

Б.Б. Колупаєв<sup>1</sup>, Б.С. Колупаєв<sup>2</sup>, В.В. Левчук<sup>2</sup>

## Максвеллівська релаксація і внутрішнє тертя в системі полівінілбутираль-полівінілхлорид

<sup>1</sup>Інститут кібернетики Рівненського Міжнародного економіко-гуманітарного університету ім. С. Дем'янука,  
Рівне, Україна, [BorisKolupaev@ukr.net](mailto:BorisKolupaev@ukr.net),

<sup>2</sup>Рівненський державний гуманітарний університет, Рівне, Україна, [vasyl.levchuk@rshu.edu.ua](mailto:vasyl.levchuk@rshu.edu.ua)

Досліджено максвеллівську релаксацію та внутрішнє тертя суміші аморфних полімерів: полівінілбутираль (ПВБ) – полівінілхлорид (ПВХ). Встановлено, що змінюючи температуру (Т) та вміст (φ) інгредієнтів можна регулювати величину в'язкопружних модулів, в'язкості, демпфуючої сили, дисипації енергії за рахунок максвеллівської релаксації, обумовленої дією на композит ультразвукових коливань частотою (ω) 0,4 МГц. Використання обчислювальних методів, моделей та феноменологічний підхід дозволив диференціювати ефекти релаксації і вказати шляхи оптимального поєднання в системі бажаних властивостей компонентів.

**Ключові слова:** полімер, в'язкопружність, в'язкість, релаксація.

Подано до редакції 15.10.2023; прийнято до друку 30.04.2024.

### Вступ

Еволюція процесу модифікації полімерів як перспективних матеріалів в різних галузях науки та техніки показала, що економічно вигідним і перспективним напрямом багатотоннажного виробництва є створення композитів на основі вже існуючих систем [1]. Використання суміші двох полімерів, що відрізняються своїми фізико-хімічними параметрами дозволяє отримати композит з покращеним комплексом властивостей, які відсутні у відповідних інгредієнтах. Однак, не дивлячись на те, що системи полімер-полімер інтенсивно вивчаються теоретично і експериментально, на жаль, поки що неможливо прогнозувати комплекс властивостей цих перспективних матеріалів [2]. Особливо це стосується ПВХ, який серед багатотоннажних полімерів становить найбільш значний науково-прикладний інтерес [3]. При цьому, відзначають, що для нього ще не запропоновано активних модифікаторів, які задовільняють запити промисловості [4]. Характерно, що ПВХ є зручним об'єктом дослідження, оскільки в широких межах можливі зміни його надмолекулярної

структури (НМС) під дією різномірних факторів. На його основі виготовляють близько 4500 видів матеріалів та виробів [4]. Значний науковий інтерес становить також ПВБ – карболанцюговий аморфний полімер [5], який широко використовується як матриця для виготовлення гетерогенних полімерних систем (ГПС) різномірного призначення. Відповідно, прогнозування, створення та використання суміші ПВБ та ПВХ як двох лінійних полімерів є актуальним завданням фізико-хімії полімерів.

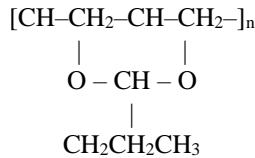
Виходячи з цього, мета роботи – використовуючи елементи теорії в'язко-пружності аморфних тіл, за допомогою ультразвукового (УЗ) методу, дослідити вплив ефектів в'язкопружності та демпфірування на максвеллівську релаксацію і внутрішнє тертя суміші лінійних полімерів (ПВБ та ПВХ). Вказати шляхи практичного використання новоствореної системи.

## I. Експериментальна частина. Об'єкти та методи дослідження

Досліджували суміш двох лінійних полімерів: пересаджений ПВХ-KSP-67-C-63 з  $MM = 1,4 \cdot 10^5$  і  $T_g = 354$  К та ПВБ марки ПШ-ДС-9439 (Лабтех) з  $MM = 5,0 \cdot 10^4$ ,  $T_g = 331$  К. Зразки готували методом гарячого пресування при  $T = 403$  К в режимі тиск – температура при тиску 10 МПа. Акустичні властивості системи досліджували на частоті  $\omega = 0,4$  МГц імпульсним методом спільно з методом обертаючої пластини при поздовжній та деформації зсуву [6]. В основу розрахунку числа мод УЗ коливань ізотропного ПВХ і ПВБ як аморфної суміші покладена теорія Клеменса-Дебая-Мезона [7].

## II. Модель. Загальні характеристики, основні поняття

ПВХ  $[CH_2-CHCl]_n$  – типовий представник лінійних гнучколанцюгових полімерів, ПВБ – карболанцюговий аморфний полімер ацеталь полівінілового спирту і масляного альдегіду



в макромолекулі містить (65 ÷ 78) % вінілбутиральних, (32 ÷ 19) % вінілспиртових і ( $\leq 3$  %) вінілацетатних ланок. В даних полімерах можуть існувати лише флуктуаційні елементи структури з кінцевим часом життя ( $\tau_i$ ) – мікроблоки (або суперсітки) [8]. В широкому температурному діапазоні макромолекули можуть проявляти різні форми рухливості [1]. В якості моделей представимо мікроблоки точковими масами  $M_i$  ( $i=1,2,3$ ) у вигляді атомних груп [5]. Згідно [1], вони об'єднані інтер- та інтрамолекулярними зв'язками через які на макрорівень передаються закодовані у конфігурації макромолекули релаксаційні властивості системи. При цьому, відповідно до принципу температурно-часової еквівалентності [1] можлива фіксація як пружного, так і в'язкого відгуку полімерної системи на дію УЗ-коливань.

Розглянемо взаємозв'язок між зміною тиску  $\Delta P$  і об'ємною деформацією  $\Delta V/V_0$  композиту ПВХ+ПВБ під дією УЗ-поля незначної інтенсивності в режимі  $\gamma(t) = \gamma_0 e^{j\omega t}$ . Для цього використаємо феноменологічний підхід визначення в'язко-пружних властивостей середовища, вказаний Максвеллом [7], який ґрунтується на комбінації в'язкої течії з пружною деформацією зсуву. При цьому час релаксації Максвелла  $\tau_i$  ототожнюємо з часом осідлого життя структурного елементу. Це дозволить описати механічні властивості в'язкопружних тіл шляхом введення коефіцієнтів в'язкості ( $R_1, R_2$ ) і в'язкопружної стисливості ( $\chi_1, \chi_2$ ). Для з'ясування

поведінки систем ПВБ+ПВХ в УЗ-полі використаємо метод електромеханічної аналогії [9]. Відповідно, визначимо співвідношення взаємозв'язку електричної напруги  $U$  та кількості електрики  $q$  у випадку кола, яке складається з опору  $R_1$ , ємності  $C_1$  з'єднаних з контуром, утвореним паралельним сполученням ємності  $C_2$  і активного опору  $R_2$ . На еквівалентній схемі заміщення Максвелла це відповідає модулям всестороннього стиску  $K_1$ , в'язкості  $\eta_1$  ПВХ, та зсуву  $G_2$  і в'язкості  $\eta_2$  ПВБ,  $C_1 = K_1^{-1} = \chi_1$ ,  $C_2 = G_2^{-1} = \chi_2$ ;  $R_1 = \eta_1$ ,  $R_2 = \eta_2$ .

Проведемо розрахунок даного кола з врахуванням наявності гармонічних УЗ коливань, які є джерелом (при  $T \sim const$ ) зовнішнього тиску  $P$ . Паралельне з'єднання  $C_2 R_2$  еквівалентне комплексному опору  $Z_2$ , де після відповідних математичних розрахунків маємо:

$$Z_2 = \frac{R_2(1-j\omega\tau_2)}{1+\omega^2\tau_2^2}, \quad (1)$$

$j = \sqrt{-1}$ ;  $\tau_2 = R_2 C_2$  – час максвеллівської релаксації, який характеризує механізм енергообмінних процесів в ПВБ. Розрахунок величини  $Z_3$  та  $Z_4$  як комплексних опорів послідовного з'єднання ємнісного опору конденсатора  $C_1$  і опору  $R_1$  з  $Z_2$ , показує, що

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2 - j\omega C_2 R_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2}, \quad (2)$$

та

$$Z_4 = R_1 + Z_3 = \frac{(R_1 + R_2) + \omega^2 R_1 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2} - j \frac{1 + \omega^2 R_2^2 C_2 (C_1 + C_2)}{\omega C_1 (1 + \omega^2 \tau_2^2)} \quad (3)$$

Наявність дійсної ( $R_e$ ) та уявної ( $I_m$ ) частини величини опору  $Z_4$  дозволяє розрахувати внутрішню тертя як дисипацію енергії процесу деформації систем ПВБ+ПВХ:

$$tg \delta = \frac{R_e(Z_4)}{I_m(Z_4)} = \frac{\eta'}{\eta''} = \frac{1 + \omega^2 R_2^2 C_2 (C_1 + C_2)}{\omega C_1 [(R_1 + R_2) + \omega^2 R_1 \tau_2^2]} \quad (4)$$

де

$$Z_4 = \eta = \eta' - j\eta'' \quad (5)$$

комплексна в'язкість композиту, а

$$\eta' = \frac{(R_1 + R_2) + \omega^2 R_1 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2} \quad (6)$$

його дійсна частина та

$$\eta'' = \frac{1 + \omega^2 R_2^2 C_2 (C_1 + C_2)}{\omega C_1 (1 + \omega^2 \tau_2^2)} \quad (7)$$

уявна частина. Комплексна в'язкість характеризується відношенням напруги зсуву до швидкості деформації системи [7]. Використовуючи перетворення Ейлера [1], співвідношення (5) представимо як

$$\eta = |\dot{\eta}| e^{j(\delta - 90^\circ)}, \quad (8)$$

де  $|\dot{\eta}| = (\eta^2 + \eta'^2)^{1/2}$ . Для чисто пружного тіла  $\delta = 0$ , для рідин  $\delta = 90^\circ$ , а в даному випадку  $0 < \delta < 90^\circ$ , тобто система ПVB+ПВX являє собою в'язкопружне тіло [7].

Проаналізуємо співвідношення (4) для випадку, коли  $C_1 \ll C_2$  і  $R_1 \gg R_2$ . Після відповідних математичних перетворень, маємо, що

$$tg\delta = \frac{1}{\omega\tau_1}, \quad (9)$$

де  $\tau_1 = R_1 C_1$  – час максвеллівської релаксації ПВX.

Співвідношення (9) підтверджує висновок про те, що система ПVB+ПВX при механічній поведінці в УЗ-полі характеризується суперпозицією пружних і в'язких сил, тобто є в'язкопружним матеріалом [7]. Згідно Максвелла, час релаксації системи ( $\tau_i$ ) визначимо як [7]:

$$\tau_i = \frac{\text{в'язкість}}{\text{модуль зсуву}} = \frac{\eta}{G}. \quad (10)$$

Розгляд співвідношень (6) та (7) показав, що вони набувають виду:

$$\eta' = \frac{(R_1+R_2)+\omega^2\tau_2^2 R_1}{1+\omega^2\tau_2^2}, \quad (11)$$

$$\eta'' = \frac{1+\omega^2\tau_2^2+\omega^2\tau_2\tau_{12}}{\omega C_1(1+\omega^2\tau_2^2)}, \quad (12)$$

де  $\tau_{12} = R_2 C_1$  – час релаксації, обумовлений структурною взаємодією ПВX з ПVB в системі. Розглянемо граничні умови змін величин  $R_i$  та  $C_i$  ( $i=1,2$ ) для випадку домінування властивостей ПVB і/або ПВX в композиті. Так, у випадку  $R_1 > R_2$ , рівняння (11) набуває виду

$$\eta' = \eta_1 = R_1, \quad (13)$$

Враховуючи, що система ПVB+ПВX являє собою в'язкопружне тіло і володіє в'язкістю  $\dot{\eta} = \dot{G}/j\omega$ , маємо:  $C_2 \gg C_1$  (де  $C_1 = 1/G_1$ ;  $C_2 = 1/G_2$ ). Таким чином,

$$\eta'' = \eta_2 = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{G_1''}{\omega}, \quad (14)$$

тобто  $\dot{\eta} = \eta_1 - j\eta_2$ .

У випадку виконання умови  $C_1 \gg C_2$  і  $R_1 \gg R_2$ , міркуючи аналогічно до (13), (14), маємо

$$\eta' = \eta_2 = R_2, \quad \eta'' = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{G_2''}{\omega}, \quad (15)$$

Тобто, в залежності від домінування впливу ПVB (2) або ПВX (1) на величину енергетичної та ентропійної взаємодії в системі ПVB+ПВX, в'язкопружні властивості композиту можна змінювати в широкому діапазоні  $\eta$ ,  $G$ ,  $K$  при  $T$ ,  $\omega = \text{const}$ . При цьому для ПVB+ПВX величина внутрішнього тертя, згідно співвідношення (4), дорівнює  $tg\delta_{12} = \Psi(\tau_{21}^{-1})|_T$ , де  $tg\delta_1 < tg\delta_{12} < tg\delta_2$

при  $293 \text{ K} \leq T \leq T_{g2} \leq T_{g1}$ , а  $T_{g1}$ ,  $T_{g2}$  – температури склування ПВX і ПVB, відповідно. Використовуючи електричну аналогію до механічних моделей в'язкопружних тіл [9], маємо, що  $q_1 = \sum_{i=5} q_i$ , де  $q_1$  – величина кількості електрики, яка проходить через  $R_1$  і відповідає  $q_2(R_2 C_2)$ ;  $q_3(C_1)$ ;  $q_2 = q_4 + q_5$ , у випадку контура  $R_2 C_2$ ,

$$\frac{dq_4}{dt} R_2 = \frac{q_5}{C_2};$$

а спаду напруг,  $U(C_2)=U(R_2)$ , опишемо у вигляді однорідного диференціального рівняння:

$$-\frac{d(q_2-q_4)}{dt} R_2 = \frac{q_2-q_4}{C_2}, \quad (16)$$

розв'язок якого за початкових умов  $t = 0$  показує, що

$$q_4 = q_2(1 - e^{-t/\tau_2}); \quad q_5 = q_2 e^{-t/\tau_2}. \quad (17)$$

Для визначення кількості електрики  $q_2$  та  $q_3$ , як частин від загальної кількості  $q_1$ , що проходить через ділянку  $R_1$ , використаємо відповідні інтегрально-диференціальні рівняння, розв'язуючи які, отримаємо, що

$$q_2 = q_1 \left( \frac{t}{\tau_2} \right) e^{-C_1/C_2}; \quad q_3 = q_1 \left( 1 - \frac{t}{\tau_2} e^{-C_1/C_2} \right). \quad (18)$$

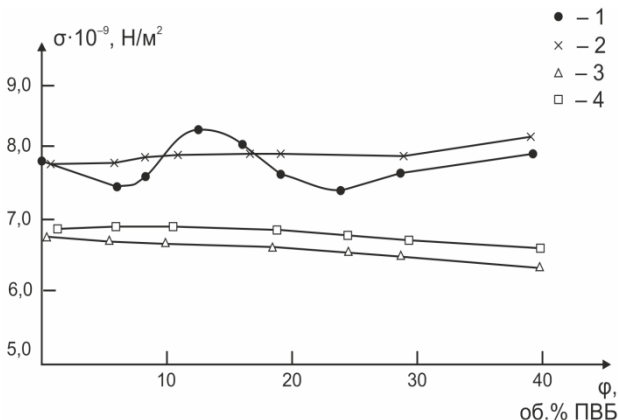
Таким чином, в ПVB+ПВX системі за період дії ( $T_0$ ) УЗ-поля відбувається перерозподіл деформаційних процесів, які, згідно запропонованої моделі, еквівалентні початковому заряду  $q_1$ , мають релаксаційний характер, будучи функцією часу ( $t$ ). При  $0 \leq t \leq T_0$ , згідно закону Кірхгофа, повний заряд  $q_1$  зберігається (співвідношення 17, 18). Це зауваження набуває суттєвого значення при розгляді питання зміни деформації ( $\varepsilon$ ) композиту під час дії на нього УЗ-поля. Враховуючи, що заміщення електричної моделі на механічну дозволяє використати взаємозв'язок між повною зміною тиску  $\Delta p$  і об'ємною деформацією тіла, які описуються попередніми рівняннями, отримуємо додаткову «релаксаційну» деформацію, яка долучається до об'ємної та зсуву. Тобто з рівнянь (17), (18) слідує, що

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \left( \frac{t}{\tau_2} \right) e^{-C_1/C_2}; \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_1 \left( 1 - \frac{t}{\tau_2} e^{-C_1/C_2} \right). \quad (19)$$

### III. Результати та їх обговорення

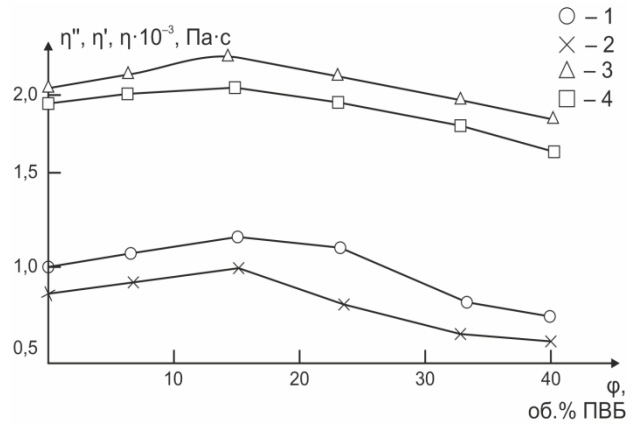
Результати представлені на рис. 1 показують, що по мірі збільшення вмісту ПVB в ПВX в межах  $0 < \varphi < 40,0$  об. % залежність величини  $G$  нелінійно змінюється, маючи тенденцію до зменшення. В процесі змін величини модулів в області вмісту 12,0 об. % ПVB спостерігаються максимальні значення величини  $G$ , а для композитів, які містять 23,0 об. %, його величина (при  $T = 319 \text{ K}$ ) відповідає мінімуму. Слід зауважити, що значення модуля при  $\varphi = 12,0$  об.% ПVB перевищує відповідні характеристики для вихідного ПВX. Це вказує на те,

що між структуроутвореннями ПВХ і ПВБ виникає енергетичний та ентропійний зв'язок [10]. Досліджуваний ПВБ містить гідроксильні, ацетатні, бутиральні групи, а макромолекула має диполі С–Н (79,60 %); О–Н (10,40 %); С–О (10,0 %), наявність яких забезпечує значення сили одиначної взаємодії їх з структуроутвореннями макромолекули ПВХ [CH<sub>2</sub>СНСІ], відповідно 5,56; 15,70; 20,80; ·10<sup>-9</sup>, Н [11]. Це знаходить свій прояв у характеристиці зміни величини *G*, *K* системи. На рис. 2 представлені значення величини в'язкості зсуву  $\eta$  та об'ємної в'язкості  $\eta'$ , які залежать від вмісту ПВБ в ПВХ. Концентраційна залежність  $\eta(\varphi)_T$  характеризується максимумом при  $\varphi = 12$  об. % і мінімумом значень в області 40,0 об. %. При цьому слід зауважити, що в діапазоні 6,0 < $\varphi$ < 12,0 об. % коефіцієнт  $(d\eta/d\varphi)_T$  складає 1,1 (Па·с)/об.%, а при 12,0 < $\varphi$ < 40,0 об. % – від'ємний, і становить 0,9. Коефіцієнт зміни величини  $\eta'$  з концентрацією складає 0,8 (Па·с)/об.% для *G* 6,0 ÷ 12,0 об. % ПВБ і – 0,5 (Па·с)/об.% при концентрації 12,0 ÷ 32,0 об. %. Слід зауважити, що в розглянутій області вмісту ПВБ значення динамічної в'язкості зсуву системи менші ніж для вихідного ПВХ ( $\eta$  – ПВХ при  $T = 300$  К становить 289 Па·с). Проте при 0 ≤  $\varphi$  ≤ 12,0 об. % маємо, що  $\eta$  системи більше  $\eta$  ПВБ. Такий характер залежності  $\eta$  від  $\varphi$  вказує на те, що структура композиту не однорідна, зазнаючи різної величини деформації під дією УЗ коливань  $\omega = 0,4$  МГц. Знаючи величину об'ємної та в'язкості зсуву, оцінимо динамічну ( $\eta''$ ) в'язкість системи ПВБ-ПВБ як  $\eta'' = 4/3 \eta + \eta'$  [7]. Аналіз отриманих результатів (рис. 2) вказує на нелінійний характер залежності  $\eta'' = f(\varphi)_T$ .



**Рис.1.** Концентраційні залежності величини в'язкопружного модуля систем ПВБ+ПВХ: при  $T=319$  К, 1 –  $\sigma$ -експеримент; 2 – розрахунок; при  $T=325$  К; 3 –  $\sigma$ -експеримент; 4 –  $\sigma$ - розрахунок.

При розгляді процесу теплової активації системи необхідно також враховувати зміну ефективної довжини *l* кінетичних одиниць структури ПВБ+ПВХ, які приймають участь в енергообмінних процесах композиту. Відомо [7], що коли сегмент довжиною *l*, приймає конфігурацію з енергією  $E \geq E_0$  (де  $E_0$  –



**Рис. 2.** Концентраційна залежність величини динамічної зв'язкості систем ПВБ+ПВХ: при  $T = 310$  К, 1 –  $\eta$ -експеримент; 2 –  $\eta'$ -експеримент; 3 –  $\eta''$ -експеримент; 4 –  $\mu''$ -розрахунок.

повна теплова енергія по теорії Дебая [9]) він створює додатковий внесок в величину внутрішнього тертя, забезпечуючи зміну величини деформації тіла. Враховуючи, що ймовірність перебування такого сегмента з більш високою конфігураційною енергією задовільняє рівнянню Больцмана [1], збільшення температури викликає підвищення не лише локальної, але і сегментальної рухливості елементів структури композиту. Це знаходить свій прояв у збільшенні величини деформації системи, яка має (згідно рівняння 19) релаксаційну природу. Знання структурно-чутливих характеристик ( $\eta$ ,  $\tau$ ) композиту дозволяє визначити величину *l* як [12]

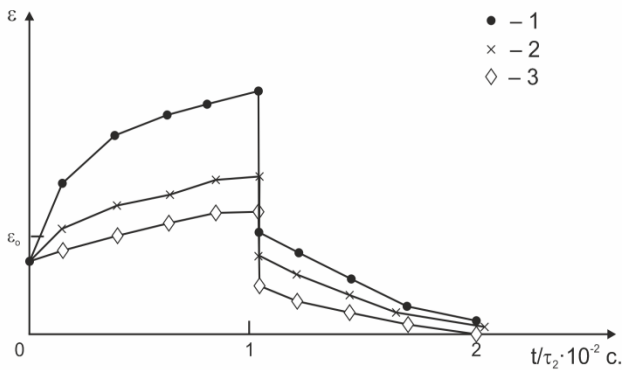
$$l = \left( \frac{4kT\tau}{\pi\eta} \right)^{1/3}, \quad (20)$$

та з'ясувати її участь у процесі деформації системи в залежності від *T* та  $\varphi$ . Взавши за основу температурні зміни величини *l*, представимо кількісний зв'язок між об'ємом елемента структури *V* (де  $V = Sl$ , *S* – площа поперечного перерізу макромолекули, згідно моделі Кірквуда-Райзмана [9] і внутрішнім тиском *P* композиту при  $T < T_{g2}$  у вигляді лінійного співвідношення [10]

$$P = -K\varepsilon, \quad (21)$$

де  $\varepsilon = \Delta V/V$  – відносна незначна зміна об'єму композиту; *K* – модуль всестороннього стиску системи при сталій температурі. Під дією тиску УЗ хвилі відбувається процес своєрідної механічної модуляції внутрішнього тиску системи, що проявляється у зміні величини деформації композиту (рівняння 19), яка носить релаксаційний характер (рис. 3). При цьому величина деформації  $\varepsilon_1$  відповідає зміні заряду  $q_1$  від часу (при  $\omega = 0,4$  МГц) містить пружну складову  $\varepsilon_0 = (1/K)P_0 e^{j\omega t}$ , яка виникає в момент включення джерела УЗ коливань. В подальшому, за  $t = T_0/4$  ( $T_0 = 2\pi/\omega$ ), при знятті напруги *P*, вона перетворюється на в'язкопружну, релаксуючи по закону виду (19). Оскільки час релаксації  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_{21}$  залежить не лише від *R*, *C*, але згідно закону Ареніуса [9], і температури, це знаходить свій прояв у зміні

величини в'язкопружних параметрів ( $K$ ,  $G$ ,  $\varepsilon$ ,  $\text{tg } \delta$ ) композиту (рис. 1, 2, 3).



**Рис. 3.** Залежність деформації  $\varepsilon$  від часу дії УЗ поля тиск при  $t=0$  прикладений і знову знімається в момент  $0 \leq t \leq \tau_0$  на систему ПVB+ПВХ: при  $T=300$  K, 1 – 1-  $\varepsilon_4$ ; 2 – 2-  $\varepsilon_2$ ; 3 – 3-  $\varepsilon_3$ .

## Висновки

Виконані дослідження показали, що новостворені системи на основі суміші аморфних полімерів ПVB і ПВХ, які різко відрізняються температурами склування, володіють комплексом в'язкопружних

властивостей, які можна напрямлено регулювати. Встановлено, що під дією ультразвукового поля, використовуючи феноменологічний підхід та метод електромеханічної аналогії, система володіє максвеллівською релаксацією та внутрішнім тертям в процесі об'ємної, поздовжньої, деформації зсуву. Деформаційні процеси мають релаксаційну природу, обумовлену не лише власним часом релаксації  $\tau_1$  (ПVB) та  $\tau_2$  (ПВБ), але і ефективним часом релаксації  $\tau_{21}$  елементів композиту. За рахунок цього виникає додатковий релаксаційний модуль об'ємного стиску, а початкова, чисто пружна деформація УЗ коливань, вироджується у в'язкопружну. Це дозволяє прогнозувати умови створення композиту, комплекс його в'язкопружних властивостей і умови експлуатації в зовнішніх температурних та динамічних механічних полях.

**Колупаєв Б.Б.** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри інформаційних систем і обчислювальних методів;

**Колупаєв Б.С.** – доктор хімічних наук, професор кафедри фізики, астрономії та методики викладання;

**Левчук В.В.** – доцент кафедри фізики, астрономії та методики викладання.

- [1] L.A. Bulavin. Physics of polymers (VCP KNU Taras Shevchenko National University of Kyiv at the national academy of sciences of Ukraine, Kyiv, 2004).
- [2] V.V. Nyzhnyk, T.Y. Nyzhnyk. Physical chemistry of polymers (Phytosociocentre, Kyiv, 2009).
- [3] S.Y. Frenkel, I.M. Tsygelyny, B.S. Kolupaev, Molecular Cybernetics (Svit, Lviv, 1990).
- [4] Kolupaev B.B. Investigation of the viscoelastic properties of metal-pigmented polyvinyl chloride by the potentials of the inter- and intramolecular interactions occurring in it, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 80, 188 (2007); <https://doi.org/10.1007/s10891-007-0026-8>.
- [5] Yu.S. Lipatov, Hybrid binders in polymer composites. Peculiarities of structure and properties conditioned by microphase separation, Pure Appl. Chem., 57, 11, 1691 (1985); <http://dx.doi.org/10.1351/pac198557111691>
- [6] B.B. Kolupaev, Dissipation of energy of stress waves in flexible chain polymeric systems, Lviv University Bulletin. Physical Series. 41, 131 (2008); [https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/41\\_18.pdf](https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/41_18.pdf).
- [7] W. Mason, Properties of polymers and nonlinear acoustics/ Academic press New York, London, - 1965. W. P. Mason, Properties of Polymers and Nonlinear Acoustics (Acad. Press, New York, London, 1964)
- [8] B.B. Kolupaev, V.V. Klepko, E.V. Lebedev, V.V. Levchuk, Yu.R. Maksimtsev, B.S. Kolupaev, Contribution of thermal fluctuations to thermophysical properties of modified poly(vinyl chloride), Polym. Sci. Ser., A 57, 139 (2015); <https://doi.org/10.1134/S0965545X15020078>.
- [9] B.S. Kolupaev, Relaxation and thermal properties of filled polymer systems (Vyshcha Shkola, Lvov, 1980).
- [10] B.B. Kolupaev, B.S. Kolupaev, V.V. Levchuk, Y.R. Maksymtsev, V.O. Sidletskyi, Deviation modulus of compressibility of metal-nanodispersed polymer systems, Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 15 (2) 235 (2017); [https://www.imp.kiev.ua/nanosys/ua/articles/2017/2/nano\\_vol15\\_iss2\\_p0235p0250\\_2017\\_abstract.html](https://www.imp.kiev.ua/nanosys/ua/articles/2017/2/nano_vol15_iss2_p0235p0250_2017_abstract.html).
- [11] V.P. Pryvalko Properties of polymers in the block state: Naukova Dumka. - 1984.-330 p.
- [12] B.B. Kolupaev, B.S. Kolupaev, Relationship Between the Thermal Conductivity and Viscoelastic Properties of Polyvinylchloride Filled with Nanodispersed Metal. J Eng Phys Thermophy 92, 271 (2019); <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01930-w>.

## Maxwellian relaxation and internal friction in the polyvinyl butyral-polyvinyl chloride system

<sup>1</sup>*Institute of Cybernetics, Academician Stepan Demianchuk International University of Economics and Humanities, Rivne, Ukraine, [BorisKolupaev@ukr.net](mailto:BorisKolupaev@ukr.net)*

<sup>2</sup>*Rivne State University of Humanities, Rivne, Ukraine, [vasyl.levchuk@rshu.edu.ua](mailto:vasyl.levchuk@rshu.edu.ua)*

The Maxwellian relaxation and internal friction of a mixture of amorphous polymers: polyvinyl butyral (PVB) - polyvinyl chloride (PVC) are studied. It has been found that by changing the temperature (T) and content ( $\varphi$ ) of the ingredients, it is possible to control the value of viscoelastic moduli, viscosity, damping force, and energy dissipation due to Maxwellian relaxation caused by the action of ultrasonic vibrations with a frequency ( $\omega$ ) of 0.4 MHz on the composite. The use of computational methods, models, and a phenomenological approach made it possible to differentiate the effects of relaxation and indicate the ways to optimally combine the desired properties of the components in the system.

**Keywords:** polymer, viscoelasticity, viscosity, relaxation.