

## МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ КРОВІ

Вінницький Національний Технічний Університет

### Анотація

Огляд методів, які дають змогу зрозуміти в'язкість крові, яка є важливим параметром для розуміння різних фізіологічних і патологічних станів, включаючи серцево-судинні захворювання, мікроциркуляцію та гемореологічні розлади.

**Ключові слова:** Вязкість крові, реологія крові, капілярна віскозиметрія, ротаційна віскозиметрія, осциляторна віскозиметрія, віскозиметрія з падаючою сферою

В'язкість крові є важливим параметром для оцінки здоров'я серцево-судинної системи, і на нього можуть впливати різні фактори, такі як кількість еритроцитів, в'язкість плазми та гематокрит. Існує кілька доступних методів вимірювання в'язкості крові, від простих до більш складних.

**Капілярна віскозиметрія** є широко використовуваним методом вимірювання в'язкості крові. Даний методом передбачає вимірювання швидкості потоку крові через капілярну трубку в контрольованих умовах. Принцип капілярної віскозиметрії базується на рівнянні Хагена-Пуазейля, яке описує зв'язок між швидкістю потоку рідини, градієнтом тиску, розмірами капілярної трубки та в'язкістю рідини.

Принцип капілярної віскозиметрії наступний:

Основне обладнання, необхідне для капілярної віскозиметрії, включає скляну капілярну трубку з точним діаметром, джерело тиску або шприцевий насос, а також таймер або пристрій для вимірювання швидкості потоку.

Метод потребує невелику кількість крові. Основна вимога це уникати контакт крові з повітрям, так як це прискорює процес осідання еритроцитів. Далі заповнюють трубку точно визначеного діаметру та герметично закривають. Так як капілярна трубка підключена до джерела тиску або шприцевого насоса, різниця тиску в капілярі контролюється за допомогою застосування тиску або використання шприцевого насоса для створення постійної швидкості потоку. Швидкість потоку крові через капілярну трубку вимірюється за допомогою таймера або пристрою для вимірювання швидкості потоку. Реєструється час, необхідний для протікання крові відомою довжиною капілярної трубки [1].

В'язкість крові розраховується за допомогою рівняння Хагена-Пуазейля, яке враховує розміри капілярної трубки, градієнт тиску та швидкість потоку.

Рівняння виглядає наступним чином:

$$\eta = \frac{P \cdot L}{Q \cdot \pi \cdot r^4},$$

де:  $\eta$  - в'язкість крові,  $P$  - градієнт тиску в капілярі,  $L$  - довжина капіляра,  $Q$  - швидкість кровотоку, а  $r$  - радіус капілярної трубки.

Отримані значення в'язкості можна порівняти з еталонними значеннями або використати для подальшого аналізу, наприклад для оцінки наявності певних захворювань.

Капілярна віскозиметрія є простим методом вимірювання в'язкості крові. Однак для забезпечення точних результатів потрібні точні вимірювання розмірів капілярів і обережне поводження зі зразком крові. Крім того, метод припускає, що кров поводить себе як ньютонівська рідина, що не зовсім точно, оскільки кров демонструє неньютонівську поведінку за певних умов. Тому дуже важливо інтерпретувати результати у відповідному контексті та враховувати будь-які обмеження, пов'язані з методом [1,2].

**Ротаційна віскозиметрія**, також відома як ротаційна реометрія, є технікою, яка зазвичай використовується для вимірювання в'язкості рідин, включаючи кров. Це передбачає піддавання рідини зсуву шляхом обертання шпинделя зануреного в зразок, і вимірювання результуючого крутного моменту або опору обертанню. Ротаційна віскозиметрія надає цінну інформацію про текучі властивості та в'язкість рідини за різних швидкостей зсуву.

Вимірювання методом ротаційної віскозиметрії:

Ротаційні віскозиметри складаються з моторизованого шпинделя та датчика крутного моменту. Шпиндель занурюється в зразок рідини, а датчик крутного моменту вимірює опір обертанню. У пацієнта береться зразок крові та готується для дослідження. Для запобігання згортанню крові під час вимірювання може знадобитися антикоагулянт. Далі шпиндель занурюють у зразок крові, а ротаційний віскозиметр налаштовують на обертання з постійною швидкістю. Датчик крутного моменту вимірює опір або крутний момент, який впливає на шпиндель.

Ротаційний віскозиметр дозволяє контролювати швидкість зсуву, застосовану до зразка крові. Швидкість зсуву означає швидкість, з якою сусідні шари рідини рухаються відносно один одного. Його можна регулювати, змінюючи швидкість обертання або геометрію шпинделя.

Віскозиметри ротаційного типу зазвичай забезпечують широкий діапазон швидкостей зсуву, що дозволяє вимірювати як при низьких, так і при високих швидкостях зсуву. Це важливо, оскільки в'язкість крові може змінюватися залежно від застосованої швидкості зсуву.

Виміряні значення крутного моменту можна використовувати для розрахунку в'язкості крові за допомогою відповідних математичних моделей. Залежно від поведінки зразка крові можна використовувати різні моделі, такі як ньютонівська модель або неньютонівські моделі, такі як степеневий закон або модель Кассона [3]. Дані про в'язкість, отримані за допомогою ротаційної віскозиметрії, можна використовувати для оцінки властивостей потоку крові, таких як її опір потоку так і здатність до згортання. Це також може допомогти в діагностиці та моніторингу станів, пов'язаних із в'язкістю крові, таких як анемія, гіпертонія або серцево-судинні захворювання.

Ротаційна віскозиметрія має кілька переваг, включаючи її універсальність, широкий діапазон швидкості зсуву та здатність аналізувати як ньютонівські, так і неньютонівські рідини. Однак це більш складна та витончена техніка порівняно з більш простими методами, такими як капілярна віскозиметрія. Належне калібрування та стандартизація необхідні для точних вимірювань, а інтерпретація результатів вимагає розуміння реологічних моделей і поведінки крові.

Варто зазначити, що ротаційна віскозиметрія часто використовується в дослідницьких і клінічних лабораторіях, але може бути недоступною не в усіх умовах [3,4].

**Осциляторна віскозиметрія** є технікою, яка використовується для вимірювання в'язкопружних властивостей рідин, включаючи кров. На відміну від ротаційної віскозиметрії, яка застосовує до рідини постійну напругу зсуву, коливальна віскозиметрія піддає рідину коливальним напругам зсуву та вимірює результуючу деформацію або реакцію на напругу. Цей метод надає інформацію як про в'язкість (опір течії), так і про еластичність (здатність відновлювати форму після деформації) рідини.

Принцип осциляторної віскозиметрії наступний:

Коливальний віскозиметр складається з двох пластин або паралельних поверхонь, куди поміщається зразок рідини. Одна пластина зафіксована, а інша коливається вперед і назад, створюючи напругу зсуву. Прилад містить датчик сили або крутного моменту для вимірювання реакції рідини.

Зразок крові збирається та готується для тестування, подібно до інших методів вимірювання в'язкості. Зразок крові поміщають між двома пластинами коливального віскозиметра. Коливальна пластина застосовує до зразка синусоїдальну напругу зсуву, змушуючи його деформуватися та генерувати відповідь на напругу.

Коливальний віскозиметр дозволяє контролювати деформацію зсуву, що прикладається до зразка крові. Деформація зсуву являє собою величину деформації, на яку діє рідина через напругу зсуву. Деформацію можна регулювати шляхом зміни амплітуди або частоти коливань.

Коливальні віскозиметри пропонують діапазон частот, на яких можуть відбуватися коливання. Цей діапазон дозволяє проводити вимірювання в різних часових масштабах і надає цінну інформацію про в'язкопружну поведінку рідини.

Зібрані дані зазвичай представлені в термінах модуля накопичення ( $G'$ ) і модуля втрат ( $G''$ ), які описують пружну та в'язку реакцію рідини відповідно. Ці модулі можна використовувати для характеристики в'язкопружної поведінки зразок крові та дають уявлення про його течію та властивості деформації.

Осциляторна віскозиметрія є потужною технікою, яка використовується в дослідженнях, матеріалознавстві та біомедичних додатках. Він надає більш повну інформацію, ніж традиційні вимірювання в'язкості, оскільки фіксує як в'язкі, так і пружні компоненти реакції рідини. Однак для правильної інтерпретації результатів потрібне спеціальне обладнання та досвід аналізу даних [5].

**Віскозиметрія з падаючою сферою**, також відома як метод Стокса, є технікою, яка використовується для вимірювання в'язкості рідин, включаючи кров. Метод ґрунтується на спостереженні кінцевої швидкості, з якою маленька кулька падає крізь рідину під дією сили тяжіння. Вимірюючи швидкість падіння, можна розрахувати в'язкість рідини за допомогою рівняння закону Стокса.

Ідея віскозиметрії падаючої сфери наступна:

Невелика тверда сфера, зазвичай виготовлена зі скла або іншого інертного матеріалу. Сфера має бути достатньо щільною, щоб потонути в рідині, але не достатньо легкою, щоб мінімізувати ефект плавучості.

Зразок крові збирають і готують для тестування, забезпечуючи належну антикоагуляцію для запобігання згортанню під час вимірювання. Підготовлений зразок крові поміщають у прозору колонку або циліндр, для забезпечення візуального спостереження. Сферу обережно впускають у рідину з відомої висоти. Коли сфера падає крізь рідину під дією сили тяжіння, вона прискорюється, поки не досягне кінцевої швидкості. Процес падіння візуально спостерігають або записують за допомогою відео або інших методів зображення. Для вимірювання швидкості, вимірюється час, за який сфера впала на відому відстань. Ця інформація разом із відомою відстанню використовується для обчислення кінцевої швидкості кулі.

Розрахунок в'язкості крові проводиться за допомогою закону Стокса, який стверджує, що сила опору в'язкості, яка діє на невелику сферу в рідині, пропорційна її радіусу, швидкості сфери та в'язкості рідини.

Рівняння виглядає наступним чином:

$$F = 6\pi\eta rv$$

Де:  $F$  - сила опору, що діє на сферу,  $\eta$  - в'язкість крові,  $r$  - радіус сфери, а  $v$  кінцева швидкість кулі.

Переставляючи рівняння, в'язкість ( $\eta$ ) можна розрахувати як:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho - \rho_f)}{v},$$

де:  $g$  - прискорення сили тяжіння,  $\rho$  - густина кулі,  $\rho_f$  - густина рідини, а  $v$  - виміряна кінцева швидкість.

Отримане значення в'язкості можна порівняти з еталонними значеннями або використати для подальшого аналізу, наприклад для оцінки впливу певних захворювань або лікування на в'язкість крові.

Віскозиметрія з падаючою сферою є відносно простим і економічно ефективним методом вимірювання в'язкості рідини, включаючи в'язкість крові. Однак передбачається, що рідина поводитиметься як ньютонівська рідина і що на рух кулі не впливають такі фактори, як турбулентність або взаємодія частинок. Під час інтерпретації результатів важливо враховувати ці припущення та обмеження [6].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shin S, Ku Y, Park MS, Suh JS. Measurement of blood viscosity using a pressure-scanning capillary viscometer. Clin Hemorheol Microcirc. 2004;30(3-4):467-70. PMID: 15258389.
2. Hideki Yamamoto, Takafumi Yabuta. Measurement of human blood viscosity a using Falling Needle Rheometer and the correlation to the Modified Herschel-Bulkley model equation, Heliyon; Volume 6, Issue 9, 2020, e04792, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04792>;
3. Stuart J. Erythrocyte rheology. J Clin Pathol. 1985 Sep;38(9):965-77. doi: 10.1136/jcp.38.9.965. PMID: 3900147; PMCID: PMC499344;
4. Physiometer for simultaneous measurement of whole blood viscosity and its determinants: hematocrit and red blood cell deformability - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/A-Measurement-of-the-whole-blood-viscosity-using-the-rotational-viscometer-and\\_fig5\\_331776017](https://www.researchgate.net/figure/A-Measurement-of-the-whole-blood-viscosity-using-the-rotational-viscometer-and_fig5_331776017) [accessed 25 May, 2023];
5. Kestin J, Newell GF (1957) Theory of oscillating type viscometers I: the oscillating cup. Z Angew Math Phys 8:433–449;
6. Ping Yuan. Measurement of Viscosity in a Vertical Falling Ball Viscometer [Електронний ресурс] / Ping Yuan, Ben-Yuan Lin – Режим доступу до ресурсу: <https://www.americanlaboratory.com/913-Technical-Articles/778-Measurement-of-Viscosity-in-a-Vertical-Falling-Ball-Viscometer/>.

**Снядовський Владислав Юрійович** – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем. факультету інформаційних електронних систем. Вінницький національний технічний університет м. Вінниця, e-mail: ra15b.sniadovskyi@gmail.com.

**Тимчик Сергій Васильович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем. факультету інформаційних електронних систем. Вінницький національний технічний університет м. Вінниця, e-mail: tymchyk@vntu.edu.ua

**Олексій Мормітко Михайлович** – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем. факультету інформаційних електронних систем. Вінницький національний технічний університет м. Вінниця,

## METHODS OF MEASURING BLOOD VISCOSITY

### Abstract

Review of methods that provide insights into blood viscosity, which is an important parameter for understanding various physiological and pathological conditions, including cardiovascular diseases, microcirculation, and hemorheological disorders.

**Keywords:** Blood viscosity, blood rheology, capillary viscometry, rotational viscometry, oscillatory viscometry, falling sphere viscometry

**Vladyslav Y. Sniadovsky** – a graduate student at the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems. Faculty of Information Electronic Systems. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ra15b.sniadovskyi@gmail.com.

**Serhiy V. Tymchik** – Cand. Sc., Assistant Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems. Faculty of Information Electronic Systems. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tymchyk@vntu.edu.ua

**Oleksiy Mormitko Mykhailovych** – a graduate student at the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems. Faculty of Information Electronic Systems. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.