

УДК 532.616.1:002.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОХОДЖЕННЯ ПУЛЬСОВОЇ ХВИЛІ ЧЕРЕЗ КРОВОНОСНУ СУДИНУ, УРАЖЕНУ ТРОМБОМ

С. І. Владов, В. О. Моспан, О. О. Юрко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

М. М. Литвиненко

Кременчуцький обласний госпіталь для інвалідів війни
вул. Жовтнева, 23/1, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: info@kremenichuk-oh.pl.ua

Досліджено процес проходження пульсової хвилі через кровеносну судину, поранену тромбом, результати якого дозволяють оцінити ступінь відхилення функціонального стану системи кровообігу людини від нормального. Дане дослідження базується на добутку спектру вхідного сигналу пульсової хвилі та передавальної функції моделі кровеносної судини у вигляді неоднорідної довгої лінії. Проаналізувавши спектр вихідного сигналу та розподіл сигналу в часовій області, можна встановити вплив тромбу на еластичні властивості судини, форму пульсової хвилі та значення кров'яного тиску.

Ключові слова: модель системи кровообігу людини, тромб, пульсова хвиля, кровеносна судина.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ КРОВОНОСНЫЙ СОСУД, ПОРАЖЕННЫЙ ТРОМБОМ

С. И. Владов, В. А. Моспан, А. А. Юрко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kafea@kdu.edu.ua

Н. Н. Литвиненко

Кременчугский областной госпиталь для инвалидов войны
ул. Октябрьская, 23/1, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: info@kremenichuk-oh.pl.ua

Исследовано процесс прохождения пульсовой волны через кровеносный сосуд, пораженный тромбом, результаты которого позволяют оценить степень отклонения функционального состояния системы кровообращения человека от нормального. Данное исследование базируется на произведении спектра входного сигнала пульсовой волны и передаточной функции модели кровеносного сосуда в виде неоднородной длинной линии. Проанализировав спектр выходного сигнала и распределение сигнала во временной области, можно установить влияние тромба на эластичные свойства сосуда, форму пульсовой волны и значения кровяного давления.

Ключевые слова: модель системы кровообращения человека, тромб, пульсовая волна, кровеносный сосуд.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Тромб – патологічний прижиттєвий згусток крові в просвіті кровеносної судини. За певних умов тромб може зростати та знаходитись у просвіті судини. У цьому випадку можливий варіант відриву тромбу або його шматочку, який струмом крові може бути занесений у судини, що забезпечують життєво важливі органи та може призвести до смертельного наслідку через блокування кровотоку. У першу чергу, боротьба безпосередньо із тромбом пов'язана, насамперед, з визначенням місця положення самого тромбу [1]. Одні відомі клінічні методи знаходження тромбів не завжди можуть точно виявити місце положення тромбу, інші – дорогі та не завжди доступні. Найголовніший фактор для своєчасності видалення тромбу – це фактор часу. Тому при можливості виявлення місця тромбу без залучення спеціального обладнання стає можливим своєчасне його видалення, після чого поновлення кровотоку у життєво важливих судинах є найголовнішим для спасіння органу, системи органів чи, взагалі, організму. Якщо при повній obturacii судини діагноз можна встановити за клінічними проявами, то при частковому перекритті судини тромбом діагностика ускладнена. Тому математичний підхід до діагностики дає можливість своєчасного надання допомоги, а, часом, і порятунку життя людини.

Метою роботи є визначення місця знаходження, а також впливу тромбу на функціонування системи кровообігу людини шляхом дослідження спектру вихідного сигналу пульсової хвилі, який пройшов через судину, поранену тромбом, за допомогою моделі кровообігу людини у вигляді узгодженої довгої лінії [2] на прикладі тромбу у стегновій артерії.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Оскільки модель кровеносної судини представлено у вигляді довгої лінії [2], доцільно навести модель кровеносної судини, що містить тромб, у вигляді неоднорідної довгої лінії з наступними погонними параметрами: на ділянках до і після тромбу – R_0 , L_0 , C_0 , які розраховуються відповідно [3]; на ділянці, що містить тромб – R_{0T} , L_{0T} , C_{0T} , які розраховуються за формулами:

$$R_{0T} = \frac{8 \cdot p \cdot h}{S_T^2}; \quad (1)$$

$$L_{0T} = \frac{r}{S_T}; \quad (2)$$

$$S_T = S - \frac{x_T \cdot S}{100\%}; \quad (3)$$

$$C_{0T} = \frac{2 \cdot r_T \cdot S_T}{E_T \cdot h} = \frac{2}{\sqrt{p}} \cdot \frac{\sqrt{S_T^3}}{E_T \cdot h}; \quad (4)$$

де S_T – площа поперечного перерізу ділянки судини, що містить тромб; x_T – площа (виражена у відсотках), яку займає тромб стосовно площі поперечного перерізу судини; E_T – модуль пружності стінки судини на ділянці із тромбом.

Для дослідження зміни кров'яного тиску при утворенні тромбу в судині за результатами клінічного дослідження було обрано наступні дані: у результаті обстеження у пацієнта виявлено тромб із параметрами 7×4 мм у стегновій артерії з параметрами: $d_B = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м – внутрішній діаметр судини; $d_H = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м – зовнішній діаметр судини; $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м – товщина стінки судини; $r = 5,65 \cdot 10^{-3}$ м – внутрішній радіус судини; $S = 1,767 \cdot 10^{-6}$ м² – площа просвіту судини; $l = 0,45$ м – довжина стегнової артерії; частота серцевих скорочень $f_{ЧСС} = 0,6$ Гц і систолічний тиск 130 мм. рт. ст. [4]. Тромб знаходиться приблизно посередині судини і зменшує площу просвіту на 60 % та еластичність судини у 6,67 разів (рис. 1).

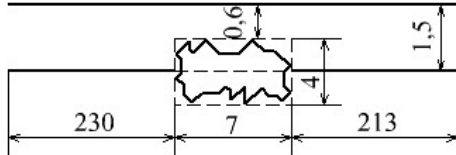


Рисунок 1 – Схема кровеносної судини, ураженої тромбом

Як було наведено у [2], модель ділянки системи кровообігу людини у вигляді узгодженої довгої лінії з втратами характеризується передавальною функцією, яка для стегнової артерії має вигляд:

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

де H_{2A} – модуль коефіцієнта передачі.

Приймаємо, що при нормальному функціонуванні системи кровообігу людини $H_{2A} = 1$.

Розраховуємо еквівалентні R_0 , L_0 , C_0 – параметри для стегнової артерії згідно з [2]:

$$R_0 = \frac{8 \cdot p \cdot h}{S^2} = \frac{8 \cdot p \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{(1,767 \cdot 10^{-6})^2} = 3,622 \cdot 10^{10} \left(\frac{\text{кз}}{\text{м}^5 \cdot \text{с}} \right);$$

$$L_0 = \frac{r}{S} = \frac{1,062 \cdot 10^3}{1,767 \cdot 10^{-6}} = 5,998 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{кз}}{\text{м}^5} \right);$$

$$C_0 = \frac{2 \cdot r \cdot S}{E \cdot h} = \frac{2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,767 \cdot 10^{-6}}{1,407 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 3,768 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{с}^2}{\text{кз} \cdot \text{м}} \right);$$

$$E = K_D \cdot \frac{2 \cdot d_H \cdot d_B^2 \cdot (1 - s^2)}{d_H^2 - d_B^2} = 1,667 \cdot 10^5 \times$$

$$\times \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1 - 0,5^2)}{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 - (1,5 \cdot 10^{-3})^2} = 1,407 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right)$$

Розраховуємо еквівалентні R_{0T} , L_{0T} , C_{0T} – параметри для ділянки стегнової артерії, що містить тромб, згідно з (1)–(4):

$$S_T = S \cdot \frac{x \cdot S}{100\%} = 1,767 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{60\% \cdot 1,767 \cdot 10^{-6}}{100\%} = 7,069 \cdot 10^{-7} (\text{м}^2);$$

$$R_{0T} = \frac{8 \cdot p \cdot h}{S_T^2} = \frac{8 \cdot p \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{(7,069 \cdot 10^{-7})^2} = 2,264 \cdot 10^{11} \left(\frac{\text{кз}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right);$$

$$L_{0T} = \frac{r}{S_T} = \frac{1,062 \cdot 10^3}{7,069 \cdot 10^{-7}} = 1,5 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{кз}}{\text{м}^5} \right);$$

$$E = K_D \cdot \frac{2 \cdot d_H \cdot d_B^2 \cdot (1 - s^2)}{d_H^2 - d_B^2} = 1,112 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (1 - 0,5^2)}{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 - (1,5 \cdot 10^{-3})^2} = 2,345 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right)$$

$$C_{0T} = \frac{2}{\sqrt{p}} \cdot \frac{\sqrt{S_T}}{E_T \cdot h} = \frac{2}{\sqrt{p}} \cdot \frac{\sqrt{(7,069 \cdot 10^{-7})^2}}{2,345 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 5,719 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\text{с}^2}{\text{кз} \cdot \text{м}} \right).$$

Примітка: при визначенні ефективного модуля Юнга стінки ділянки судини, що містить тромб, було застосовано дані про зниження еластичності судини у 6,67 разів, отримані експериментальним шляхом у лабораторних умовах, що відобразилося у збільшенні коефіцієнта K_A (коефіцієнт, що відображає тонус судин [5]) у 6,67 разів.

За наявності тромбу в судині передавальна функція моделі кровеносної судини є добутком передавальних функцій ділянок судини до тромбу, із тромбом і після тромбу:

$$\underline{H}_{2A}(j\omega) = \underline{H}_{21}(j\omega) \cdot \underline{H}_{2T}(j\omega) \cdot \underline{H}_{23}(j\omega); \quad (5)$$

$$\underline{H}_{21}(j\omega) = H_{2A} \cdot e^{-l_{21} \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}}; \quad (6)$$

$$\underline{H}_{2T}(j\omega) = H_{2A} \cdot e^{-l_{2T} \sqrt{(R_{0T} + j\omega L_{0T}) \cdot j\omega C_{0T}}}; \quad (7)$$

$$\underline{H}_{23}(j\omega) = H_{2A} \cdot e^{-l_{23} \sqrt{(R_{02} + j\omega L_{02}) \cdot j\omega C_{02}}}; \quad (8)$$

де $l_{21} = 230$ мм – довжина ділянки судини до тромбу, $l_{2T} = 7$ мм – довжина ділянки судини із тромбом $l_{23} = 213$ мм – довжина ділянки судини після тромбу.

Частотні характеристики стегнової артерії, розраховані за (5)–(8) зображено на рис. 2 (а) і 2 (б), де а – АЧХ та ФЧХ здорової судини, б – АЧХ та ФЧХ ділянки судини до тромбу, в – АЧХ та ФЧХ ділянки судини із тромбом, г – АЧХ і ФЧХ ділянки судини після тромбу.

Примітка: при визначенні частотних характеристик стегнової артерії при нормальному кровотоку погонні параметри моделі довгої лінії R_{0T} , L_{0T} , C_{0T} ділянки, що містить тромб, замінюються на погонні параметри моделі лінії R_0 , L_0 , C_0 ділянки, що має нормальний стан, внаслідок відсутності тромбу.

Вихідним сигналом є сигнал пульсової хвилі після проходження аорти [2, 6], тобто:

$$\underline{U}_{BX}(w) = \underline{U}_I(w) \cdot \underline{H}_{IA}(w) = \frac{3}{4} \cdot e^{-l_I \sqrt{(R_{0I} + j\omega L_{0I}) \cdot j\omega C_{0I}}} \times \int_0^T A_C \cdot \sin^2(w_I \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (9)$$

Для дослідження процесу проходження пульсової хвилі через стегнову артерію в частотній області скористаємося співвідношенням:

$$\underline{U}_2(w) = \underline{U}_I(w) \cdot \underline{H}_{IA}(w) \cdot \underline{H}_{2A}(w) = \underline{H}_{IA}(w) \cdot \underline{H}_{2A}(w) \cdot \int_0^T A_C \cdot \sin^2(w_I \cdot t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (10)$$

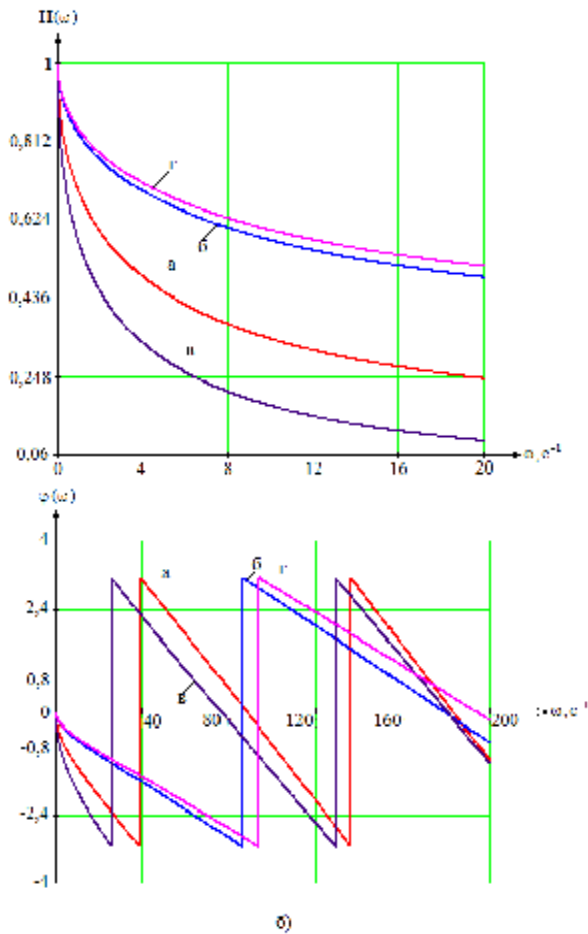


Рисунок 2 – Частотні характеристики моделі стенозної артерії

Спектральні характеристики сигналу на виході стенозної артерії, розраховані за (10) представлено на рис. 3: а – АЧХ спектру сигналу при проходженні пульсової хвилі через здорову судину, б – АЧХ спектру сигналу при проходженні пульсової хвилі через судину із тромбом.

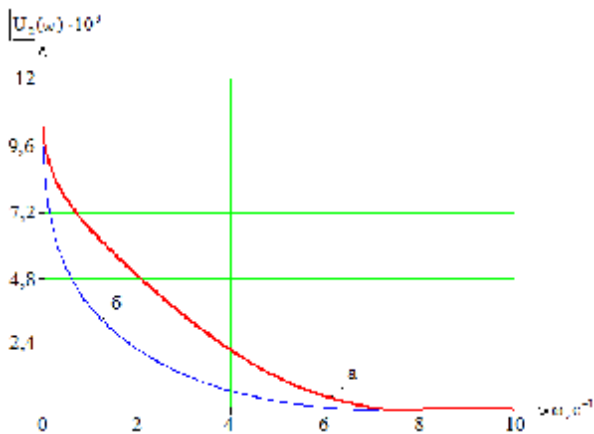


Рисунок 3 – АЧХ спектра сигналу пульсової хвилі, який пройшов через стенозну артерію

Як видно з рис. 3, спектр сигналу пульсової хвилі після проходження стенозної артерії знаходиться

у межах частот від 0 до 8 Гц, а на частотах більше 8 Гц даний спектр надзвичайно малий. Також слід звернути увагу на зменшення області частотного спектру за наявності тромбу в кровоносній судині. Тромб розмірами 7 × 4 мм зменшує область частотного спектру сигналу пульсової хвилі приблизно на 20 %. Це відображається у зниженій еластичності даної ділянки судини. Таким чином, можна встановити залежність: при зниженні частотного спектру сигналу пульсової хвилі на деякий відсоток еластичність судини знижується приблизно втричі відсотка зниження частотного спектру сигналу.

Для відтворення вихідного сигналу у вигляді функції часу (рис. 4) застосовуємо зворотне перетворення Фур'є [6]:

$$U_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\underline{H}_{1A}(w) \cdot \underline{H}_{2A}(w) \cdot \int_0^T A_c \cdot \sin^2(w_1 \cdot t) \cdot e^{-jw_1 t} dt \right) \times e^{jw t} dw. \quad (11)$$

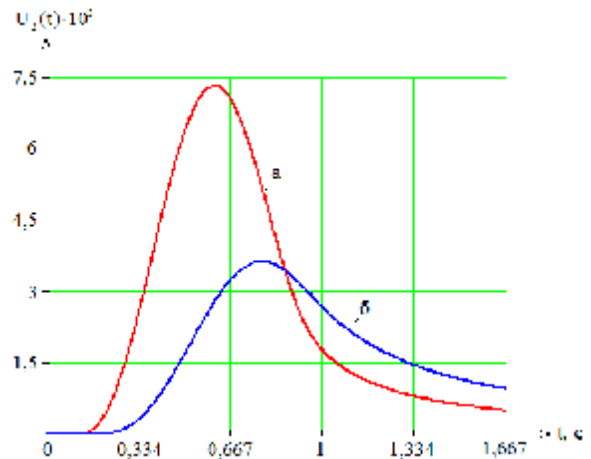


Рисунок 4 – Вид вихідного сигналу пульсової хвилі, який пройшов через стенозну артерію

На рис. 4 позначено: а – вид вихідного сигналу пульсової хвилі при проходженні здорової судини, б – вид вихідного сигналу пульсової хвилі при проходженні судини із тромбом.

Як видно з рис. 4 при тромбі з розмірами 7 × 4 мм затримка в часі збільшується на 25 %, а максимальна амплітуда кров'яного тиску зменшується вдвічі.

Таким чином, проаналізувавши спектр вихідного сигналу та розподіл сигналу в часовій області, можна встановити, що при зменшенні області частотного спектру сигналу пульсової хвилі на деякий відсоток, на такий же відсоток зростає затримка у часі, а максимальна амплітуда кров'яного тиску зменшується вдвічі.

ВИСНОВКИ. Запропоновано модель кровоносної судини при ураженні тромбом у вигляді неоднорідної довгої лінії, яка складається з трьох ділянок: ділянка до тромбу, ділянка з тромбом і ділянка після тромбу, за допомогою якої встановлено, що при ураженні тромбом ділянки кровоносної судини зменшення області частотного спектру сигналу пульсової хвилі на деякий відсоток призводить до зростання затримки в

часі на такий же відсоток і зменшення вдвічі максимальної амплітуди кров'яного тиску. Встановлено, що при зниженні частотного спектра сигналу пульсової хвилі на деякий відсоток еластичність судини знижується приблизно втричі відсотка зниження частотного спектра сигналу, що попереджує про можливість виникнення тромбу в судині.

ЛІТЕРАТУРА

1. Могош Г. Тромбозы и эмболии при сердечно-сосудистых заболеваниях. – Бухарест: Научное и энциклопедическое издательство, 1979. – С. 16–25.
2. Владов С.І., Моспан 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 / Ю.А. Владимиров, Д.И. Рошупкин, А.Я. Потапенко, А.И. Деев. – М.: Медицина, 1983. – С. 225–236.

4. Кузнецов С.Л. Мушкамбаров Н.Н., Горячкина В.Л. Руководство-атлас по гистологии, цитологии и эмбриологии – М: Медицинское информационное агентство, 2002. – С. 152–161.

5. Механика кровообращения / К. Каро, Т. Педли, Р. Шротер, У. Сид. – М.: Мир, 1981. – С. 116–126.

6. Владов С.І., Моспан 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–2011", Пшемисль, 7–15 січня 2012 р. – Пшемисль.: Sp. z o.o. "Nauka i studia", 2012. – Т. 14. – С. 65–69.

STUDY OF PULSE WAVE PASSING THROUGH THROMBUS-AFFECTED BLOOD VESSEL

S. Vladov, V. Mospan, A. Yurko

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

M. Lytvynenko

Kremenchuk Regional Hospital for Disabled Veterans
vul. Zhovtneva, 23/1, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: info@kremenchuk-oh.pl.ua

The pulse wave passing through a thrombus-affected blood vessel have been researched, which results allow to estimate the deviance degree of the functional state of human blood circulatory system. The research conducted is based on multiplication of spectrum of input signal of pulse wave and transfer function of the blood vessel model as a inhomogeneous long line. The analyzing of spectrum of output signal and time-domain distribution of the signal allows to set the correlation between the influence of blood clot on elastic properties of vessel, form of pulse wave, and blood pressure.

Key words: model of the human blood circulatory system, blood clot, pulse wave, blood vessel.

REFERENCES

1. Mogosh G. *Thromboses and to embolism at cordially-vascular diseases*. – Bucharest: Scientific and encyclopedic publishing house, 2003. – PP. 16–25. [in Russian]

2. Vladov S.I., Mospan V.O. 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*. – Kremenchuk: KrNU, 2012. – Iss. 2/2012 (73). – PP. 41–45. [in Ukrainian]

3. *Biophysics* / Y.A. Vladimirov, D.I. Roschupkin, A.Y. Potapenko, A.I. Deev. – M.: Medicine, 1983. – PP. 225–236. [in Russian]

4. Kuznetsov S.L. Mushkambarov N.N. Goryachkina V.L. *Guidance-atlas on histology, cytology and*

embryology. – M: Medical news agency, 2002. – PP. 152–161. [in Russian]

5. *Mechanics of blood circulation* / K. Karo, T. Pedli, R. Shroter, U. Sid. – M.: World, 1981. – PP. 116–126. [in Russian]

6. Vladov S.I., Mospan V.O., Yurko O.O. 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 // *Materials VIII International scientifically to the practical conference "Key aspects of scientific activity– 2012"*, Przemysl, January, 7–15, 2012. – Przemysl.: Sp. z o.o. "Nauka i studia", 2012. – PP. 65–69. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 09.10.2012.

Рекомендована до друку
д.м.н., проф. Алфьоров В.П.