

УДК 681.2:621.3.082.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-2(43)-41-47

ВІБРОЧАСТОТНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ГУСТИНИ В УМОВАХ ВІБРАЦІЇ

О. Ю. Олійник

*ВАТ РПК «АДМІРАЛ», вул. Б. Кротова 35, м. Дніпро, Україна, 49000,
e-mail: oleinik_o@ukr.net.*

Використання існуючих віброчастотних засобів вимірювальної техніки для контролю технологічних параметрів всередині апаратів та обладнання обмежене через наявність вібрації та виробничої зашумленості. Відсутність даних про використання в якості проточних резонаторів частини технологічного апарату через недослідженість основних аналітичних рівнянь для визначення амплітудно-частотних характеристик таких резонаторів визначило напрям даних досліджень. Стаття присвячена дослідженням спрямованим на встановлення взаємозв'язку взаємодії вібраційного поля резонатора, у якості якого використовується частина технологічного апарату з контрольованим середовищем, та його реакції у вигляді зміни частоти або амплітуди власних коливань резонатора, що несе інформацію властивості речовини в апараті. Наведена схема експериментальної установки, методологія експерименту та дані визначення частоти коливання резонатора в умовах вібрації для металевих (високолегована корозійно-стійка сталь) та неметалевих (поліметилметакрилатне скло) резонаторів. Отримані за експериментальними значеннями криві було апроксимовано з застосуванням лінійної та гіперболічної апроксимації. Встановлено, що застосування гіперболічної апроксимації зменшує середню похибку апроксимізації більш ніж у шість раз. Встановлено, що похибка гіперболічна похибка апроксимації не перевищує 0,022% для металевого резонатора та 0,05% для резонатора з органічного скла. Проведені експериментальні дослідження підтверджують наявність детермінованого зв'язку вимірюваних частотних характеристик резонатора з густиною, яка вимірювалась всередині устаткування. Отримані дані використано для розробки науково-методичних засад віброчастотного методу контролю в умовах вібрації з використанням частини апарату в якості резонатора віброчастотного давача.

Ключові слова: частота коливання, резонатор, технологічний апарат, похибка апроксимації.

Использование существующих виброчастотных средств измерительной техники для контроля технологических параметров внутри аппаратов и оборудования ограничено из-за наличия вибраций и производственной зашумленности. Отсутствие данных об использовании в качестве проточных резонаторов части технологического аппарата через неисследованности основных аналитических уравнений для определения амплитудно-частотных характеристик таких резонаторов определило направление данных исследований. Статья посвящена исследованиям направленным на установление взаимосвязи взаимодействия вибрационного поля резонатора, в качестве которого используется часть технологического аппарата с контролируемой средой, и его реакции в виде изменения частоты или амплитуды собственных колебаний резонатора, что несет информацию о свойствах вещества в аппарате. Приведенна схема экспериментальной установки, методология эксперимента и данные определения частоты колебания резонатора в условиях вибрации для металлических (високолегованная коррозионно-стойкая сталь) и неметаллических (поліметилметакрилатное стекло) резонаторов. Полученные по экспериментальным значениями кривые были аппроксимированы с применением линейной и гиперболической аппроксимации. Установлено, что применение гиперболической аппроксимации уменьшает среднюю погрешность аппроксимизации более чем в шесть раз. Установлено, что погрешность гиперболической погрешность аппроксимации не превышает 0,022% для металлического резонатора и 0,05% для резонатора из органического стекла. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают наличие детерминированного связи измеряемых частотных характеристик резонатора с плотностью, которая измерялась внутри оборудования. Полученные данные использованы для разработки научно-методических основ виброчастотного метода контролю в

условиях вибрации с использованием части аппарата в качестве резонатора виброчастотного датчика.

Ключевые слова: частота колебания, резонатор, технологический аппарат, погрешность аппроксимации.

The use of existing vibration frequency measuring instruments for monitoring technological parameters inside apparatus and equipment is limited due to the presence of vibrations and industrial noise. The lack of data on the use of part of the technological apparatus as flow resonators through the unexplored basic analytical equations for determining the amplitude-frequency characteristics of such resonators determined the direction of these studies. The article is devoted to studies aimed at establishing the relationship between the vibrational field of the resonator, which is used as part of the technological apparatus with a controlled environment, and its reaction in the form of a change in the frequency or amplitude of the resonator's own vibrations, which carries information about the properties of the substance in the apparatus. The experimental setup diagram, experimental methodology, and data on determining the oscillation frequency of the resonator under vibration conditions for metallic (corrosion-resistant steel) and non-metallic (organic glass) resonators are presented. The curves obtained from the experimental values were approximated using linear and hyperbolic approximations. It was found that the use of hyperbolic approximation reduces the average approximation error by more than six times. It was found that the error of the hyperbolic approximation error does not exceed 0.022% for a metal resonator and 0.05% for an organic glass resonator. The conducted experimental studies confirm the presence of a determinate coupling of the measured frequency characteristics of the resonator with the density, which was measured inside the equipment. The obtained data was used to develop the scientific and methodological foundations of the vibrational frequency control method in conditions of vibration using a part of the device as a resonator of the vibrational frequency sensor.

Key words: oscillation frequency, resonator, technological apparatus, approximation error.

Вступ. Сучасні вимоги до виробництва вимагають застосування високоефективних методів і засобів неруйнівного контролю якості у критичних точках виробництв-технологічних апаратах. Одним із перспективних методів контролю технологічних параметрів є віброчастотні методи, сутність яких заснована на залежності коливань чутливого елемента – резонатора від контрольованого параметру [1].

Віброчастотні давачі у порівнянні з вібраційними володіють покращеними метрологічними характеристиками, оскільки вимірювана частота функціонально залежить від геометричних розмірів резонатора, матеріалу з якого він виконаний, речовини в середині та є незалежним від амплітуди коливання [2].

Все це робить цей метод затребуваним на невеликих підприємствах харчової та хімічної галузі промисловості, де сьогодні відсутні прямі методи автоматичного контролю якості і використовується лабораторний контроль всупереч рекомендаціям діючих законодавчих актів. Проте використання існуючих віброчастотних ЗВТ для контролю технологічних

параметрів всередині апаратів та обладнання обмежене через наявність вібрацій та виробничої зашумленості, що обумовлює нестабільність амплітуди і частоти автоколивань засобу та невизначеність законів розподілу вимірювальної інформації.

1. Аналіз літературних даних і постановка проблеми. У віброчастотних вимірювальних перетворювачах чутливі елементи давача можуть бути виконані у вигляді циліндрів, трубок або пластин, які закріплені в нерухомих підставах [2]. Чутливий елемент вимірювального перетворювача вводиться в автоколивальний режим руху спеціальною системою збудження. [2]. Необхідною є умова проведення вимірювань в середовищі без додаткових джерел вібрацій.

В умовах коли технологічний процес у апараті супроводжується природним барботажем, турбулізацією потоків і відбувається взаємодія вібраційного поля вібраційного давача з вібраційним полем апарату, формується реакція у вигляді зміни частоти або амплітуди власних коливань середовища, що не несе достовірну інформацію

про склад та властивості контрольованої речовини [3].

Дослідження вібрації технологічних апаратів різного призначення свідчать, що найбільш складну структуру мають коливальні системи при описі яких не можна обмежуватися тільки лінійними моделями [4]. Тому сьогодні тільки для окремих випадків розроблені вузько спеціалізовані методи і алгоритми вібраційного контролю обладнання у виробничих умовах, які дозволяють оптимізувати завдання пошуку конкретних видів дефектів в конкретних типах обладнання [5]. Так, наприклад авторам [5-6] вдалось для обладнання машин роторного типу досить точно визначити характеристики коливальних сил і коливальні системи, основним способом отримання вимірювальної інформації стає спектральний аналіз вібрації, вимірюваної в різних точках і напрямках. Проте у випадку, коли джерелами вібрацій є ударні імпульси, процеси барботажу або завихрення газорідної суміші в апараті, розроблені методи і алгоритми контролю технологічних параметрів в умовах вібрації відсутні.

Аналіз технічних характеристик [7-13] існуючих вібраційних засобів вимірювання свідчить, жоден з них не можна використовувати для отримання достовірної інформації про стан об'єкту в умовах вібрації з утворення природної коливальної газорідної системи у апараті. Паспортна технічна документація більшості вібраційних засобів вимірювальної техніки містить інформацію про неможливість контролю газорідної суміші в умовах підвищеної вібрації. Тому, розробка наукових засад віброчастотного методу контролю в умовах технологічних параметрів вібрації є актуальною метрологічною задачею.

2. Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення взаємозв'язку взаємодії вібраційного поля резонатора, у якості якого використовується частина технологічного апарату з контрольованим середовищем, та його реакції у вигляді зміни частоти або амплітуди власних коливань резонатора, що несе інформацію властивості речовини в апараті.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

– в експериментальних умовах дослідити залежність частоти коливання резонатора апарату від густини газорідного середовища

для металевих та неметалевих ємностей;

– виконати аналіз отриманих даних, встановити можливість технічної реалізації віброчастотного контролю густини в умовах вібрації.

3. Експериментальне визначення частоти коливання резонатора в умовах вібрації. У загальному вигляді залежність між густиною контрольованого середовища ρ та частотою коливання f резонатора віброчастотного давача описується виразом [2]:

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1+a_0\rho}}, \quad (1)$$

де f_0 – початкова частота коливання резонатора; a_0 – постійна резонатора, що визначається експериментальним шляхом та залежить від його внутрішнього та зовнішнього діаметрів та матеріалу виготовлення.

Формула є доволі приблизною, оскільки не враховує довжину резонатора, модуль пружності матеріалу та момент інерції поперечного перерізу.

У [14] автор отримав уточнену формулу для визначення частоти коливання резонатора з урахуванням довжини та пружних характеристик матеріалу резонатора:

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{m_{cm} + m_p}}, \quad (2)$$

де λ – стала, що враховує спосіб кріплення резонатора; l – довжина резонатора; E – модуль пружності матеріалу; I – момент інерції поперечного перерізу, враховує форму перерізу резонатора; m_{cm} – маса трубки резонатора; $m_p = \rho_r(\pi D^2)/4$ – маса рідини з густиною ρ_r при внутрішньому діаметрі трубки D .

На основі формули (2) були отримані чисельні градуїровочні характеристики вібраційних густиномірів з трубчатими або циліндричними резонаторами [2].

Для багатьох технологічних процесів з борбатажем, турбулізацією потоків або завихрення газорідної суміші в апараті для реалізації віброчастотного методу контролю технологічних параметрів всередині апарату пропонується використовувати в якості механічного резонатора частину апарату.

Ступень детермінованості вимірюваних амплітудно-частотних характеристик апарату з реальними технологічними параметрами

всередині устаткування раніше не досліджувався, тому дана робота присвячена встановленню такого взаємозв'язку на основі відомих частотних залежностей.

Для встановлення взаємозв'язку взаємодії вібраційного поля резонатора, у якості якого використовується частина технологічного апарату з контрольованим середовищем, та його реакції у вигляді зміни частоти власних коливань резонатора, що несе інформацію властивості речовини в апараті було використано установку, що представлена на рис.1.

У якості моделі технологічного апарату використовували трубу з високолегованою корозійно-стійкою сталі 12X18H12T ($\rho_1=7900$ кг/м³, модуль пружності сталі $E=205 \cdot 10^9$ н/м², статичний момент поперечного перетину $I=\pi d^4/64$). Довжина труби $l=1$ м, внутрішній діаметр $d=0,298$ м, товщина стінки $h=2 \cdot 10^{-3}$ м. Умови вібрації задавали шляхом створення природної коливальної системи в середині трубки при борбуванні шару рідини CO₂. Контроль витрати вуглекислого газу здійснювався ротаметром типу Ar/CO₂ ДМ (гранича похибки $\pm 2\%$) з регулятором потоку газу (від 0 до 100 % з кроком 10 %).

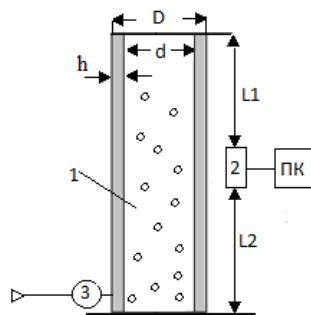


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для дослідження частоти коливання резонатора в умовах вібрації: 1- модель технологічного апарату; 2- вібродатчик; 3- ротаметр.

Частота вимірювалась вібродатчиком типу типу «RVS-36P» (гранича похибки $\pm 3\%$) з блоком вимірювання частоти, який розташовували на штанзі з можливістю пересування вздовж резервуару з жорстко закріпленими кінцями. Аналоговий сигнал з блоку вимірювання частоти потрапляв на аналогово-цифровий перетворювач, далі на

ПК. Для описаної серії експериментів вібродатчик закріплювали посередені резервуару ($L1=L2$). Переміщення датчика застосовували для досліджень амплітуди та форми коливання резонатора.

При проведенні експериментальних досліджень у лабораторних умовах діаметр бульбашок вуглекислого газу контролювали шляхом застосування сіток з каліброваними отворами, які закріплювалися на форсунці. Хочеться відзначити, що у виробничих умовах у випадку, коли процес барботажу є природним (наприклад, барботаж у апаратах зануреного горіння, нафтовий сепаратор і.ін) достовірний контроль діаметру бульбашок технічно складно реалізувати.

Початкова частота коливань резонатора вимірювалась при постійній температурі 20°C, атмосферному тиску при заповненні ємності повітрям з відомою густиною $\rho=1205$ кг/м³. Виміряне значення початкової частоти коливань f_0 становило 1906,14 Гц.

Для досліджень частоти коливання резонатора в умовах вібрації використовували сірчаноокислі розчини густиною ρ в діапазоні від 1100 до 1200 кг/м³ з кроком в 20кг/м³. Густину контролювали з використанням лабораторних поплавкових ареометрів. У кожній точці було виконано по 35 спостережень.

Крива, отримана за експериментальними значеннями була апроксимована лінійним рівнянням виду $f=839,43-0,24\rho$. Коефіцієнти регресії визначалися за допомогою інструменту регресивного аналізу, реалізованого засобами Python, середня похибка апроксимації $-0,147\%$. Застосування гіперболічної апроксимації рівнянням виду $f=277,93+322370,07/\rho$ зменшує середню похибку апроксимації до 0,022% (рис.2).

Однією з тенденцій сучасної промисловості у світі є скорочення попиту на технологічне обладнання, апарати з надмірною металоємністю. У зв'язку з цим на невеличких підприємствах, особливо в харчовій, фармацевтичній, косметичній галузях, сьогодні широко використовуються апарати, обладнання з неметалевими ємностями і резервуарами. Найбільш поширеними є резервуари з пластику, органічного скла [15].

Мала інертність до активних середовищ (порівняно з металами), густина органічного

скла, значення допустимих втрат коливальної енергії – все це робить матеріал затребуваним у виробництві, зокрема і для резонаторних давачів.

Однак немає даних про використання органічного скла в якості проточних резонаторів. Основною причиною є відсутність основних аналітичних рівнянь для визначення чутливості таких резонаторів до параметрів середовища всередині апарата, добротності коливальної системи, температурної похибки і похибки, обумовленої зміною швидкості течії середовища через такий резонатор.

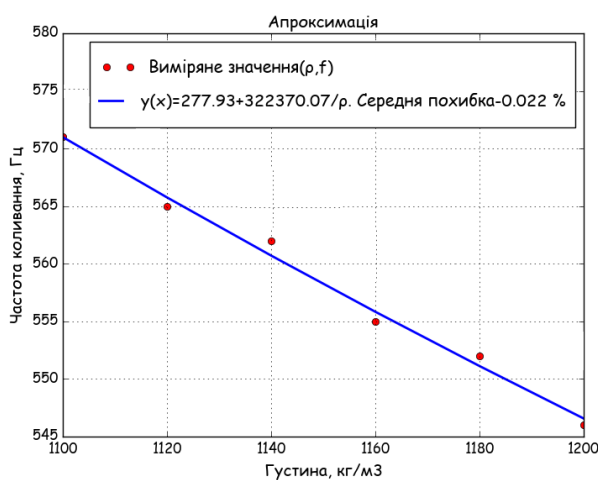


Рисунок 2– Залежність частоти коливання резонатора (сталева ємність), що збуджується природною коливальною системою від густини газорідного середовища.

У зв'язку з цим було поставлено мету в експериментальних умовах дослідити залежність частоти коливання резонатора апарату, що виготовлений з органічного скла від густини газорідного середовища для використання отриманих даних в проектуванні ємностей та резервуарів технологічних апаратів.

В експериментальній установці (рис.1) було замінено сталеву трубу на ємність з поліметилметакрилату (ПММА) ($\rho_r=1200 \text{ кг/м}^3$, модуль пружності скла $E=3300 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$). Довжина труби $l=0,5\text{м}$, внутрішній діаметр $d=0,198\text{м}$, товщина стінки $h=2 \cdot 10^{-3}\text{м}$. Результати досліджень приведені на рис. 3.

Методологія експериментальних досліджень була подібна до попередніх. Крива, отримана за експериментальними значеннями була

апроксимована з застосуванням гіперболічної апроксимації рівнянням виду $f=116,57+139519,84/\rho$ (рис.3). Середня похибка апроксимації не перевищує 0,05%. (рис.3).

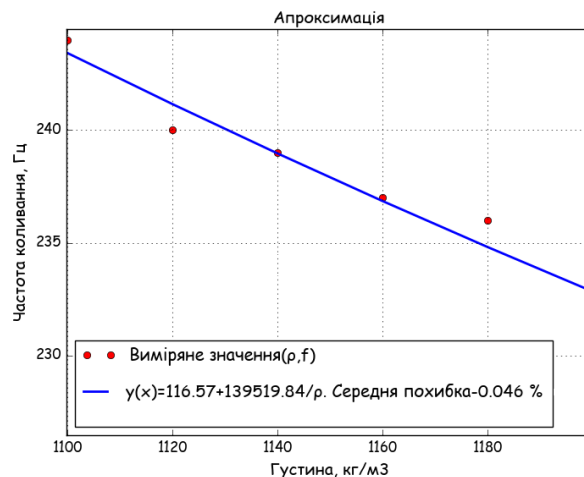


Рисунок 3– Залежність частоти коливання резонатора (ємність з ПММА), що збуджується природною коливальною системою від густини газорідного середовища.

Отримані дані підтверджують можливість використання частини технологічного апарату в якості механічного резонатора для реалізації віброчастотного методу контролю в умовах вібрації. Дослідження з використанням сталевих ємностей та ємностей з органічного скла підтверджують широку застосовуваність методу контролю.

ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах на моделях технологічних апаратів з барботажем, виготовлені з матеріалів з різною густиною підтверджують наявність детермінованого зв'язку вимірюваних частотних характеристик резонатора з густиною, яка вимірювалась всередині устаткування. Отримані дані використано для розробки науково-методичних засад віброчастотного методу контролю в умовах вібрації з використанням частини апарату в якості резонатора віброчастотного давача.

Список використаних джерел

1. Дивин А. Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев, Г. В. Мозгова // Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО ТГТУ. – 2012. – 273с.
2. Жуков Ю.П. Вибрационные плотномеры/ Ю.П. Жуков // М.: Энергоатомиздат.–1991.–342 с.
3. Ермолаев А. Н. Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред / Ермолаев А. Н., Мельничук О. В. //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. – №. 4.– С.92–96.
4. Oliynyk, O. Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator [Text] / O. Oliynyk, Yu. Taranenko, A. Shvachka, O. Chorna // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol.85. – P. 56-60. doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93335
5. Митрофанов С.В. Методы вибрационного контроля оборудования / С.В. Митрофанов, А.С. Сташкевич //Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. – 2014. – С. 369–372.
6. Васілевський О.М. Інформаційно-вимірвальна система оцінювання віброметричних параметрів роторних систем / О.М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, О.Г. Ігнатенко // Наукові праці ДонНТУ. Серія „Обчислювальна техніка та автоматизація”.– 2006. –Т. 107.–С.154–158.
7. Измерители плотности и концентрации: сайт // Москва, 2019. URL: http://boppreuther.ru/Dokumentation/P403_002_russ_DIMF.pdf (дата звернення 20.06.2019).
8. Каталог приборов компании Novolab: сайт // Новосибирск, 2019. URL: <https://www.novolab.ru/catalog/plotnomer/>(дата звернення 18.06.2019).
9. Плотномер 804. Руководство по эксплуатации: сайт // Ростов на Дону, 2019. URL: <https://www.piezoelectric.ru/files/804OwnerManual.pdf> (дата звернення 22.06.2019).
10. Компания Emerson: сайт // Москва, 2019. URL: http://www.vsp-co.org/assets/emerson_brochure1_0418.pdf (дата звернення 24.06.2019).
11. Прецизионный термометр на основе пьезочастотных датчиков температуры для промышленного применения: сайт // Москва, 2019. URL: <https://303421.selcdn.ru/soelupload/clouds/1/iblock/bf1/bf18e7fefabf28f58ad1c1c961a939ba/200606056.pdf>. (дата звернення 18.06.2019).
12. Оборудование Nivelco: сайт // Харьков, 2019. URL:<https://trade-control.com.ua/catalog/nivelco>. (дата звернення 24.06.2019).
13. Вискозиметр вибрационный: сайт // Москва, 2019. URL: <https://www.diam.ru/lab/viskozimetry/ad-sv-10-viskozimetr-vibracionnyj-sv-10/> (дата звернення 21.06.2019).
14. А.С. №1187014, МПК G01 N 9/00. Камертонный плотномер для жидких сред/ Тараненко Ю.К., Снегур В.И. заявл. 27.03.78; опубл. 25.06.80, Бюл. № 23. – 3 с.
15. Михайлов С. Ю. Выбор материала для изготовления моделей резервуаров / С. Ю. Михайлов, Е. В. Попова, Д. А. Гретченко // Нефть и газ. Новые технологии в системе транспорта. - 2004. - С. 6-9.

References

1. Divin A. G. Metody i sredstva izmereniy, ispytaniy i kontrolya: uchebnoe posobie / A. G. Divin, S. V. Ponomarev, G. V. Mozgova. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO TGTU, 2012. 273p.
2. Zhukov Yu.P. Vibratsionnyie plotnomeryi. M.: Energoatomizdat, 1991. 342p.
3. Ermolaev A. N., Melnichuk O. V. Sovremennyye sredstva izmereniya plotnosti zhidkih dispersnyih sred. Elektrotehnicheskie i informatsionnyie kompleksyi i sistemyi. 2017. Vol. 13. no. 4. P.92–96.
4. O. Oliynyk, Yu., Taranenko, A. Shvachka, O. Chorna. Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator [Text]. EasternEuropean journal of enterprise technologies. 2017. Vol.85. P. 56-60. doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93335
5. Mitrofanov S.V., Stashkevich A.S. Metodyi vibratsionnogo kontrolya oborudovaniya. /Universitetskiy kompleks kak regionalnyiy tsentr obrazovaniya, nauki i kulturyi. 2014. P. 369–372.
6. O.M. Vasilevskiy, V. Yu. Kucheruk, O.G. Ignatenko. InformatsIynovimIryuvalna sistema otsIynuvannya vIbrometrichnih parametrIv rotornih sistem. NaukovI pratsI DonNTU. SerIya

- „Obchislyuvalna tehnika ta avtomatizatsiya”.2006. Vol. 107. P. 154–158.
7. Izmeriteli plotnosti i kontsentratsii: sayt. Moskva, 2019. URL: http://boppreuther.ru/Dokumentation/P403_002_russ_DIMF.pdf (data zvernennya 20.06.2019).
8. Katalog priborov kompanii Novolab: sayt. Novosibirsk, 2019. URL: <https://www.novolab.ru/catalog/plotnomer/>(data zvernennya 18.06.2019).
9. Plotnomer 804. Rukovodstvo po ekspluatatsii: sayt // Rostov na Donu, 2019. URL: <https://www.piezoelectric.ru/files/804OwnerManual.pdf> (data zvernennya 22.06.2019).
10. Kompaniya Emerson: sayt // Moskva, 2019. URL: http://www.vsp-o.org/assets/emerson_brochure1_0418.pdf (data zvernennya 24.06.2019).
11. Pretsizionnyiy termometr na osnove pezochnostnykh datchikov temperatury dlya promyshlennogo primeneniya: sayt. Moskva, 2019. URL: <https://303421.selcdn.ru/soelupload/clouds/1/iblock/bf1/bf18e7fefabf28f58ad1c1c961a939ba/200606056.pdf>. (data zvernennya 18.06.2019).
12. Oborudovanie Nivelco: sayt // Harkov, 2019. URL:<https://trade-control.com.ua/catalog/nivelco>. (data zvernennya 24.06.2019).
13. Viskozimetr vibratsionnyiy: sayt. Moskva, 2019. URL: <https://www.diam.ru/lab/viskozimetry/ad-sv-10-viskozimetrvibracionnyj-sv-10/>(data zvernennya 21.06.2019).
14. A.S. no1187014, MPK G01 N 9/00. Kamertonnyiy plotnomer dlya zhidkikh sred/ Taranenko Yu.K., Snegur V.I. zayavl. 27.03.78; opubl. 25.06.80, Byul. 23. 3 p.
15. Vyibor materiala dlya izgotovleniya modeley rezervuarov / S. Yu. Mihaylov, E. V. Popova, D. A. Gretchenko. Neft i gaz. Novyie tehnologii v sisteme transporta. 2004. P. 6-9.