

УДК 532.616.1:002.5

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КРОВООБІГУ ОЧНОЇ АРТЕРІЇ****С. І. Владов, В. О. Мосьпан, О. О. Юрко, О. В. Мирошніченко, І. В. Скапа**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

Досліджено процес проходження пульсової хвилі через очну артерію, що дозволяє провести детальний аналіз кровообігу очей та визначити ступінь ураження артеріальною гіпертонією. Дане дослідження базується на добутку спектру вхідного сигналу пульсової хвилі та передавальної функції моделі кровоносної судини у вигляді неоднорідної довгої лінії та відтворенні вихідного сигналу пульсової хвилі у часовій області, який і визначає ступінь ураження артеріальною гіпертонією. Проведене дослідження, яке враховує особливості структури артеріальної системи лівого і правого ока, є актуальним, оскільки за результатами дослідження процесу кровообігу в очній артерії можна провести детальний аналіз руху в ній крові, що дозволяє визначити ступінь ураження артеріальною гіпертонією, яка на наш час є однією з найпоширеніших хвороб системи кровообігу людини.

**Ключові слова:** артерія, система кровообігу, артеріальна гіпертонія, пульсова хвиля.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРОВООБРАЩЕНИЯ ГЛАЗНОЙ АРТЕРИИ****С. И. Владов, В. А. Мосьпан, А. А. Юрко, Е. В. Мирошниченко, И. В. Скапа**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

Исследован процесс прохождения пульсовой волны через глазную артерию, позволяющий провести детальный анализ кровообращения глаз и определять степень поражения артериальной гипертонией. Данное исследование базируется на произведении спектра входного сигнала пульсовой волны и передаточной функции модели кровеносного сосуда в виде неоднородной длинной линии и восстановлении выходного сигнала пульсовой волны во временной области, который и определяет степень поражения артериальной гипертонией. Проведенное исследование учитывает особенности структуры артериальной системы левого и правого глаза. Проведенное исследование является актуальным, поскольку за результатами исследования процесса кровообращения в глазной артерии можно провести детальный анализ движения в ней крови, что позволяет определить степень поражения артериальной гипертонией, которая в наше время является одной из самых распространенных болезней системы кровообращения человека.

**Ключевые слова:** артерия, система кровообращения, артериальная гипертония, пульсовая волна.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Одним із найбільш значущих в діагностиці артеріальної гіпертонії (АГ) та визначенні стадії захворювання є офтальмологічне дослідження. Повторні огляди очного дна необхідні для оцінки динаміки процесу і ефективності лікування. Очні симптоми нерідко передують іншим проявам основного судинного захворювання і навіть підвищення артеріального тиску. При АГ найбільш ранні прояви патології судин очного дна полягають у функціональному тонічній скорочення артеріол сітківки і схильності їх до спастичних реакцій. Про погіршення перебігу АГ свідчить збільшення площі сліпої плями. Офтальмологічні дослідження дозволяють судити про стан гемодинаміки в очній артерії. У більшості хворих на АГ реєструється підвищення систолічного, діастолічного і особливо середнього тиску [1], яке можна визначити шляхом дослідження процесу проходження пульсової хвилі через очну артерію.

Тому метою роботи є дослідження процесу кровообігу в очній артерії, за результатами якого можна провести детальний аналіз руху в ній крові, що дозволяє визначити ступінь ураження АГ.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Магістраллю, що постачає кров до очей, є очна артерія – гілка внутрішньої сонної артерії. Оскільки відомо, що у більшості хворих при АГ спостерігається підвищення значення кров'яного тиску в очній

артерії, то дослідження зводяться до обчислення значення систолічного, діастолічного та пульсового тиску в очній артерії.

Оскільки очна артерія бере свій початок від внутрішньої сонної артерії, яка є частиною загальної сонної артерії (її початок в аорті), то для обчислення значення кров'яного тиску після проходження сигналу пульсової хвилі очної артерії застосовується наступна модель, яку показано на рис. 1, що складена на основі представлення тієї чи іншої судини у вигляді довгої лінії [2].



Рисунок 1 – Схема моделювання сонної і очної артерій у вигляді довгої лінії

На рис. 1 позначено:  $Z_1(\omega)$  – погонний опір моделі ділянки аорти;  $Z_2(\omega)$  – погонний опір моделі загальної сонної артерії;  $Z_3(\omega)$  – погонний опір моделі внутрішньої сонної артерії;  $Z_4(\omega)$  – погонний опір моделі очної артерії.

Передавальні функції моделей аорти  $H_{1A}(j\omega)$ , загальної сонної  $H_{2A}(j\omega)$ , внутрішньої сонної  $H_{3A}(j\omega)$  і очної  $H_{4A}(j\omega)$  артерій у вигляді довгих ліній описуються наступними виразами [2]:

$$\underline{H}_{1A}(j\omega) = \frac{3}{4} \cdot H_{1A} \cdot e^{-l_1 \cdot \sqrt{(R_{01} + j\omega L_{01}) \cdot j\omega C_{01}}}, \quad (1)$$

$$\underline{H}_{2A}(j\omega) = H_{2A} \cdot e^{-l_2 \cdot \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}}, \quad (2)$$

$$\underline{H}_{3A}(j\omega) = H_{3A} \cdot e^{-l_3 \cdot \sqrt{(R_{03} + j\omega L_{03}) \cdot j\omega C_{03}}}, \quad (3)$$

$$\underline{H}_{4A}(j\omega) = H_{4A} \cdot e^{-l_4 \cdot \sqrt{(R_{04} + j\omega L_{04}) \cdot j\omega C_{04}}}, \quad (4)$$

де  $H_{iA}$  – модулі коефіцієнтів передачі.

Еквівалентні  $R_{0i}$ ,  $L_{0i}$ ,  $C_{0i}$  – параметри визначаються за формулами [2, 3]

$$R_{0i} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \eta}{S_i^2}, \quad C_{0i} = \frac{2 \cdot r_i \cdot S_i}{E_i \cdot h_i}, \quad L_{0i} = \frac{\rho}{S_i},$$

де  $\eta$  – в'язкість крові,  $\rho$  – густина крові,  $r_i$  – радіус поперечного перерізу судини,  $S_i$  – площа поперечного перерізу судини,  $E_i$  – ефективний модуль пружності стінки кровоносних судин, який характеризується тензором пружності  $C$  і визначається за формулою [4–7]:

$$C = \frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon^2} = \frac{\partial^2 F(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} \cdot \left( \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} \right)^2, \quad (5)$$

де  $F$  – енергія пружної деформації, яка є квадратичною формою тензора деформації [4, 5],  $u$  – вектор, що описує зсув точки стінки судини, який визначено за схемою циліндричної оболонки кровоносної судини при симетричному навантаженні [6, 7].

Вхідним сигналом для обчислення значень кров'яного тиску після проходження сигналу пульсової хвилі очної артерії є сигнал пульсової хвилі після проходження ділянки аорти і сонної артерії. У частотній області даний сигнал описується наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BX}(\omega) &= \underline{U}_1(\omega) \cdot \underline{H}_{1A}(\omega) \cdot \underline{H}_{2A}(\omega) \cdot \underline{H}_{3A}(\omega) = \\ &= \frac{3}{4} \cdot e^{-l_1 \cdot \sqrt{(R_{01} + j\omega L_{01}) \cdot j\omega C_{01}}} \cdot e^{-l_2 \cdot \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}} \times \\ &\quad \times \int_0^T A_C \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt; \end{aligned} \quad (6)$$

де  $A_C$  – амплітуда кров'яного тиску у лівому шлуночку серця, яка становить 140 мм рт. ст. [8, 9],

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_{ЧСС},$$

де  $f_{ЧСС}$  – частота серцевих скорочень [8, 9].

Для дослідження процесу проходження пульсової хвилі через очну артерію у частотній області застосовуємо наступне співвідношення:

$$\underline{U}_{ВІХ}(\omega) = \underline{U}_{BX}(\omega) \cdot \underline{H}_{3A}(\omega) = \underline{U}_1(\omega) \cdot \underline{H}_{1A}(\omega) \times$$

$$\begin{aligned} &\times \underline{H}_{2A}(\omega) \cdot \underline{H}_{3A}(\omega) \cdot \underline{H}_{4A}(\omega) = \frac{3}{4} \cdot e^{-l_1 \cdot \sqrt{(R_{01} + j\omega L_{01}) \cdot j\omega C_{01}}} \times \\ &\times e^{-l_2 \cdot \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}} \cdot e^{-l_3 \cdot \sqrt{(R_{03} + j\omega L_{03}) \cdot j\omega C_{03}}} \cdot e^{-l_4 \cdot \sqrt{(R_{04} + j\omega L_{04}) \cdot j\omega C_{04}}} \times \\ &\quad \times \int_0^T A_C \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Відновлення вихідного сигналу пульсової хвилі після проходження очної артерії в часовій області відбувається згідно з виразом:

$$\begin{aligned} U_{ВІХ}(t) &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{3}{4} \cdot e^{-l_1 \cdot \sqrt{(R_{01} + j\omega L_{01}) \cdot j\omega C_{01}}} \times \right. \\ &\times e^{-l_2 \cdot \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}} \cdot e^{-l_3 \cdot \sqrt{(R_{03} + j\omega L_{03}) \cdot j\omega C_{03}}} \cdot e^{-l_4 \cdot \sqrt{(R_{04} + j\omega L_{04}) \cdot j\omega C_{04}}} \times \\ &\quad \left. \times \left( \int_0^T A_C \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right) \right) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \end{aligned} \quad (8)$$

Для діагностування церебральних форм АГ застосовується ретінобрахіальний індекс за Байаром. За норму приймають таке співвідношення, при якому тиск в очній артерії приблизно у 2 рази нижчий, ніж у плечовій (120 мм рт. ст.). У нормі при вертикальному положенні тулуба значення артеріального тиску в очній артерії становить 60...70 мм рт. ст., і за норматив ретінобрахіального індексу приймаються цифри 0,6...0,7.

Таким чином, ретінобрахіальний індекс за Байаром необхідно враховувати у кінцевій формулі визначення значення кров'яного тиску в очній артерії.

Таким чином, з урахуванням ретінобрахіального індексу за Байаром, вираз (8) має вигляд:

$$\begin{aligned} U_{ВІХ}(t) &= \frac{0,6...0,7}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{3}{4} \cdot e^{-l_1 \cdot \sqrt{(R_{01} + j\omega L_{01}) \cdot j\omega C_{01}}} \times \right. \\ &\times e^{-l_2 \cdot \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}} \cdot e^{-l_3 \cdot \sqrt{(R_{03} + j\omega L_{03}) \cdot j\omega C_{03}}} \times \\ &\quad \times e^{-l_4 \cdot \sqrt{(R_{04} + j\omega L_{04}) \cdot j\omega C_{04}}} \times \\ &\quad \left. \times \left( \int_0^T A_C \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right) \right) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \end{aligned} \quad (9)$$

Отримана математична модель (9) дозволяє визначити стан пульсової хвилі після проходження очної артерії. Але наведену модель можна лише використовувати для лівого ока, оскільки узагальнену схему судин, що наведена на рис. 1, можна використовувати для лівої частини головного мозку, оскільки при дослідженні процесу руху пульсової хвилі після проходження очної артерії у правому оці необхідно врахувати те, що права загальна сонна артерія бере свій початок після безіменної артерії (плечоголовний стовбур), а ліва загальна сонна артерія – безпосередньо у дузі аорти (що відобразилося при побудові даної моделі). Тоді кінцева формула визначення вихідного сигналу пульсової хвилі в часовій області правого ока набуває виду:

$$U_{ВІХ}(t) = \frac{0,6...0,7}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{3}{4} \cdot e^{-l_1 \cdot \sqrt{(R_{01} + j\omega L_{01}) \cdot j\omega C_{01}}} \times$$

$$\begin{aligned} & \times e^{-l_2 \cdot \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}} \cdot e^{-l_3 \cdot \sqrt{(R_{03} + j\omega L_{03}) \cdot j\omega C_{03}}} \times \\ & \times e^{-l_4 \cdot \sqrt{(R_{04} + j\omega L_{04}) \cdot j\omega C_{04}}} \cdot e^{-l_5 \cdot \sqrt{(R_{05} + j\omega L_{05}) \cdot j\omega C_{05}}} \times \\ & \times \left( \int_0^T A_c \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (10) \end{aligned}$$

де  $\underline{H}_{5,4}(j\omega) = H_{5,4} \cdot e^{-l_5 \cdot \sqrt{(R_{05} + j\omega L_{05}) \cdot j\omega C_{05}}}$  – передавальна функція моделі безіменної артерії, представленої у вигляді довгої лінії.

Примітка: оскільки при нормальному кровообігу тиск у лівому та правому оці однаковий, то при використанні виразів (9) і (10) необхідно застосувати різне значення ретінобрахіального індексу, але у допустимих межах 0,6...0,7.

Розглянемо процес проходження пульсової хвилі через очну артерію при нормальному кровотоку і при симптомах АГ, які, в першу чергу, відобража-

ють реологічні властивості крові, а саме, підвищену в'язкість, і підвищений тонус судини, що відображається у збільшенні модуля Юнга стінок судин.

Приймаємо, що при нормальному кровотоку в'язкість крові становить  $\eta = 4,5 \cdot 10^{-3}$  кг/м·с, а при симптомах АГ –  $\eta = 6,5 \cdot 10^{-3}$  кг/м·с. Густина крові і частота серцевих скорочень при цьому не змінюються і є постійними величинами і складають відповідно  $\rho = 1,062 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> і  $f_{CC} = 1$  Гц.

У таблицях 1 і 2 наведено результати обчислень основних еквівалентних параметрів ділянок довгих ліній, у вигляді яких представлені моделі аорти, сонних і очної артерій при нормальному кровотоку і при симптомах АГ відповідно. За формулами (9) і (10) визначаємо розподіл значень кров'яного тиску  $U_{2l}(t)$  і  $U_{2r}(t)$  при проходженні пульсової хвилі очної артерії лівого і правого ока відповідно.

Таблиця 1 – Результати обчислень основних еквівалентних параметрів ділянок довгих ліній (для лівого ока) [2, 3, 10]

Параметр	Кровоток у нормі			
	Ділянка аорти	Ліва загальна сонна артерія	Ліва внутрішня сонна артерія	Очна артерія
$d_B$ , м	$11,3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$d_H$ , м	$15,3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
$r$ , м	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$
$S$ , м <sup>2</sup>	$1,003 \cdot 10^{-4}$	$1,257 \cdot 10^{-5}$	$3,142 \cdot 10^{-6}$	$1,136 \cdot 10^{-6}$
$h$ , м	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$l$ , м	$8 \cdot 10^{-2}$	$11 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$C$ , Па	$7,348 \cdot 10^4$	$1,201 \cdot 10^5$	$3,335 \cdot 10^4$	$3,154 \cdot 10^4$
$R_0$ , кг/м <sup>5</sup> ·с	$1,127 \cdot 10^7$	$7,162 \cdot 10^8$	$1,146 \cdot 10^{10}$	$8,842 \cdot 10^{10}$
$L_0$ , кг/м <sup>5</sup>	$1,057 \cdot 10^7$	$8,435 \cdot 10^7$	$3,374 \cdot 10^8$	$9,372 \cdot 10^8$
$C_0$ , с <sup>2</sup> /кг·м	$7,711 \cdot 10^{-9}$	$4,187 \cdot 10^{-10}$	$1,884 \cdot 10^{-9}$	$1,23 \cdot 10^{-10}$
Параметр	При симптомах артеріальної гіпертонії			
	Ділянка аорти	Ліва загальна сонна артерія	Ліва внутрішня сонна артерія	Очна артерія
$d_B$ , м	$11,3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$d_H$ , м	$15,3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
$r$ , м	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$
$S$ , м <sup>2</sup>	$1,003 \cdot 10^{-4}$	$1,257 \cdot 10^{-5}$	$3,142 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$
$h$ , м	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$l$ , м	$8 \cdot 10^{-2}$	$11 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$C$ , Па	$5,508 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$9,456 \cdot 10^4$
$R_0$ , кг/м <sup>5</sup> ·с	$1,624 \cdot 10^7$	$1,035 \cdot 10^9$	$1,655 \cdot 10^{10}$	$1,277 \cdot 10^{11}$
$L_0$ , кг/м <sup>5</sup>	$1,057 \cdot 10^7$	$8,435 \cdot 10^7$	$3,374 \cdot 10^8$	$9,372 \cdot 10^8$
$C_0$ , с <sup>2</sup> /кг·м	$1,029 \cdot 10^{-8}$	$1,396 \cdot 10^{-10}$	$3,283 \cdot 10^{-9}$	$4,411 \cdot 10^{-11}$

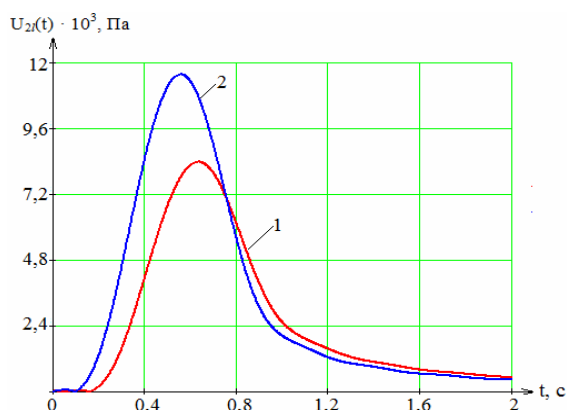


Рисунок 2 – Вид пульсової хвилі, що пройшла через ліву очну артерію: 1 – при нормальному кровообігу; 2 – при симптомах АГ

Як видно з рис. 2, при нормальному кровотоку систолічний тиск у лівій очній артерії становить приблизно 8400 Па (63 мм рт. ст.) [1, 11, 12], що відповідає нормальному тиску в очній артерії, що підтверджує адекватність розробленої моделі, а при симптомах артеріальної гіпертонії спостерігається різке підвищення систолічного тиску і деяке спотворення форми пульсової хвилі.

Проведемо аналогічні дослідження процесу проходження пульсової хвилі через очну артерію правого ока.

Таблиця 2 – Результати обчислень основних еквівалентних параметрів ділянок довгих ліній (для правого ока) [2, 3, 10]

Параметр	Кровоток у нормі				
	Ділянка аорти	Безіменна артерія	Права загальна сонна артерія	Права внутрішня сонна артерія	Очна артерія
$d_B$ , м	$11,3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$d_H$ , м	$15,3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
$r$ , м	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$
$S$ , м <sup>2</sup>	$1,003 \cdot 10^{-4}$	$7,069 \cdot 10^{-6}$	$1,257 \cdot 10^{-5}$	$3,142 \cdot 10^{-6}$	$1,136 \cdot 10^{-6}$
$h$ , м	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$l$ , м	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$C$ , Па	$7,348 \cdot 10^4$	$8,489 \cdot 10^4$	$1,201 \cdot 10^5$	$3,335 \cdot 10^4$	$3,154 \cdot 10^4$
$R_0$ , кг/м <sup>5</sup> ·с	$1,127 \cdot 10^7$	$2,264 \cdot 10^9$	$7,162 \cdot 10^8$	$1,146 \cdot 10^{10}$	$8,842 \cdot 10^{10}$
$L_0$ , кг/м <sup>5</sup>	$1,057 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$8,435 \cdot 10^7$	$3,374 \cdot 10^8$	$9,372 \cdot 10^8$
$C_0$ , с <sup>2</sup> /кг·м	$7,711 \cdot 10^{-9}$	$1,249 \cdot 10^{-9}$	$4,187 \cdot 10^{-10}$	$1,884 \cdot 10^{-9}$	$1,23 \cdot 10^{-10}$
Параметр	При симптомах артеріальної гіпертонії				
	Ділянка аорти	Безіменна артерія	Права загальна сонна артерія	Права внутрішня сонна артерія	Очна артерія
$d_B$ , м	$11,3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$d_H$ , м	$15,3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
$r$ , м	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$
$S$ , м <sup>2</sup>	$1,003 \cdot 10^{-4}$	$7,069 \cdot 10^{-6}$	$1,257 \cdot 10^{-5}$	$3,142 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$
$h$ , м	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$l$ , м	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$C$ , Па	$5,508 \cdot 10^4$	$2,545 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$4,728 \cdot 10^4$
$R_0$ , кг/м <sup>5</sup> ·с	$1,624 \cdot 10^7$	$3,27 \cdot 10^9$	$1,035 \cdot 10^9$	$1,655 \cdot 10^{10}$	$1,277 \cdot 10^{11}$
$L_0$ , кг/м <sup>5</sup>	$1,057 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	$8,435 \cdot 10^7$	$3,374 \cdot 10^8$	$9,372 \cdot 10^8$
$C_0$ , с <sup>2</sup> /кг·м	$1,029 \cdot 10^{-8}$	$4,165 \cdot 10^{-10}$	$1,396 \cdot 10^{-10}$	$3,283 \cdot 10^{-9}$	$4,411 \cdot 10^{-11}$

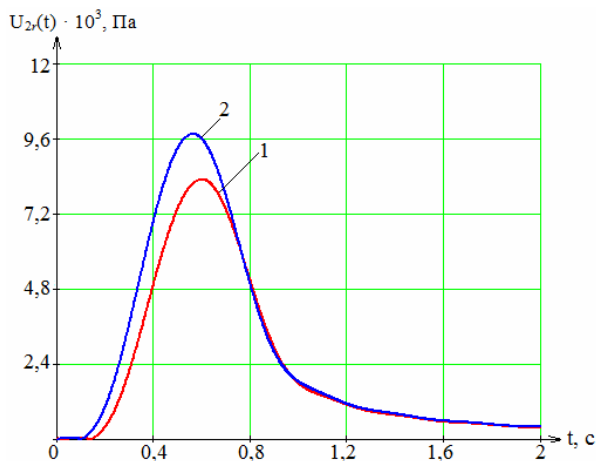


Рисунок 3 – Вид пульсової хвилі, що пройшла через праву очну артерію: 1 – при нормальному кровообігу; 2 – при симптомах АГ

Як видно з рис. 3, при нормальному кровотоку систолічний тиск у правій очній артерії становить приблизно 8400 Па (63 мм рт. ст.) [1, 11, 12], що відповідає нормальному тиску в очній артерії. Це підтверджує адекватність розробленої моделі, а при симптомах артеріальної гіпертонії спостерігається різке підвищення систолічного тиску і зміну форми пульсової хвилі.

На рис. 4 зображено вид пульсової хвилі після проходження очної артерії лівого і правого ока відповідно при нормальному кровотоку задля порівняння значень максимального кров'яного тиску та форм пульсової хвилі, що надасть змогу оцінити адекватність побудованої моделі, оскільки значення кров'яного тиску у лівій та правій очних артеріях однакове при нормальному кровообігу [1, 11, 12].

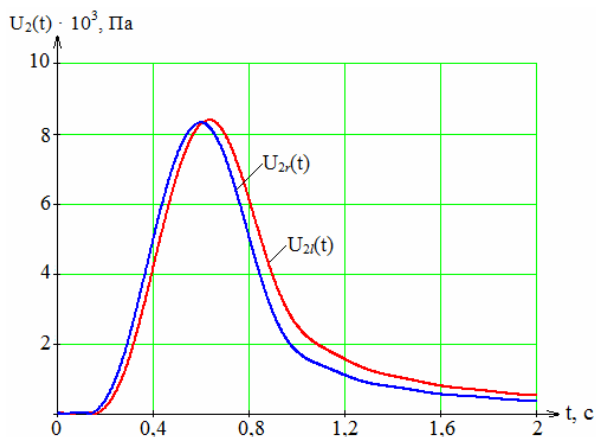


Рисунок 4 – Вид пульсової хвилі, що пройшла через ліву  $U_{2l}(t)$  та праву  $U_{2r}(t)$  очні артерії при нормальному кровообігу

Отже, оскільки при нормальному кровотоку як у лівій, так і у правій очних артеріях значення кров'яного тиску та форма пульсової хвилі однакові (рис. 4), що відповідає [1, 11, 12], то можна зробити висновок, що побудована модель дослідження

кровообігу в очних артеріях є раціональною для діагностування ступеню ураження АГ.

**ВИСНОВКИ.** Таким чином, чисельно досліджено процес проходження сигналу пульсової хвилі через очну артерію лівого та правого ока, результати якого дозволяють провести детальний аналіз кровообігу очей та визначити ступінь ураження АГ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бунин А.Я., Канцельсон Л.А., Яковлев А.А. Микроциркуляция глаза. – М.: Медицина, 1984. – 176 с.
2. Владов С.І., Мосьпан В.О. Модель системи кровообігу людини у вигляді неоднорідної узгодженої довгої лінії з розподіленими параметрами // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (73). – С. 41–45.
3. Биофизика / Владимиров Ю.А., Рошупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.И. – М.: Медицина, 1983. – С. 225–236.
4. S. Vladov, V. Mospan, O. Yurko. Design of the deformed state of blood vessels // Nauka i studia. – Przemysl: Sp. z o. o. "Nauka i studia", 2013. – NR 7(75), 2013. – PP. 72–77.
5. Лурье А.И. Теория упругости. – М: Наука, 1970. – С. 57–60.
6. Владов С.І., Мосьпан В.О., Юрко О.О. Визначення вектора радикального переміщення за схемою циліндричної оболонки кровеносної судини при симетричному навантаженні // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції "Наукова індустрія європейського континенту – 2012", Прага, 27 листопада–05 грудня 2012 р. – Прага: Publishing House "Education and Science" s.r.o., 2012. – Т. 20. – С. 22–29.
7. Бегун П.И., Афонин П.Н. Моделирование в биомеханике. – М.: Высшая школа, 2004. – 391 с.
8. Владов С.І., Мосьпан В.О., Юрко О.О. Побудова моделі сигналу пульсової хвилі як вхідного сигналу моделі системи кровообігу людини у вигляді узгодженої довгої лінії // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції "Ключові аспекти наукової діяльності – 2012", Пшемисль, 7–15 січня 2012 р. – Пшемисль: Sp. z o.o. "Nauka i studia", 2012. – Том 14. – С. 65–69.
9. Есаков С.А. Возрастная анатомия и физиология: Курс лекций. – Ижевск: ГОУВПО "УдГУ", 2010. – 194 с.
10. Кузнецов С.Л. Мушкамбаров Н.Н., Горячкина В.Л. Руководство-атлас по гистологии, цитологии и эмбриологии – М: Медицинское информационное агентство, 2002. – С. 152–161.
11. Львовский В.М. Исследование реакции кровеносных сосудов на изменение кровяного давления // Сборник "Второе дыхание". – Бостон: MCRSS, 2006. – Вып. 11–12.
12. Покровский В.М., Коротько М.В. Физиология человека. – М.: Медицина, 1997. – 156 с.

## RESEARCH OF BLOOD CIRCULATION IN THE OPHTHALMIC ARTERY

S. Vladov, V. Mospan, A. Yurko, E. Mirosnichenko, I. Skapa

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

The authors have studied the process of passing of a pulse wave through the ophthalmic artery, which makes it possible to analyze in details the eye blood circulation and determine the degree of damage by arterial hypertension. This research is based on the reproduction of the spectrum of a pulse wave input signal and transmission function of the blood vessel model, which is considered as a heterogeneous long line, and restoration of a pulse wave output signal in time domain, that is to determine the degree of damage by arterial hypertension. The conducted research took into account the structural features of the arterial system of the left and right eyes. This study is of vital importance, as the results of the research of blood circulation in the ophthalmic artery allow for detailed analysis of blood circulation in the ophthalmic artery, that allows defining the degree of damage by arterial hypertension, which is, nowadays, one of the most widespread diseases of the human blood circulation system.

**Key words:** artery, blood circulation system, arterial hypertension, pulse wave.

## REFERENCES

1. Bunin A.Ya., Kantselson L.A. and Yakovlev A.A. (1984), *Microsirculyatsiya glaza* [Microcirculation of the eye], Medicine, Moscow, Russia.
2. Vladov S.I., Mospan V.O. (2012), "Model of the system circulation of blood of human as heterogeneous concerted-noah to long line with the up-diffused parameters", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 2, no. 73, pp. 41–45.
3. Vladimirov Y.A., Roschupkin D.I., Potapenko A.Y. and Deev A.I. (1983), *Biofizika* [Biophysics], Medicine, Moscow, Russia.
4. S. Vladov, V. Mospan and O. Yurko (2013) "Design of the deformed state of blood vessels", *Nauka i studia*, Vol. 75, pp. 72–77.
5. Lur'e A.I. (1970), *Teoriya Uprugosti* [Theory of elasticity], Science, Moscow, Russia.
6. Vladov S.I., Mospan V.O. and Yurko O.O. (2012), "Determination of the radical movement vector scheme cylindrical shell with symmetric blood vessel loading", *Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-practichnoi konferentsii "Naukova industriya evropeiskogo kontinentu – 2012"* [Proceedings of the 8<sup>th</sup> International scientifically to the practical conference "Scientific industry European continent – 2012"], Praga, Publishing House "Education and Science" s.r.o., November 27 – December 5, 2012, pp. 22–29.
7. Begun P.I. and Afonin P.N. (2004), *Modelirovanie v biomehanike* [A design is in biomechanics], High School, Moscow, Russia.
8. Vladov S.I., Mospan V.O. and Yurko O.O. (2012), "Construction of model of signal of pulse wave as an entrance signal of model of the human blood circulation system as an adjusted long line", *Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-practichnoi konferentsii "Kluchovi aspekty naukovoi diyalnosti – 2012"* [Proceedings of the 8th International scientifically to the practical conference "Key aspects of scientific activity – 2012"], Przemysl, Sp. z o.o. "Nauka i studia", January, 7–15, 2012, pp. 65–69.
9. Esakov S.A. (2010), *Vozrastnaya anatomiya i fiziologiya: Kurs lektsiy* [Age-related anatomy and physiology: course of lectures], GOUVPO "UdGU", Biological-chemical faculty, Department of anatomy and physiology of human and animals, Ishevsk, Russia.
10. Kuznetsov S.L., Mushkambarov N.N. and Goryachkina V.L. (2002), *Rukovodstvo-atlas po gistologii, tsytologii i tmbrilogii* [Guidance-atlas on histology, cytology and embryology], Medical news agency, Moscow, Russia.
11. Lvovskiy B.M. (2006), "Research of reaction of blood vessels on the blood pressure", *Sbornik "Vtoroe dyhanie"*, vol. 11–12.
12. Pokrovskiy V.M. and Korotko M.V. (1997), *Fiziologiya Cheloveka* [Human physiology], Medicine, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 20.09.2013.