

УДК: 620.179:534.8 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.10

**В.А. Мащенко<sup>1</sup>, В.В. Кривцов<sup>2</sup>, В.П. Квасніков<sup>3</sup>***Одеська державна академія технічного регулювання та якості<sup>1</sup>**Рівненський державний гуманітарний університет<sup>2</sup>**Національний авіаційний університет<sup>3</sup>***ЧАСТОТНО-ТЕМПЕРАТУРНІ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ**

*Резонансним методом зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка на звукових частотах у широкому діапазоні температур проведено вимірювання дійсної частини динамічного модуля пружності та тангенса кута механічних втрат конструкційного полівинілхлориду. Показано, що для амплітуд резонансних максимумів послідовних мод коливань зразків існує лінійна залежність.*

*Ключові слова:* амплітуда коливань, резонансна крива, рівняння регресії.

**В.А. Мащенко, В.В. Кривцов, В.П. Квасніков****ЧАСТОТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА**

*Резонансным методом сдвиговых колебаний свободного конца закрепленного образца на звуковых частотах в широком диапазоне температур проведены измерения действительной части динамического модуля упругости и тангенса угла механических потерь конструкционного поливинилхлорида. Показано, что для амплитуд резонансных максимумов последовательных мод колебаний образцов существует линейная зависимость.*

*Ключевые слова:* амплитуда колебаний, резонансная кривая, уравнение регрессии.

**V. Mashchenko, V. Krivtsov, V. Kvasnikov****FREQUENCY-TEMPERATURE MEASUREMENTS OF THE DYNAMIC MODULE OF ELASTICITY OF CONSTRUCTIONAL ON POLYVINYL CHLORIDE**

*The resonance method of the shear oscillation of the fixed sample at sound frequencies in a wide range of temperatures measured the real part of the dynamic modulus of elasticity and the tangent of the mechanical loss angle of constructional polyvinyl chloride. It is shown that there is a linear dependence for the amplitudes of the resonant maxima of the sequential modes of oscillations of the samples.*

*Keywords:* oscillation amplitude, resonance curve, regression equation.

**Постановка проблеми.** Полімерні матеріали широко застосовуються в різних технічних системах, зокрема, для зниження вібрації у конструкціях за допомогою поглинання механічної енергії або ізоляції елементів конструкції, пов'язаних із перетворенням, передачею і поглинанням механічної енергії. Крім цього, вирішення інженерної задачі зменшення маси конструкцій за рахунок використання полімерних матеріалів, які працюють у жорстких динамічних полях напруг при ударно-імпульсному навантаженні, вимагає визначення їх в'язкопружних властивостей.

Дисипації енергії, що мають місце на рівні структурної організації полімерних матеріалів, можуть бути виміряні за зсувом фаз між напругою і деформацією, яка виникає в таких матеріалах при динамічному навантаженні. В'язкопружні властивості (комплексний динамічний модуль пружності  $E^* = E' + iE''$ , де  $E'$  – дійсна частина модуля,  $E''$  – уявна частина модуля та тангенс кута  $tg\delta$  зсуву фаз – механічних втрат, між напругою і деформацією) більшості полімерних матеріалів залежать від частоти та амплітуди напруги зовнішнього збурення, температури та попередньої деформації [1].

У вимірюваннях для визначення динамічного модуля пружності полімерних матеріалів чинне місце займають резонансні методи [2]. Експериментальні значення динамічного модуля пружності (модуля Юнга) будуть повністю надійними лише при отриманні їх із хвильових та квазістатичних експериментів, що відповідають часу навантаження порядку декількох мікросекунд – часу проходження ультразвукового імпульсу через зразок полімерного матеріалу. Результати отримані резонансними методами відповідають часовим інтервалам у мілісекундному діапазоні та можуть використовуватися для уточнення або взаємного доповнення подібних мікросекундних даних при відносно великих часах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження в'язкопружних властивостей різного типу полімерних матеріалів резонансними методами на звукових частотах представлено в роботах [3–7]. При цьому, авторами проводився комплекс вимірювань при зміні частоти збудження коливань зразків при одній температурі, або при фіксованій частоті коливань у

визначеному температурному діапазоні. Такі дослідження дещо обмежують аналіз поведінки полімерних матеріалів у температурно-динамічних полях та можливості вимірювань основних параметрів для визначення вязкопружних властивостей.

**Постановка завдань.** Метою роботи було встановити можливість практичного застосування резонансного методу зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка для частотно-температурних вимірювань дійсної частини динамічного модуля пружності та кута механічних втрат полімерного матеріалу.

**Викладення основного матеріалу.** Для експериментального визначення  $E'$  та  $tg\delta$  полімерного матеріалу використовували метод зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка у вигляді стрижня прямокутної форми на звукових частотах.

Суть методу полягає у вимірюванні амплітуди коливань ( $A$ ) вільного кінця стрижня при зміні частоти збуджуючої сили ( $F$ ), що прикладена до іншого закріпленого кінця. За вимірами величини  $|A|$  при різних частотах збудження будується резонансна крива, параметрами якої є частота коливань ( $f$ ) та відношення амплітуд ( $|A|/A_{max}$ ), де  $A_{max}$  – максимальне значення амплітуди, що відповідає головній резонансній частоті ( $f_r$ ). Для  $f_r$  визначають ширину резонансної кривої ( $\Delta f_r$ ) на рівні  $|A_{max}|/\sqrt{2}$ .

Поведінка зразка полімерного матеріалу (рис. 1) при коливаннях під дією  $F$ , що прикладається до закріпленого кінця, описується наступним диференціальним рівнянням [8]:

$$\rho \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + E^* \chi^2 \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

де  $v(x,t)$  – функція залежності поперечних зміщень точок осі стрижня від координати  $x$  та часу  $t$ ,  $\rho$  – густина полімерного матеріалу.

Розв'язком рівняння (1), із врахуванням граничних умов, є наступна рівність:

$$ch k^* l \cos k^* l + 1 = 0, \quad (2)$$

де  $k^*$  – комплексне хвильове число поперечних коливань,  $l$  – довжина стрижня.

Покладаючи  $k^* l = a + ib$ , при резонансі стрижня за умови  $b = 0$ , можна отримати перші чотири корені рівняння (2) [8]:

$$kl = 1,8751; 4,6941; 7,8548; 10,9965. \quad (3)$$

Величини  $a$  та  $b$  визначаються наступним чином:

$$a \cong \frac{\omega^2 l}{\left(\frac{E \chi^2}{\rho}\right)^{\frac{1}{4}}}; \quad (4)$$

$$b \cong \frac{1}{4} \frac{\omega^2 l}{\left(\frac{E \chi^2}{\rho}\right)^{\frac{1}{4}}} tg \delta, \quad (5)$$

причому для прямокутного стрижня  $\chi = \frac{d}{\sqrt{12}}$ ,  $d$  – товщина зразка,  $\omega$  – циклічна частота коливань.

При основній резонансній частоті  $f_r$  коливання стрижня, якій відповідає найменший за значенням корінь рівняння (2), з врахуванням (4), отримаємо співвідношення для  $E'$  [8]:

$$E' = \frac{48\pi^2 \rho l^4 f_r^2}{1,8751^4 d^2}. \quad (6)$$

Для величини  $tg\delta$  маємо наступну рівність:

$$tg\delta = \frac{\Delta f_r}{f_r}. \quad (7)$$

Вимірювання  $|A|$  для побудови резонансних кривих та визначення  $f_r$  проводили на установці, блок-схема якої наведена на рис. 2.

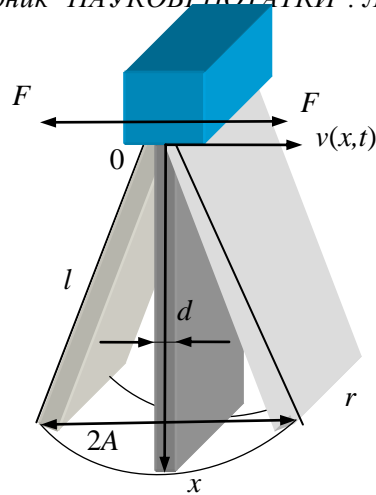


Рис. 1. Схема принципу збудження коливань вільного кінця закріпленого зразка

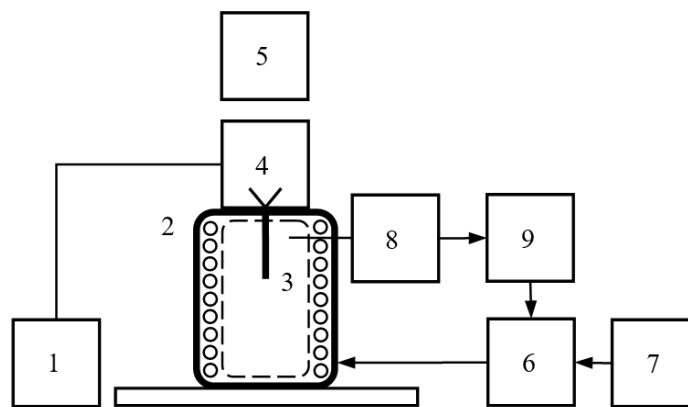


Рис. 2. Блок-схема установки для реалізації методу зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка

В експериментальній установці зразок полімерного матеріалу 3 знаходиться у повітряній термокамері 2, де жорстко закріплений одним кінцем до тяги генератора механічних коливань 5 за допомогою затискача. Термокамера має світлодіодну підсвітку та оглядові вікна для оптичного спостереження амплітуди коливань затиснутого та вільного кінців зразка. Збудження механічних коливань у зразку виконує поляризоване реле 4, живлення до якого надходить від генератора 1 Siglent SDG1010. Амплітуда коливань закріпленого кінця зразка регулюється вихідною напругою генератора.

Вимірювання амплітуди коливань можна проводити при різних температурах ( $T$ ) полімерного зразка до температури склування ( $T_c$ ). Обігрів камери електричний від автотрансформатора 7 через твердотільне Crydom H12D4825 6. Температурний режим у термокамері підтримується за допомогою термодатчика 8 та мікропроцесорного регулятора 9 МТР-8.

В процесі вимірювань за допомогою генератора змінюють частоту коливань  $f$  зразка у діапазоні 10–140 Гц з кроком 0,5 Гц. Величину  $A$  визначають за допомогою спеціального програмного забезпечення, що розпізнає зображення коливання зразка отриманого за допомогою веб-камери 5 з оптичним зумом [9]. Веб-камера з оптичним зумом дозволяє проводити збільшенні зображення коливань зразка у 10 разів. Похибка вимірювань величини  $A$  в такому випадку не перевищує 2%.

**Результати та обговорення.** Вимірювання проводили для листового конструкційного полівінілхлориду (ПВХ) марки PVC-SAW. Зразки ПВХ вирізали у вигляді пластин розміром:  $l = 30\text{--}40$  мм,  $d \leq 1$  мм та шириною  $r = 5$  мм. Густина  $\rho$  PVC-SAW рівна  $1440 \text{ кг/м}^3$  і контролювалася методом гідростатичного зважування.

Резонансні криві для зразків ПВХ при  $T = 248; 273, 298, 323$  та  $348$  К представлені на рис. 3. Криві мають декілька резонансних максимумів в області частот 10–40 Гц та головний максимум, що відповідає основній резонансній частоті  $f_r$ . Із збільшенням температури зразка основна

резонансна частота коливань зменшується в ряді від 121,5 Гц, при  $T = 248$  К, 117,5; 113; 103,5 до 89,5 Гц, при  $T = 348$  К, при цьому величина  $\Delta f_r$  відповідно зростає в ряді: 5; 6,5; 10; 21,5; 35 Гц.

Розрахунки значень  $E'$  та  $tg\delta$  для ПВХ при різних температурах за співвідношеннями (6) та (7) представлені на рис. 4. Аналіз отриманих даних показує, що із збільшенням  $T$  дійсна частина динамічного модуля пружності зменшується, при чому в діапазоні 248–323 К зміна  $E'$  від температури є лінійною від  $4,12 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup> до  $3,16 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>. При  $T = 348$  К спостерігається різке зменшення величини до  $2,24 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>, що цілком очікувано оскільки  $T_c$ , при якому полімер переходить у високоеластичний стан, рівна 353 К.

Величина тангенса кута механічних втрат ПВХ із збільшенням температури зростає від 0,04, при  $T = 248$  К, до 0,39, при  $T = 448$  К. Аналіз залежності  $tg\delta = f(T)$  показує, що її умовно можна розбити на дві лінійні ділянки з різними коефіцієнтами нахилу прямих, де точкою перегину є температура 298 К. Така залежність тангенса кута механічних втрат від температури характерна для більшості лінійних аморфних полімерних матеріалів і пов'язана з підвищенням молекулярної рухливості структурних елементів макромолекул, при цьому умовна точка перегину залежить від гнучкості макромолекул, міжмолекулярної взаємодії та природи бічних радикалів полімерного ланцюга.

Отримані значення дійсної частини комплексного модуля пружності та тангенса кута механічних втрат добре узгоджуються з результатами отриманими іншими авторами аналогічними експериментальними методами [3, 10].

Аналіз резонансних кривих (рис. 3) показав, що для амплітуд резонансних максимумів при різних частотах збудження (різних модах коливань зразків) при одній температурі характерна лінійна залежність. Для рівняння регресії у вигляді

$$\frac{|A|}{|A_{max}|} = af + b \quad (8)$$

значення величин  $a$ ,  $b$  та коефіцієнта кореляції  $R^2$  в залежності від  $T$  представлені в табл. 1. Прямі регресії (8) для різних температур із точками амплітуд резонансних максимумів представлені на рис. 5.

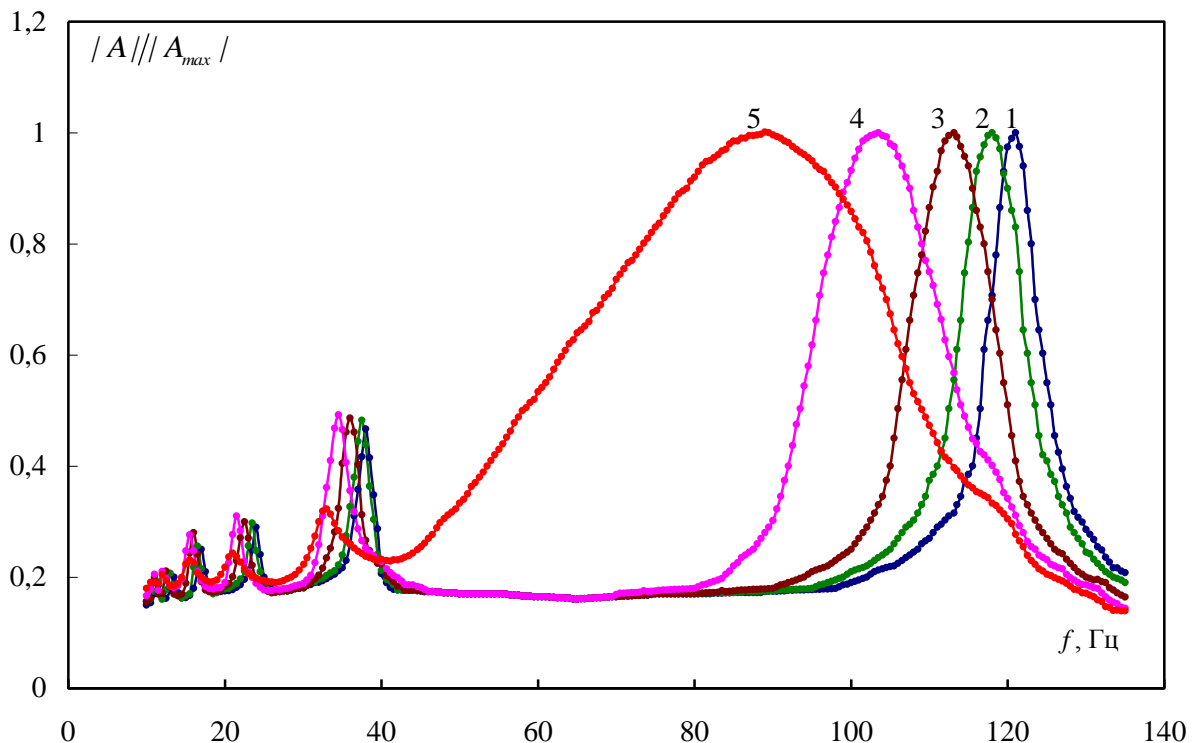


Рис. 3. Резонансні криві для зразків ПВХ в області частот 10–140 Гц при температурах: 1 – 248 К; 2 – 273 К; 3 – 298 К; 4 – 323 К; 5 – 348 К.

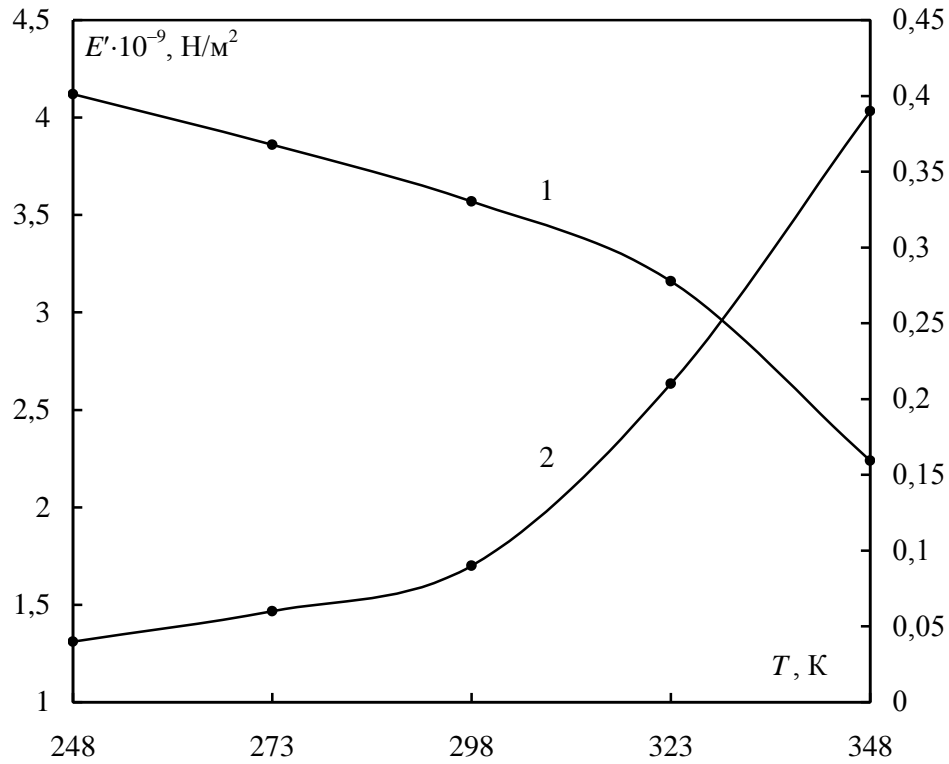


Рис. 4. Температурні залежності динамічного модуля пружності (1) і тангенса кута механічних втрат (2) для ПВХ.

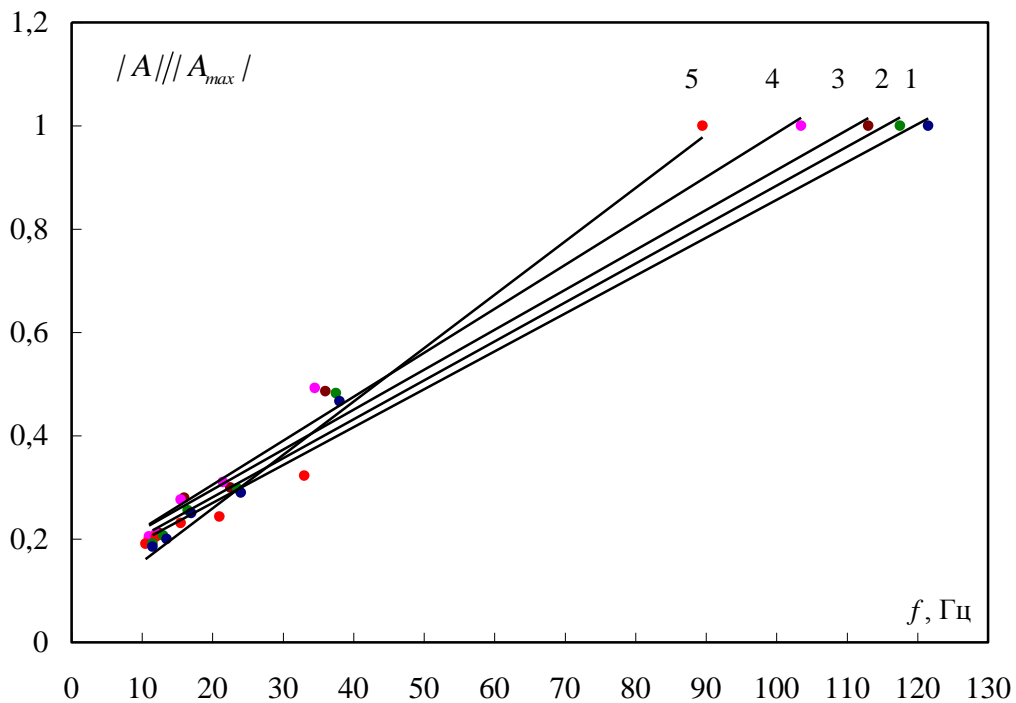


Рис.5. Прямі регресії для амплітуд резонансних максимумів зразків ПВХ в області частот 10–140 Гц при температурах: 1 – 248 К; 2 – 273 К; 3 – 298 К; 4 – 323 К; 5 – 348 К.

Значення величини  $R^2$  при всіх температурах вимірювання лежать в діапазоні від 0,983 до 0,989, причому найменше значення спостерігається для  $T = 348$  К. Окремо слід відмітити, що для вказаної температури спостерігається зменшення відносної амплітуди резонансних максимумів в області частот 15–40 Гц.

Таблиця 1.

### Параметри рівняння регресії та значення коефіцієнта кореляції

Температура, К	$a$	$b$	$R^2$
248	0,0073	0,1229	0,989
273	0,0075	0,1299	0,987
298	0,0077	0,1407	0,986
323	0,0085	0,1348	0,988
348	0,0103	0,0526	0,983

**Висновки.** Проведені частотно-температурні вимірювання показали, що резонансний метод зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка має перспективи застосування для визначення в'язкопружних параметрів конструкційних полімерних матеріалів.

Експериментальні значення дійсної частини динамічного модуля пружності конструкційного полівінілхлориду добре корелюють з результатами отриманими аналогічним методами вимірювань.

Резонансні криві дають можливість визначити дисипацію енергії при динамічному навантаженні зразків полівінілхлориду на основних частотах коливань для різних температур.

Для амплітуд резонансних максимумів при різних модах коливань зразків полівінілхлориду при однакових температура існує кореляційна лінійна залежність.

#### Список використаних джерел:

1. Перепечко И. И. Акустические методы исследования полимеров / И. И. Перепечко. – М.: Химия, 1973. – 269 с.
2. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymers / J. D. Ferry // John Wiley & Sons, INC., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1980. – 672 p.
3. Kolupaev B. B. The acoustic spectroscopy of the PVC-based composition materials in audio frequency range / B. B. Kolupaev, V. V. Krivcov, E. V. Malynovs'kii // Acoustic bulletin. – 2014. – V. 16. – N. 2. – pp. 3–7.
4. Madigosky W. M. Improved resonance technique for material characterisation / W. M. Madigosky, G. F. Lee // Journal of the Acoustical Society of America. – 1983. – V. 73. – N. 4. – pp. 1374–1377.
5. Buchanana J. L. Numerical solution for the dynamic moduli of a viscoelastic bar / J. L. Buchanana Journal of the Acoustical Society of America. – 1987. – V. 81. – N. 6. – pp. 1775–1786.
6. Sound and Vibration Damping with Polymers / J. J. Dlubac, G. F. Lee, J. V. Duffy, R. J. Deigan, J. D. Lee. Edited by R. D. Corsatro and L. H. Sperling // ACS Symposium Series. – 1990. – No. 424. – pp. 49–62.
7. Simple vibrating reed apparatus for determination of thin film elastic modulus / F. Gamboa, J. E. Corona, J. A. Hoy-Benitez, F. Aviles, A. I. Oliva, V. Sosa // 1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/265975755\\_Simple\\_vibrating\\_reed\\_apparatus\\_for\\_determination\\_of\\_thin\\_film\\_elastic\\_modulus](https://www.researchgate.net/publication/265975755_Simple_vibrating_reed_apparatus_for_determination_of_thin_film_elastic_modulus).
8. Mashchenko V. Simulation of resonance oscillations of a cantilever-fixed polymer rod/ V. Mashchenko, V. Krivtsov V. Kvasnikov // Proceedings of III International scientific and practical conference "2019: Modeling, control and information technologies" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://itconfdoc.nuwm.edu.ua/index.php/ITConf/article/view/60/29>.
9. Мащенко В. А. Інформаційна система для визначення амплітуди резонансних коливань консольно-закріпленого полімерного стрижня / В. А. Мащенко, В. В. Кривцов // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції „Технічне регулювання, метрологія, інформаційні та транспортні технології” / ред. Л. В. Коломієць, Г. Д. Братченко, В. Д. Постоварова; Одеська державна академія технічного регулювання та якості. – Одеса: Бондаренко М. О., 2019. – С. 97–99.
10. Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А. Я. Малкин. – М.: Химия, 1978. – 336 с.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019