляции в гемореологии : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. мед. наук : спец. 01.02.08 / М. А. Вышлова. – М., 2002. – 25 с.
13. Биофизика : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Под. ред. проф. В. Ф. Антонова. – М. : Гуманит. Изд. Центр ВЛАДОС, 1999. – 288 с.
14. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка : навч. посібник / В. І. Колчунов. – К. : НАУ, 2004. – 336 с.
15. Rosencranz R. Clinical Laboratory Measurement of Serum, Plasma, and Blood Viscosity / R. Rosencranz, S. A. Bogen // Am. J. Clin. Pathol. Pathology Patterns Reviews. – 2006. – P. 578-586.
16. A biodynamic microsystem for fluids viscosity measurements / A.M. Avram, M. Avram, A. Bragaru [et all] // Journal of Physics : Conference Series. – 2006. – Vol. 34. – P. 82-88.
17. Stand-alone self-powered integrated microfluidic blood analysis system (SIMBAS) / Ivan K. Dimov, Lourdes Basabe-Desmonts, Jose L. Garcia-Cordero [et all] // Lab Chip. – 2011. – № 11. – P. 845-850.
18. Pries A. R. The endothelial surface layer / A. R. Pries, T. W. Secomb, P. Gaehtgens // Eur J Physiol. – 2000. – Vol. 440. – P. 653-666.
19. Review: Rheological properties of biological materials / C. Verdier, J. Etienne, A. Duperray [et all] // Physique. – 2009. – Vol. 10. – P. 790-811.
20. Unique morphology and focal adhesion development of valvular endothelial cells in static and fluid flow environments / J. T. Butcher, A. M. Penrod, A. J. Garcia, R. M. Nerem // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. – 2004. – Vol. 24, № 8. – P. 1429-1434.
21. Chan W. Y. Modelling of non-Newtonian blood flow through a stenosed artery in-corporating fluid-structure in teraction / W. Y. Chan, Y. Ding, J. U. Tu // Australian & New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal. – 2007. – № 47. – P. 507-523.
22. Joshi P. Two-Layered Model of Blood Flow through Composite Stenosed Artery / P. Joshi, A. Pathak, B. K. Joshi // Applications and Applied Mathematics: An International Journal. – 2009. – Vol. 4, № 2. – P. 343-354.

23. Ponalagusamy R. Blood flow through an artery with mild stenosis: a two-layered model, different shapes of stenoses and slip velocity at the wall / R. Ponalagusamy // *Journal of Applied Sciences*. – 2007. – Vol. 7, № 7. – P. 1071-1077.
24. Shaw S. Pulsatile Casson Fluid Flow Through a Stenosed Bifurcated Artery / S. Shaw, R. S. R. Gorla, P. V. S. N. Murthy, C. O. Ng // *International Journal of Fluid Mechanics Research*. – 2009. – Vol. 36, № 1. – P. 43-63.
25. Shibeshi S. S. The rheology of Blood Flow in a Branched Arterial System / S. S. Shibeshi, W. E. Collins // *Applied Rheology*. – 2005. – Vol. 15, № 6. – P. 398-405.
26. Погорелова Е. А. Математическая модель сдвиговых течений в вене при наличии облитерирующего тромба / Е. А. Погорелова // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2010. – Т. 2, № 2. – С. 169-182.
27. Sheppard A. R. Biological effects of electric and magnetic fields of extremely low frequency / A. R. Sheppard, M. Eisenbud. – New York : New York University Press, 1977.
28. Sosa M. Magnetic Field in fluence on Electrical Properties of Human Blood Measured by Impedance Spectroscopy / M. Sosa, J. Bernal-Alvarado, M. Jimenez-Moreno [et all] // *Bioelectromagnetics*. – 2005. – Vol. 26. – P. 564-570.
29. McKay J. C. The Effects of Magn etic Field Exposure on Blood Flow and Blood Vessels in the Microvasculature / J. C. McKay, F. S. Prato, A. W. Thomas // *Bioelectromagnetics*. – 2007. – Vol. 28. – P. 81-98.
30. Haik Y. Apparent viscosity of human blood in a high static magN etic field / Y. Haik, V. Pai, Ch-J. Chen // *J. Magnetism Magn. Materials*. – 2001. – Vol. 225. – P. 180-186.
31. Wilson P. W. F. The metabolic syndrome: practical guide to origins and treatment : part I / P. W. F. Wilson, S. M. Grandy // *Circulation*. – 2008. – Vol. 112. – P. 1422-1425.
32. Петроченко Е. П. Механизмы регуляции микрогемодикуляции и реологических свойств крови в норме и при нарушениях кровообращения : дис. на соискание уч. степени канд. биолог. наук : спец. 03.00.13 / Е. П. Петроченко – Ярославль, 2009. – 161 с.
33. Шилов А. М. Артериальная гипертония и реологические свойства крови / А. М. Шилов, М. В. Мельник. – М. : «БАРС», 2005.
34. Пурло Н. В. Электрофоретическая подвижность эритроцитов как показатель оценки функциональной полноценности мембраны эритроцитов / Н. В. Пурло, О. В. Попова, Л. С. Бирюкова [и др.] // *Клиническая лабораторная диагностика*. – 2005. – № 1. – С. 40-44.

REFERENCE

1. Soldatkin, V.V. and Soldatkin, V.M. (2009), *Analiz pogreshnostey i metody povyshenia tochnosti izmeritel'nyh priborov i sistem* [Analysis of errors and methods to improve the accuracy of measuring devices and systems], high school textbook, Izd-vo KGTU im. A.N. Tupoleva, Kazan, Russia.
2. Romanov, A.N. (2011), “Variations in Electromagnetic Properties of Microwaves Passing Through Human Biological Fluids”, *Biomedical electronics*, no. 3, pp. 16-19.
3. Tao, R. and Huang, K. (2011), “Reducing blood viscosity with magnetic fields”, *Phys. Rev.*, E 84, 011905.
4. Markandey M. Tripathi, Zeinab Hajjarian, Elizabeth M. Van Cott, and Seemantini K. Nadkarni (2014), “Assessing blood coagulation status with laser speckle rheology”, *Biomedical Optics Express*, vol. 5, issue 3, pp. 817-831.
5. Kolesnikova, A.V. (2007), “MHD – model hemodynamics and movement of the column of red blood cells in an alternating magnetic field”, Thesis abstract for Cand. Sc. (Phys.-Math.), 05.13.18, Tomsk State University Tomsk, Russia.
6. Kizilova, N. (2012), “Blood Rheology, erythrocyte aggregation and sedimentation: Experimental and theoretical study” Conference proceedings of the 4 th Eurosummer School on Biorheology, Varna, 2012.

7. Cherevko, V.A. and Kizilova, N.N. (2012), "Mathematical modeling of suspensions of particles aggregation", *Sovremennye problemy matematiki i ee prilozheniya v estestvennyh naukah i informatsionnyh tehnologiyah*, Sbornik tesisov mejdunarodnoy konferentsii, Kharkov, p. 129.
8. Medvedev, A.E. (2011), "A two-phase model of blood flow in large and small blood vessels", *Mathematical Biology and Bioinformatics*, vol. 6, no. 2, pp. 228-249.
9. Pries, A.R., Secomb, T.W., Tuma, R.F., Dura, W.N., Ley, K. Eds. (2008), "Blood Flow in Microvascular Networks", In: *Handbook of Physiology: Microcirculation*, Academic Press, pp. 3-36.
10. Damiano, E.R., Damiano, E.R., Long, D.S. and Smith, M.L. (2004), "Estimation of viscosity profiles using velocimetry data from parallel flows of linearly viscous fluids: application to microvascular haemodynamics", *J. Fluid Mech.*, vol. 512, pp. 1-19.
11. Rahimov, A.A., Burdyuk, A.T. and Ahmetov, A.T. (2012), "Features of blood flow in capillaries at low differential pressure", *Modern problems of science and education*, no. 3, available at: www.science-education.ru/103-6375.
12. Vyshlova, M.A. (2002), "Viscometric aggregation and correlation hemorheology" Thesis abstract for Cand. Sc. (Med.), 01.02.08, Moscow, Russia.
13. Antonov, V.F. (1999), *Biofizika* [Biophysic], Gumanitarnoe izdatelstvo Tsentr Vldos, Moscow, Russia.
14. Kolchunov, V.I. (2004), *Teoretychna i prykladna gidromechanika* [Theoretical and Applied Fluid Mechanics] high school textbook, The National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
15. Rosencranz, R. and Bogen, S.A. (2006), "Clinical Laboratory Measurement of Serum, Plasma, and Blood Viscosity", *Am. J. Clin. Pathol. Pathology Patterns Reviews*, pp. 578-586.
16. Avram, A.M., Avram, M., Bragaru, A. and Iiescu, C. (2006), "A biodynamic microsystem for fluids viscosity measurements", *Journal of Physics: Conference Series.*, vol. 34, pp. 82-88.
17. Dimov, I.K., Basabe-Desmonts, L., Garcia-Cordero, J.L., Ross, B.M., Park, Y., Ricco, A.J. and Lee, L.P. (2011), "Stand-alone self-powered integrated microfluidic blood analysis system (SIMBAS)", *Lab Chip.*, no. 11, pp. 845-850.
18. Pries, A.R., Secomb, T.W. and Gaehtgens, P. (2000), "The endothelial surface layer", *Eur J Physiol.*, vol. 440, pp. 653-666.
19. Verdier, C., Etienne, J., Duperray, A. and Preziosi, L. (2009), "Review: Rheological properties of biological materials", *Physique*, vol. 10, pp. 790-811.
20. Butcher, J.T., Penrod, A.M., Garcia, A.J. and Nerem, R.M. (2004), "Unique morphology and focal adhesion development of valvular endothelial cells in static and fluid flow environments", *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.*, vol. 24, no. 8, pp. 1429-1434.
21. Chan, W.Y., Ding, Y. and Tu, J.U. (2007), "Modelling of non-Newtonian blood flow through a stenosed artery in-corporating fluid-structure in teraction", *Australian & New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal*, no. 47, pp. 507-523.
22. Joshi, P., Pathak, A. and Joshi, B.K. (2009), "Two-Layered Model of Blood Flow through Composite Stenosed Artery", *Applications and Applied Mathematics: An International Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 343-354.
23. Ponalagusamy, R. (2007), "Blood flow through an artery with mild stenosis: a two-layered model, different chapes of stenoses and slip velocity at the wall", *Journal of Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, pp. 1071-1077.
24. Shaw, S., Gorla, R.S.R., Murthy, P.V.S.N. and Ng, C.O. (2009), "Pulsatile Casson Fluid Flow Through a Stenosed Bifurcated Artery", *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 36, no. 1, pp. 43-63.
25. Shibeshi, S.S. and Collins, W.E. (2005), "The rheology of Blood Flow in a Branched Arterial System", *Applied Rheology*, vol. 15, no. 6, pp. 398-405.

26. Pogorelova, E.A. (2010) "Mathematical model of shear stress flows in the vein in the presence of obliterating thrombus", *Computer Research and Modeling*, vol. 2, no. 2, pp. 169-182.
27. Sheppard, A.R. and Eisenbud, M. (1977), "Biological effects of electric and magnetic fields of extremely low frequency", New York University Press, New York.
28. Sosa, M., Bernal-Alvarado, J., Jimenez-Moreno, M., Hernandez, J.C., Gutierrez-Juarez, G., Vargas-Luna, M., Huerta, R., Villagomez-Castro, J.C. and Palomares, P. (2005), "Magnetic Field in fluence on Electrical Properties of Human Blood Measured by Impedance Spectroscopy", *Bioelectromagnetics*, vol. 26, pp. 564-570.
29. McKay, J.C., Prato, F.S. and Thomas, A.W. (2007), "The Effects of Magnetic Field Exposure on Blood Flow and Blood Vessels in the Microvasculature", *Bioelectromagnetics*, vol. 28, pp. 81-98.
30. Haik, Y., Pai, V. and Chen, Ch. J.(2001), "Apparent viscosity of human blood in a high static magnetic field", *J. Magnetism Magn. Materials*, vol. 225, pp. 180-186.
31. Wilson, P.W.F. and Grandy, S.M. (2008), "The metabolic syndrome: practical guide to origins and treatment: part I", *Circulation*, vol. 112, pp. 1422-1425.
32. Petrochenko, E.P. (2009), "Mechanism of regulation of microcirculation and blood rheology in health and circulatory disorders", Thesis abstract for Cand. Sc. (Biology), 03.00.13, Yaroslavl, Russia.
33. Shylov, A.M. and Melnik, M.V. (2005), *Arterialnaya gipertoniya i reologicheskie svoistva krovi* [Arterial hypertension and blood rheology], BARS, Moskow, Russia.
34. Purlo, N.V., Popova, O.V., Biryukova, L.S. and Kozinets, G.I. (2005), "Electrophoretic mobility of red blood cells as a measure of evaluation of the functional usefulness of erythrocyte membranes", *Klinicheskaya Laboratornaya Diagnostika*, no. 1, pp. 40-44.

УДК 539.3

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ПРИБЛИЖЕННО АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ С УЧЕТОМ ТРЕНИЯ И ШЕРОХОВАТОСТИ

Дьяченко Н. Н., к. ф.-м. н., доцент, Синченко Е. С., бакалавр, Качан А. И., бакалавр

*Запорожский национальный университет,
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69600, Украина*

dyachenko-nata@mail.ru

Рассматривается плоская квазистатическая задача о скольжении с трением штампа с плоским основанием по поверхности упругого шероховатого слоя при линейном законе деформирования шероховатости. Предполагается отсутствие наклона штампа. В работе изучены свойства линейных операторов данной задачи. На их основании в двух случаях ограничения на коэффициенты шероховатости получено аналитическое решение задачи: первоначально в виде ряда Неймана, а затем степенного ряда, коэффициенты которого выражаются через повторные ряды. Для получения приближенно аналитического решения уравнение задачи сведено к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов степенного ряда функции нормального давления. В работе приведено обоснование возможности применения метода редукции с помощью проверки условий Л.В. Кантаровича, Г.П. Акилова. Проведен анализ числовых результатов относительно влияния шероховатости и трения на контактные характеристики: функцию нормального давления, углубление штампа, значение абсциссы точки наименьшего нормального давления.

Ключевые слова: плоская контактная задача, штамп с плоским основанием, шероховатость, линейный закон деформирования шероховатости, трение, ряд Неймана, метод последовательных приближений, метод редукции.