

**УЛЬТРАЗВУКОВИЙ МЕТОД ТА ЗАСІБ  
ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ НАФТОПРОДУКТІВ**

*В статті представлено математичну модель ультразвукового методу вимірювання густини та структурну схему пристрою для його реалізації, наведено розрахунки та експериментально отримані дані максимальної частоти ультразвукових хвиль у ближній зоні в залежності від густини об'єкта контролю, розраховано похибки вимірювання густини.*

*Ключові слова: ближня зона, ультразвуковий вимірювач густини нафтопродуктів, акустичний опір середовища.*

Y. Y. BILYNSKY, K. V. OGORODNYK, N. A. STOYAN  
Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine

**ULTRASONIC METHOD AND DENSITY MEASUREMENT TOOL OIL PRODUCTS**

*The paper presents a mathematical model of ultrasonic method of measuring density and block diagram of the device for its implementation, presented calculations and experimental data obtained maximum frequency ultrasonic waves in the near field depending on the density of the object of control, calculated measurement error of density.*

*Keywords: near zone, ultrasonic measuring oil density, acoustic impedance environment.*

**Вступ**

Нафтопродукти – продукти, одержані внаслідок переробки нафти на нафтопереробних заводах. Їх широко застосовуються в якості авіаційного й автомобільного пального, пального для дизельних, реактивних і тракторних двигунів, котельного рідкого пального; як розчинники у лакофарбовій промисловості; в техніці як мастильний, електроізоляційний, консерваційний матеріал, робоча рідина, зв'язуюча речовина [1].

На сьогодні актуальним залишається питання контролю якості нафтопродуктів. Нафтотрейдери, намагаючись збільшити свої прибутки, додають у різні види пального (яке на сьогодні є найбільш поширеним нафтопродуктом) присадки, дистилатори, керосин тощо. Також неправильне зберігання та транспортування нафтопродуктів призводить до погіршення його якості. В свою чергу, використання неякісних нафтопродуктів призводить до підвищеного зносу вузлів та механізмів, виходу з ладу паливних установок і, як наслідок, до додаткових витрат споживачів.

Якість нафтопродуктів оцінюється за такими показниками: колір, прозорість, вміст механічних домішок, густина, вміст води, температура замерзання низькотемпературних охолоджених рідин, міцність спирту [1]. Одним із основних показників якості нафтопродуктів є густина. За густиною можна судити про вид та склад нафтопродуктів. Правильне визначення густини нафтопродукту дає можливість обліку його загальної і погодинної витрати, а також можливість відповідного налагоджування паливної апаратури.

Існує велика кількість різних методів та засобів вимірювання густини нафтопродуктів. В нафтохімічній галузі для товарного обліку нафти і нафтопродуктів при транспортуванні та зберіганні отримав широке застосування ультразвуковий метод вимірювання густини. Даний метод вимірювання густини нафтопродуктів є безінертним і безконтактним; його реалізація не передбачає рухомих частин в потоці та втрат тиску в трубопроводах; існує можливість його застосування для вимірювання густини забруднених і агресивних середовищ [1, 2]. Оперативне вимірювання густини в з/д цистернах, бензовозах і горизонтальних резервуарах для нафтопродуктів допомагає не тільки заощадити час, але і уникнути ризиків, пов'язаних з неякісним пробовідбором, помилками при проведенні лабораторних аналізів та ідентифікації проб.

Ультразвукові вимірювачі дозволяють в реальному часі здійснювати контроль і моніторинг концентрації, вимірювання густини нафтопродуктів, контроль за розподілом фаз компонентів розчину (рідинна екстракція). Отже, застосування ультразвуку для оперативного вимірювання густини нафтопродуктів є перспективним напрямком розвитку густиномірів [2].

Існують такі сучасні ультразвукові густиноміри провідних світових компаній, а саме LiquiSonic (компанія «SensoTech», Німеччина), SONOCON (ООО НПІП компанія «Точприбор», Росія), АН-2 (ООО компанія «Химснабжение», Україна), LPGDi (компанія «Lemis Baltic», Латвія).

Принцип дії більшості ультразвукових густиномірів базується на проведенні аналізу одного з чотирьох параметрів хвилі: фазового зсуву, частоти, амплітуди або часу проходження сигналу крізь об'єкт контролю. Кожен з вказаних методів аналізу має певні недоліки, основними з яких є низька точність за рахунок неоднорідності структури об'єкту контролю, неточності у реєстрації положення початку імпульсного сигналу внаслідок розмиття фронту його наростання тощо. У більшості випадків вимірювання також проводиться не безпосередньо в резервуарі, а береться проба нафтопродукту. Це, з одного боку, призводить до можливого виникнення контакту проби з вимірювачем, а з іншого боку, контакту з повітрям, внаслідок чого виникають додаткові похибки через високу летучість нафтопродуктів, а також зменшується

автоматизація вимірювання та виникає неможливість отримання результатів в реальному часі. В ряді приладів вимірювання здійснюється при максимальному тиску 15-16 Бар, тоді як тиск в нафтоцистернах складає близько 25-27 Бар, що обмежує можливий діапазон використання приладу та вносить додаткові похибки [5]. Отже, питання вдосконалення ультразвукових методів вимірювання густини нафтопродуктів є достатньо актуальним.

Тому **метою роботи** є підвищення точності вимірювання густини нафтопродуктів за рахунок удосконалення ультразвукового методу та розробки засобу на його основі.

### Теоретична частина

Ультразвук – акустичні коливання, частота яких більша ніж високочастотна межа чутного звуку (понад 20 кГц) [7]. Застосування ультразвуку для вимірювання густини нафтопродуктів є новим і перспективним напрямком розвитку густинімірів [3, 5].

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 [2, 7].

Поле ультразвукового сигналу в середовищі описується істотно різними закономірностями на близькій та далекій відстанях від перетворювача. Ця різниця особливо чітко виражена для круглого перетворювача. У безпосередній близькості від нього ультразвук поширюється у вигляді паралельного пучка променів (прожекторна зона), але трохи далі картина різко змінюється. Енергія і раніше залишається в межах нерозсіяного пучка, але з'являються максимуми і мінімуми амплітуди. Вся ця область називається ближньою зоною, ближнім полем або зоною Френеля [1, 7].

У дальній зоні (далекому полі, зоні Фраунгофера) формується розбіжний пучок променів. Випромінюється як би сферична хвиля, але розповсюджується нерівномірно у всі сторони від джерела, а в межах конуса – основної пелюстки. Максимум амплітуди відповідає осі перетворювача (акустична вісь або центральний промінь). Зі збільшенням кута між напрямком якого-небудь променя і віссю амплітуда зменшується, з'являються бічні пелюстки.

Амплітуда у дальній зоні плавно зменшується зі збільшенням відстані від перетворювача. У ближній зоні амплітуда змінюється від положення в просторі складним чином.

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

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

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

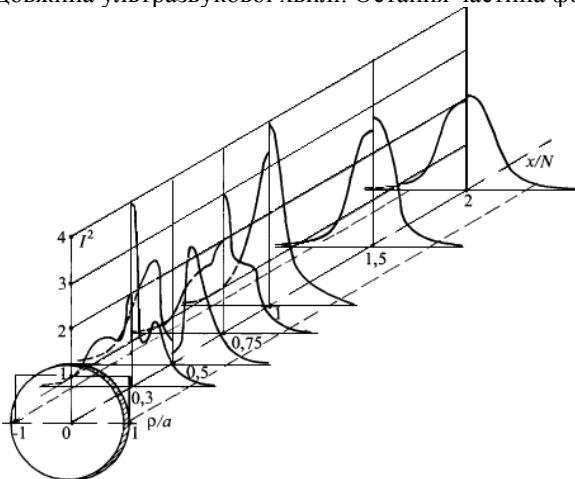


Рис. 1. Амплітуда поля випромінювання-приймання круглого перетворювача

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. При досягненні частоти ультразвукових хвиль, що відповідає максимальній амплітуді реєструється значення частоти, за якою і розраховують густину.

Швидкість потоку імпульсів визначається за формулою [6]:

$$v = \lambda f = \frac{Z}{\rho}, \quad (2)$$

де  $f$  - частота ультразвукової хвилі,  $Z$  - акустичний опір середовища,  $\rho$  - 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]:

$$\lambda = \frac{2a^2}{N}, \frac{2a^2}{N} \cdot f = \frac{Z}{\rho} \Rightarrow \rho_{20} = \frac{Z \cdot N}{2a^2 \cdot f} \quad (3)$$

Залежність густини нафтопродуктів  $\rho_t$  від температури  $t$  має лінійний характер:

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

де  $\Delta t$  – температурна поправка до густини на  $1^\circ\text{C}$ .

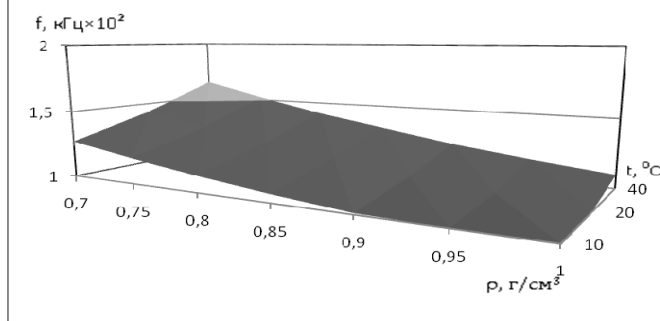


Рис. 2. Залежність частоти ультразвукових хвиль від температури і густини нафтопродуктів

На рис. 2 представлена залежність частоти ультразвукової хвилі, при якій визначається останній дифракційний максимум ближньої зони, від температури і густини відповідно до виразу (4). Аналіз рис. 2 дозволяє стверджувати про однозначну залежність частоти від густини при різних температурних режимах вимірювання.

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.

### Експериментальна частина

Для реалізації ультразвукового методу вимірювання густини розроблено структурну схему експериментальної установки (рис. 3). На вході схеми до ультразвукового вимірювача 3 підключено генератор 1 паралельно осцилографу 2, а на виході розташовані паралельно один одному вольтметр 4 та частотомір 5.

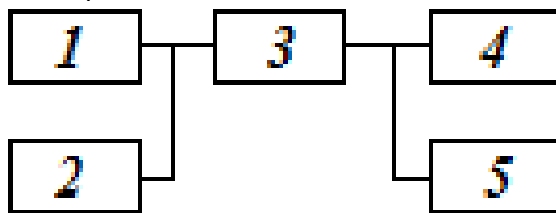


Рис. 3. Структурну схему експериментальної установки

На основі структурної схеми створено експериментальну установку ультразвукового методу визначення густини нафтопродуктів (рис. 4). Принцип роботи установки полягає в наступному. Ультразвукові коливання створюються випромінювачем 6 і приймаються приймачем 8, що розташовані з можливістю контактувати із досліджуванним середовищем 7 (нафтопродуктом).

За допомогою генератора змінної частоти 2 забезпечується частота збудження випромінювача 6. Отримані коливання аналізуються за амплітудою частотоміром 4 й реєструються максимальні значення амплітуди за допомогою вольтметра 3.

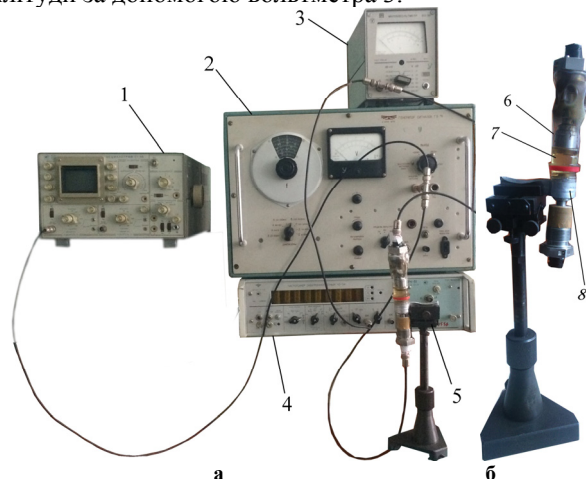


Рис. 4. Експериментальна установка ультразвукового вимірювача густини нафтопродуктів: а) експериментальна установка; б) ультразвуковий вимірювач

Вимірювання проводились при сталій температурі. При цьому діаметр  $a$  кожного із електроакустичних перетворювачів складає 1 см, а відстань між ними (ширина ближньої зони)  $N$  дорівнює 2 см. Густина і акустичний опір досліджуваних середовищ наведені в табл. 1.

Для подальших розрахунків використано формулу (3) та визначено значення частот ультразвукових хвиль, на яких спостерігається максимум ультразвукової хвилі.

При досягненні частоти ультразвукових хвиль, що відповідає максимальній амплітуді реєструється значення частоти, за якою і розраховують густину за формулою (3). Паралельно генератору змінної частоти 2 до входу ультразвукового вимірювача 5 підключений осцилограф 1, за допомогою якого контролювалась якість вхідного сигналу [6, 8].

Під час проведення експерименту використовувались на вході установки генератор сигналів ГЗ-7А та осцилограф С1-55, а на виході дані вимірювались мілівольтметром ВЗ-38 і частотоміром ЧЗ-34. Проведено експериментальні дослідження визначення густини моторного масла, дизельного палива та бензину, кожен з яких має свій акустичний опір  $Z$ , густину  $\rho$ .

Густина і акустичний опір досліджуваних середовищ

Досліджуване середовище	Густина, $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	Акустичний опір, $Z$ (г/см <sup>2</sup> ·с)×10 <sup>5</sup>
Моторне масло	0,88-0,94	1,51
Дизельне паливо	0,79-0,97	1,267
Бензин	0,71-0,76	1

Скориставшись нафтоденсиметром ДН-1 (похибка вимірювання  $\pm 0,001$  г/см<sup>3</sup>), отримано значення густин досліджуваних моторного масла  $\rho_m = 0,9$  г/см<sup>3</sup>, дизельного палива  $\rho_n = 0,85$  г/см<sup>3</sup> та бензину  $\rho_b = 0,75$  г/см<sup>3</sup>. За формулою (3) для цих густин розраховано частоту  $f$ , що відповідає останньому максимуму ультразвукової хвилі, за формулою:

$$\rho = \frac{Z \cdot N}{2a^2 \cdot f} \Rightarrow f = \frac{Z \cdot N}{2a^2 \cdot \rho} \quad (5)$$

$$f_{\text{масло}} = (1,51 \cdot 10^5 \cdot 2) / (2 \cdot 1^2 \cdot 0,9) \approx 168 \cdot 10^3 \text{ (Гц)} \approx 168 \text{ кГц.}$$

$$f_{\text{паливо}} = (1,267 \cdot 10^5 \cdot 2) / (2 \cdot 1^2 \cdot 0,85) \approx 149 \cdot 10^3 \text{ (Гц)} \approx 149 \text{ кГц.}$$

$$f_{\text{бензин}} = (1 \cdot 10^5 \cdot 2) / (2 \cdot 1^2 \cdot 0,75) \approx 133 \cdot 10^3 \text{ (Гц)} \approx 133 \text{ кГц.}$$

З іншого боку, використовуючи експериментальну установку (рис. 4), отримано амплітудно-частотні характеристики пари п'єзоперетворювачів при наявності між ними вказаних нафтопродуктів (рис. 5).

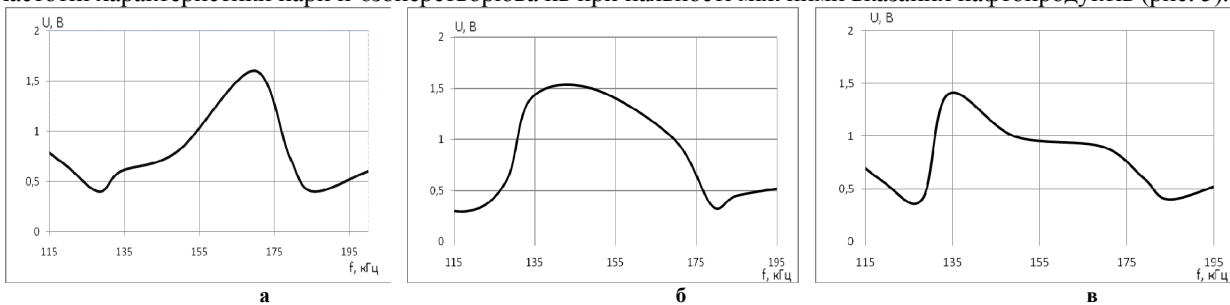


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики пари п'єзоперетворювачів при наявності між ними нафтопродукту: а) моторне масло; б) дизельне паливо; в) бензин

Аналіз експериментальних даних показав, що максимальне значення вихідної напруги для моторного масла досягається при частоті 169,5 кГц (аналітично отримане значення становить 168 кГц), для дизельного палива – 149,2 кГц (аналітично отримане – 149 кГц) та для бензину – 134 кГц (аналітично отримане – 133 кГц). Такі дані свідчать про збіжність теоретичних розрахунків та експериментально отриманих даних.

Для контролю якості нафтопродуктів відповідно до ДСТУ відносна похибка приладу для вимірювання густини не повинна перевищувати 2%.

Визначено відносні похибки між теоретичними розрахунками та експериментально отриманими результатами максимальної частоти ультразвукових хвиль та густини нафтопродуктів за наступною формулою:

$$\Delta x = \frac{x_e - x_p}{x_e} \cdot 100\%,$$

де  $x_e$  – експериментально отримані результати;  $x_p$  – розраховані результати:  
 $\Delta f_{\text{масло}} = 0,885\%$ ;  $\Delta f_{\text{паливо}} = 0,134\%$ ;  $\Delta f_{\text{бензин}} = 0,746\%$ .

$$\Delta \rho_{\text{масло}} = 1,1\%$$
;  $\Delta \rho_{\text{паливо}} = 0,118\%$ ;  $\Delta \rho_{\text{бензин}} = 0,533\%$ .

Отже, збіжність теоретичних розрахунків та результатів експериментальних досліджень підтверджують адекватність розробленого методу вимірювання густини нафтопродуктів. Похибка вимірювання не перевищує 1,1 %.

На основі експериментальної установки, розроблено структурну схему ультразвукового вимірювача густини (рис. 6), принцип дії якої описано в [6, 8]. Принцип роботи вимірювача наступний. Ультразвукові коливання створюються і приймаються електроакустичними перетворювачами 5 і 6, які контактують із досліджуваним середовищем 4. Частоту їх збудження забезпечує генератор змінної частоти 3. Дані коливання аналізуються за амплітудою за

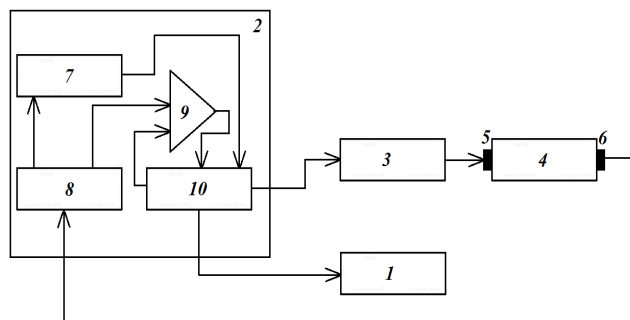


Рис. 6. Структурна схема ультразвукового вимірювача густини

допомогою блоку керування 2, до складу якого входить мікроконтролер 10, підсилювач 8, АЦП 7 та компаратор 9, й реєструються пікові значення амплітуди в даний момент часу і в попередній за допомогою індикатора 1.

### Висновки

Запропоновано математичну модель ультразвукового методу вимірювання густини та структурну схему пристрою для його реалізації, наведено розрахунки та експериментально отримані дані максимальної частоти ультразвукових хвиль у ближній зоні в залежності від густини об'єкта контролю, розраховано похибки вимірювання густини за допомогою запропонованого методу, які не перевищують 1,1 %, представлено структурну схему ультразвукового вимірювача густини.

### Література

1. Ермолов И. Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Кивилис С. С. Плотномеры / С. С. Кивилис. – М.: Энергия, 1980. – 280 с.
3. Предприятие технической комплектации "Спектр". – Каталог продукции. [Сайт]. Режим доступа: <http://www.kip.spektr.org/composition.html> (дата звернення 30.10.2016). – Назва з екрану.
4. Производственно-коммерческая группа «Гранат». – Каталог продукции. [Сайт]. Режим доступа: <http://granat-e.ru/lpgdi.html> (дата звернення 07.11.2016). – Назва з екрану.
5. Білинський Й. Й. Аналіз методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена. – Вінниця, Наукові праці ВНТУ, 2016. – 13 с.
6. Пат. 107963 Україна, МПК G01F 1/66. Пристрій вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена. – №U 2016 00012; Заявл. 04.01.2016; Опубл. 24.06.2016, Бюл. №12, 2016 р.
7. Ермолов И. Н. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И. Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 278 с.
8. Огородник К. В. Пристрій вимірювання густини нафтопродуктів / К. В. Огородник, Н. А. Яремішена // Матеріали 5-тої науково-практичної конференції "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання". Збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ, 2015. – С. 150-151.

### References

1. Ermolov I. N. Nerazrushaiushchiy kontrol': Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V. V. Klyiev. T. 3: Ultrazvukoviy kontrol' / I. N. Ermolov, Yu. V. Lange – M.: Mashynostroenie, 2004. - 864 c. [in Russian]
2. Kyvylys S. S. Plotnomery / S. S. Kyvylys. – M.: Enerhyia, 1980. - 280 c. [in Russian]
3. Predpriiatie tehniceskoi komplektatsii "Spectr". – Katalog productsii. [Sait]. Rejim dostupu: <http://www.kip.spektr.org/composition.html> (data zvernennya 30.10.2016). - Nazva z ekranu. [in Russian]
4. Proizvodstvenno-kommercheskaya gruppa "Granat" – Katalog productsii. [Sait]. Rejim dostupu: <http://www.kip.spektr.org/composition.html> (data zvernennya 7.11.2016). - Nazva z ekranu. [in Russian]
5. Bilynsky Y. Y. Analys methodiv i zasobiv vymiryuvannya gystyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynsky, K. V. Ogorodnyk, N. A. Yaremishena. – Vinnystia, Naukovi pratsi VNTU, 2016. - 13 c. [in Ukrainian]
6. Pat. 107963 Ukraina, MPK G01F 1/66. Prystriu vymiryuvannya gystyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynsky, K. V. Ogorodnyk, N.A. Yaremishena. – №U 2016 00012; Zayavl. 04.01.2016; Opybl. 06.24.2016, Byui. №12, 2016. [in Ukrainian]
7. Ermolov I. N. Ultrazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushaiushchego kontroliia. Pod red. I. N. Ermolov, - M.: Mashynostroenie, 1986. - 278 c. [in Russian]
8. Ogorodnyk K. V. Prystriu vymiryuvannya gystyny naftoproduktiv / K. V. Ogorodnyk, N.A. Yaremishena // Materialy 5-toi naykovo-practychnoi konferentsii "Method i zasib neruivnogo kontroliiu promyslovogo obladnannia". Zbirnyk tez dopovidei. – Ivano-Frankivsk, 2015. – С. 150-151. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 10.2.2017 р.

Надрукована/Printed :27.2.2017 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією