

В статті представлено методику обробки результатів непрямих вимірювань густини нафтопродуктів, наведено розрахунки систематичних, випадкових та відносних похибок методу, побудовано графіки залежностей величини відносної похибки вимірювання в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль та характер зміни відносної похибки вимірювання в заданому діапазоні густин кожного із досліджуваних середовищ.

Ключові слова: частота ультразвукових хвиль, густина нафтопродуктів, відносна похибка, непрямі вимірювання.

Y.Y. BILYNSKY, K.V. OGORODNYK, N.A. STOYAN

Vinnitsa National Technical University

ULTRASONIC METHOD STUDY OF MEASUREMENT OF OIL PRODUCTS

The article presents manufacturers of densimeters, the principle of which is based on ultrasonic methods; theoretical substantiation of this method; formulas for calculating the density of petroleum products at a temperature of 20 °C and at a variable temperature; method of processing the results of indirect measurements of the density of petroleum products. The calculations of absolute, relative, systematic, random errors of the method are given; the proposed order of operations in processing the results of indirect measurements. The relative errors of measuring the density of petroleum products, namely for gasoline, diesel fuel and motor oil, are calculated; systematic errors are determined for each calculated value of the density of petroleum products. The graphs of the dependencies of the relative measurement error value in the conditions of the change in the frequency of ultrasonic waves and the nature of the change in the relative measurement error in a given range of densities of each of the investigated environments have been constructed, which showed that the maximum error of measuring the density of petroleum products does not exceed 2% in a given range of measurement of the frequencies of ultrasonic waves f , and systematic and random errors lie in the range from 0,005% to 0,02%.

Keywords: frequency of ultrasonic waves, the density of oil, relative error, indirect measurement.

Вимірювання густини нафтопродуктів є одним з найбільш трудомістких вимірювальних процесів. Достатньо складно визначити цей параметр при контролі нафтопродуктів під час їхнього виробництва, транспортування та використання, особливо в умовах швидкоплинних технологічних процесів [1]. Застосування ультразвукового методу для вимірювання густини є новим і перспективним розвитком ґустиномірів. Основними перевагами ультразвукового ґустиноміра є безінертність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин в потоці, втрат тиску в трубопроводах; можливість застосування для вимірювання густини забруднених і агресивних середовищ. Основний недолік – необхідність перед вимірюванням густини викачування повітря із пульп, оскільки повітряні бульбашки значно впливають на поглинання ультразвуку.

Серед виробників ґустиномірів, принцип роботи яких базується на ультразвуковому методі, відомі компанії, такі як [2] «Markbiz Nigeria» (Нігерія), «Cole Mills Limited» (США), ОАО «Геотрон» (Росія), «ТОВІАС Associates» (США). Залежно від схеми і конструкції УЗ-ґустиномірів їх приведена похибка коливається від $\pm 1,5$ до $\pm 3\%$.

Зважаючи на сказане, в роботі [3] запропоновано метод та засіб вимірювання густини нафтопродуктів, що відрізняється від відомих своєю простотою. Ультразвукові вимірювачі дозволяють в реальному часі здійснювати контроль і моніторинг концентрації, вимірювання густини нафтопродуктів, контроль за розподілом фаз компонентів розчину (рідинна екстракція), що виконуються з високою точністю.

Теоретичне обґрунтування методу наступне. Ультразвуковий (акустичний) метод визначення густини нафтопродуктів базується на тому, що звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), які створюються електроакустичним перетворювачем (випромінювачем), проходять через середовище й реєструються приймачем, який розташований від випромінювача на певній відстані [3, 4].

Границя між ближньою і дальньою зонами наближено визначається формулою [1, 3]:

$$N = \frac{S}{(\pi/2) \times \lambda} = \frac{2a^2}{\lambda}, \quad (1)$$

де N – відстань уздовж осі (збігається з акустичною віссю перетворювача), S – площа п'єзоелемента, λ – довжина ультразвукової хвилі. Остання частина формули відповідає круглому п'єзоелементу радіусом a .

В [4, 5] досліджено метод визначення густини нафтопродуктів, що полягає у залежності частоти ультразвукових хвиль від густини досліджуваного середовища. Даний метод реалізується наступним чином. Ультразвукові коливання створюються і приймаються електроакустичними перетворювачами. Частоту їх збудження забезпечує генератор змінної частоти. Дані коливання аналізуються за амплітудою за допомогою блоку керування, до складу якого входить мікроконтролер, підсилювач, АЦП та компаратор, й реєструються пікові значення амплітуди в даний момент часу і в попередній за допомогою індикатора. При незмінній густині генератор змінної частоти налаштований на частоту, що відповідає останньому максимуму

ультразвукової хвилі [6].

При зміні густини зменшується амплітуда вихідного сигналу, що призводить до переналаштування частоти. В разі досягнення частоти ультразвукових хвиль, що відповідає максимальній амплітуді, реєструється значення частоти, за якою і розраховують густину.

Швидкість потоку імпульсів визначається за формулою [6]:

$$v = \lambda f = \frac{Z}{\rho}, \tag{2}$$

де f – частота ультразвукової хвилі, Z - акустичний опір середовища, ρ - густина середовища.

Визначивши з формули (1) вираз для знаходження довжини хвилі і підставивши у формулу (2), отримано наступне співвідношення для розрахунку густини (при температурі 20 °C) [8]:

$$\lambda = \frac{2a^2}{N}, \frac{2a^2}{N} \times f = \frac{Z}{\rho} \Rightarrow \rho_{20} = \frac{Z \times N}{2a^2 \times f}. \tag{3}$$

Залежність густини нафтопродуктів ρ_t від температури t має лінійний характер:

$$\rho_t = \rho_{20} - \Delta t \times (t - 20) = \frac{Z \times N}{2a^2 \times f} - \Delta t \times (t - 20), \tag{4}$$

де t – температурна поправка до густини на 1 °C.

Вирази (3) та (4) дають змогу запропонувати ультразвуковий метод вимірювання густини нафтопродуктів, що полягає у визначенні частоти поширення ультразвукової хвилі однозначно пов'язаної з густиною об'єкту контролю, при якій визначається останній дифракційний максимум ближньої зони. Але це не є предметом даної роботи.

Очевидними перевагами розглянутого методу вимірювання густини нафтопродуктів є, по-перше, простота, і, по-друге, відсутність рухомих частин в потоці та втрат тиску в трубопроводах.

В роботі ставиться задача дослідження похибок визначення густини нафтопродуктів за запропонованим методом їх вимірювання.

Обробка результатів непрямих вимірювань

У лабораторній практиці більшість вимірювань – непрямі і величина, яка нас цікавить є функцією однієї або декількох безпосередньо вимірюваних величин [7]:

$$N = f(x, y, z, \dots). \tag{5}$$

Як впливає з теорії ймовірностей, середнє значення величини визначається підстановкою у формулу (5) середніх значень вимірюваних величин, тобто

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots). \tag{6}$$

Потрібно знайти абсолютну і відносну похибки цієї функції, якщо відомі похибки незалежних змінних. Розглянемо два крайніх випадки, коли похибки є або систематичними, або випадковими. Єдиної думки щодо обчислення систематичної похибки непрямих вимірювань немає. Однак, якщо виходити з визначення систематичної похибки як максимально можливої похибки, то доцільно знаходити систематичну похибку за формулами [7]

$$\delta N = \pm \left[\left| \frac{\partial f}{\partial x} \delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \delta z \right| + \dots \right], \tag{7}$$

або

$$\delta N = \pm \bar{N} \left[\left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \delta x \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \delta y \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial z} \delta z \right| + \dots \right], \tag{8}$$

де $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}, \dots$ – часткові похідні функції $N = f(x, y, z, \dots)$ по аргументу x, y, z, \dots , які знайдені в

припущенні, що всі інші аргументи, крім того, за яким знаходиться похідна, постійні; $\delta x, \delta y, \delta z$ – систематичні похибки аргументів. Формулою (7) зручно користуватися в разі, якщо функція має вигляд суми або різниці аргументів. Вираз (8) доцільно застосовувати, якщо функція має вигляд добутку або частки аргументів. Для знаходження випадкової похибки непрямих вимірювань слід користуватися формулами [7, 8]:

$$\Delta N = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \right)^2 + \dots} \tag{9}$$

або

$$\Delta N = \pm \bar{N} \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \Delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \Delta y \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \Delta z \right)^2 + \dots} \tag{10}$$

де $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$ – довірчі інтервали при заданих довірчих ймовірностях (надійностях) для аргументів x, y, z, \dots . Слід мати на увазі, що довірчі інтервали $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$ повинні бути взяті при однаковій довірчій ймовірності $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$.

У цьому випадку надійність для довірчого інтервалу ΔN буде теж P .

Формулою (9) зручно користуватися в разі, якщо функція $N = f(x, y, z, \dots)$ має вигляд суми або різниці аргументів. Формулою (10) зручно користуватися в разі, якщо функція $N = f(x, y, z, \dots)$ має вигляд добутку або частки аргументів.

Часто спостерігається випадок, коли систематична похибка і випадкова похибка близькі одна до одної, і вони обидві однаковою мірою визначають точність результату. У цьому випадку загальна похибка Σ знаходиться як квадратична сума випадкової Δ і систематичної δ похибок з ймовірністю не менше ніж P , де P – довірча ймовірність випадкової похибки [8]:

$$\Sigma = \sqrt{\Delta^2 + \delta^2}. \quad (11)$$

При проведенні непрямих вимірювань в не відтворюваних умовах функцію знаходять для кожного окремого вимірювання, а довірчий інтервал обчислюють для отримання значень шуканої величини за тим же методом, що і для прямих вимірювань.

Слід зазначити, що у випадку функціональної залежності, вираженої формулою, зручною для логарифмування, простіше спочатку визначити відносну похибку, а потім з виразу $\Delta N = \varepsilon N$ знайти абсолютну похибку.

Перш ніж приступати до вимірювання, завжди треба подумати про подальші розрахунки і виписати формули, за якими розраховуватимуться похибки. Ці формули дозволять зрозуміти, які вимірювання слід проводити особливо ретельно, а на які не потрібно витратити великих зусиль.

При обробці результатів непрямих вимірювань пропонується наступний порядок операцій [7]:

1. Всі величини, що знаходяться прямими вимірюваннями, обробляються відповідно до правил обробки результатів прямих вимірювань. При цьому для всіх вимірюваних величин задається одне і те ж значення надійності P .

2. Оцінюється точність результату непрямих вимірювань за формулами (7)–(8), де похідні обчислюються при середніх значеннях величин.

Якщо похибка окремих вимірювань входить в результат диференціювання кілька разів, то згруппуються всі члени, що містять однаковий диференціал, і вирази в дужках, що стоять перед диференціалом беруться за модулем; знак d замінюється на Δ (або δ).

3. Якщо випадкова і систематична похибки за величиною близькі одна до одної, то складають їх за правилом додавання похибок. Якщо одна з похибок менше іншої в три чи більше разів, то менша відкидається.

4. Результат вимірювання записується у вигляді:

$$N = f(x, y, z, \dots) \pm \Delta f.$$

5. Визначається відносна похибка результату серії непрямих вимірювань [8]

$$\varepsilon = \Delta f / f \times 100\%. \quad (12)$$

На першому етапі експериментальним способом отримано значення частот ультразвукових хвиль, що відповідають останнім максимумам ближньої зони. Ці дані підставлено у формулу (3) і для кожного значення частоти f розраховано значення густини ρ нафтопродукту. Для бензину отримані такі значення густини ρ (0,71; 0,72; 0,73; 0,74; 0,75; 0,76) г/см³; для дизельного палива – (0,79; 0,8; 0,81; 0,83; 0,85) г/см³; для моторного масла – (0,89; 0,9; 0,92; 0,93; 0,94) г/см³.

За допомогою штангенциркуля виміряні діаметри електроакустичних перетворювачів та відстань N між ними, отримано наступні результати: $a = (10 \pm 0,05)$ мм, $N = (20 \pm 0,05)$ мм.

Скориставшись формулою (10) маємо наступні значення випадкових похибок для різних середовищ:

$$\ln \rho = \ln z + \ln N - \ln 2 - 2 \ln a - \ln f;$$

$$\frac{\partial \ln \rho}{\partial N} = \frac{1}{N}; \quad \frac{\partial \ln \rho}{\partial a} = -\frac{2}{a}; \quad \Delta \rho = \pm \rho \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(-\frac{2\Delta a}{a}\right)^2};$$

$$\Delta \rho_{1-6} = (0,00737; 0,00747; 0,00758; 0,00768; 0,00779; 0,00789) / \text{г/см}^3;$$

$$\Delta \rho_{1-5} = (0,00821; 0,0083; 0,0084; 0,00862; 0,00882) / \text{г/см}^3;$$

$$\Delta \rho_{1-5} = (0,00924; 0,009342; 0,00955; 0,00965; 0,00976) / \text{г/см}^3.$$

На основі формули (8), адже функція має вигляд частки аргументів, визначено систематичні похибки для кожного розрахованого значення густини нафтопродуктів:

$$\delta \rho = \pm \rho \left(\frac{\delta N}{N} - \frac{2\delta a}{a} \right)$$

$$\delta\rho_{1-6} = (0,00533; 0,0054; 0,00548; 0,00568; 0,00576; 0,00584)\text{г/см}^3;$$

$$\delta\rho_{1-5} = (0,00607; 0,00614; 0,00622; 0,00637; 0,00653)\text{г/см}^3;$$

$$\delta\rho_{1-5} = (0,00684; 0,00691; 0,00707; 0,00714; 0,00722)\text{г/см}^3.$$

(11): Оскільки, випадкові і систематичні похибки за величиною близькі одна до одної, тоді з формули

$$\Delta\rho' = \sqrt{\Delta^2 + \delta^2};$$

$$\Delta\rho'_{1-6} = (0,00909; 0,00922; 0,00935; 0,00955; 0,00969; 0,00981)\text{г/см}^3;$$

$$\Delta\rho'_{1-5} = (0,0102; 0,01033; 0,01045; 0,01072; 0,01097)\text{г/см}^3;$$

$$\Delta\rho'_{1-5} = (0,01149; 0,01162; 0,01188; 0,01201; 0,01214)\text{г/см}^3.$$

Таким чином, отримано наступні результати вимірювання:

- для бензину:

$$\rho_1 = (0,71 \pm 0,00909)\text{г/см}^3; \rho_2 = (0,72 \pm 0,00922)\text{г/см}^3; \rho_3 = (0,73 \pm 0,00935)\text{г/см}^3;$$

$$\rho_4 = (0,74 \pm 0,00955)\text{г/см}^3; \rho_5 = (0,75 \pm 0,00969)\text{г/см}^3; \rho_6 = (0,76 \pm 0,00981)\text{г/см}^3;$$

- для дизельного палива:

$$\rho_1 = (0,79 \pm 0,0102)\text{г/см}^3; \rho_2 = (0,8 \pm 0,01033)\text{г/см}^3; \rho_3 = (0,81 \pm 0,01045)\text{г/см}^3;$$

$$\rho_4 = (0,83 \pm 0,01072)\text{г/см}^3; \rho_5 = (0,85 \pm 0,01097)\text{г/см}^3;$$

- для моторного масла:

$$\rho_1 = (0,89 \pm 0,01149)\text{г/см}^3; \rho_2 = (0,9 \pm 0,01162)\text{г/см}^3; \rho_3 = (0,92 \pm 0,01188)\text{г/см}^3;$$

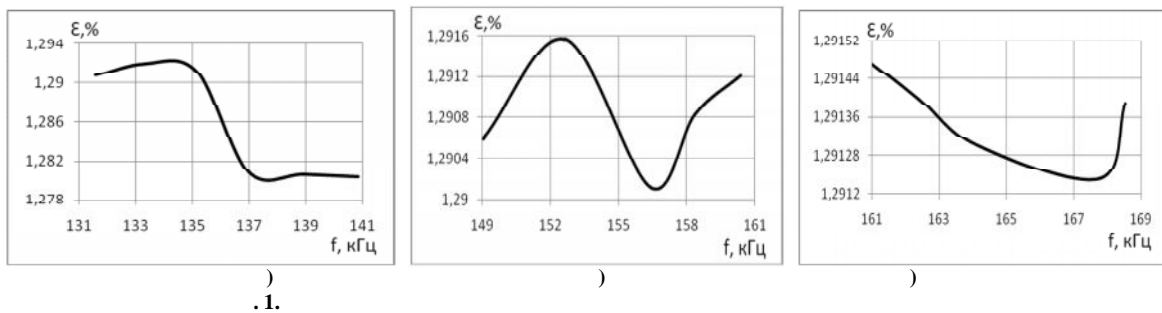
$$\rho_4 = (0,93 \pm 0,01201)\text{г/см}^3; \rho_5 = (0,94 \pm 0,01214)\text{г/см}^3.$$

Скориставшись формулою (12), розраховано відносні похибки вимірювання для кожного досліджуваного середовища:

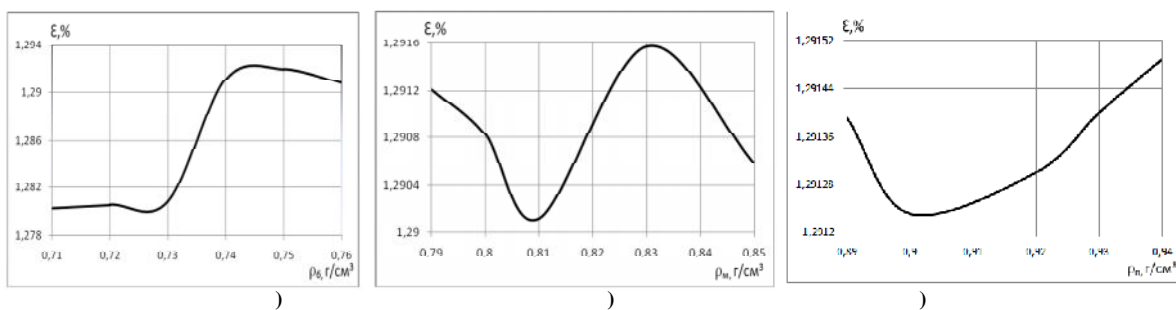
$$\varepsilon_{1-6} = (1,28028; 1,28056; 1,28082; 1,29117; 1,292; 1,29079)\%;$$

$$\varepsilon_{1-5} = (1,29121; 1,29083; 1,29012; 1,29157; 1,29059)\%;$$

$$\varepsilon_{1-5} = (1,29139; 1,29123; 1,2913; 1,2914; 1,29149)\%.$$



.1.



.2.

На основі розрахунків побудовано графіки залежності відносної похибки вимірювання густини нафтопродукту в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль (рис. 1) та графіки характеру зміни відносної похибки вимірювання частоти ультразвукових хвиль кожного із досліджуваних середовищ (рис. 2).

Представлено методику обробки результатів непрямих вимірювань густини нафтопродуктів, наведено розрахунки систематичних, випадкових та відносних похибок методу, побудовано графіки

залежності величини відносної похибки вимірювання в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль та графіки характеру зміни відносної похибки вимірювання в заданому діапазоні густин кожного із досліджуваних середовищ. Аналіз отриманих даних показав, що максимальна похибка вимірювання густини нафтопродуктів не перевищує 2% в заданому діапазоні вимірювання частот ультразвукових хвиль f , а систематична і випадкова похибки лежать в межах від 0,005% до 0,02 %.

1. Артемьев Б. В. Неразрушающий контроль / Артемьев Б. В., Туробов Б. В., Матвеев В. И. и др. ; под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Издательский дом "Спектр", 2012. – 528 с.
2. Производственно-коммерческая группа «Гранат». Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://granat-e.ru/lpgdi.html> – (Дата звернення 07.07.2017). – Назва з екрану.
3. Білінський Й. Й. Аналіз методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білінський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена // Наукові праці ВНТУ. – Вінниця, 2016. – 13 с.
4. Білінський Й. Й. Ультразвуковий метод та засіб вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білінський, К. В. Огородник, Н. А. Стоян // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2017. – № 1. – С. 55–59.
5. Пат. 107963 Україна, МПК G01F 1/66. Пристрій вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білінський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена. – № U 2016 00012 ; заявл. 04.01.2016 ; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12, 2016 р.
6. Пат. 111788 Україна, МПК G01N 11/00. Ультразвуковий густиномір / Й. Й. Білінський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена. – № U 2016 04481 ; заявл. 22.04.2016 ; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22, 2016 р.
7. Бессонов А. А. Введение в лабораторный практикум по физике / А. А. Бессонов, К.А. Дергобузов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://teachmen.ru/methods/phys_prac8.html – (Дата звернення 20.05.2017). – Назва з екрану.
8. Кассандров О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандров, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 200 с.

References

1. Artemev B. V. Nerazrushaiushchyi kontrol / Artemev B. V., Turobov B. V., Matveev V. Y. y dr. ; pod obshch. red. V. V. Kliueva. – М. : Yzdatelskiy dom «Spektr», 2012. – 528 s.
2. Proyzvodstvenno-kommercheskaia hruppa «Hranat». Katalog produktsyy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://granat-e.ru/lpgdi.html> – (Data zvernennia 07.07.2017). – Nazva z ekranu.
3. Bilynskiy Y. Y. Analiz metodiv i zasobiv vymiriuvannia hustyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynskiy, K. V. Ohorodnyk, N. A. Yaremishena // Naukovi pratsi VNTU. – Vinnytsia, 2016. – 13 s.
4. Bilynskiy Y. Y. Ultrazvukoviy metod ta zasib vymiriuvannia hustyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynskiy, K. V. Ohorodnyk, N. A. Stoian // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh». – Khmelnytskyi, 2017. – # 1. – S. 55–59.
5. Pat. 107963 Ukraina, MPK G01F 1/66. Prystrii vymiriuvannia hustyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynskiy, K. V. Ohorodnyk, N. A. Yaremishena. – # U 2016 00012 ; zaivl. 04.01.2016 ; opubl. 24.06.2016, Biul. # 12, 2016 r.
6. Pat. 111788 Ukraina, MPK G01N 11/00. Ultrazvukoviy hustynomir / Y. Y. Bilynskiy, K. V. Ohorodnyk, N. A. Yaremishena. – # U 2016 04481 ; zaivl. 22.04.2016 ; opubl. 25.11.2016, Biul. # 22, 2016 r.
7. Bessonov A. A. Vvedeniye v laboratornyi praktikum po fizyke / A. A. Bessonov, K.A. Derhobuzov [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://teachmen.ru/methods/phys_prac8.html – (Data zvernennia 20.05.2017). – Nazva z ekranu.
8. Kassandrov O. N. Obrabotka rezultatov nabliudeni / O. N. Kassandrov, V. V. Lebedev. – М. : Nauka, 1970. – 200 s.

Рецензія/Peer review : 10.09.2017 р. Надрукована/Printed :20.10.2017 р.

Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією