

УДК 532.528:534.01

## ДИНАМІЧНА В'ЯЗКОПРУЖНІСТЬ МЕТАЛОНАНОДИСПЕРСНОГО ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ

Б. Б. Колупаєв<sup>†</sup>

*Інститут кібернетики Рівненського міжнародного  
економіко-гуманітарного університету ім. С. Дем'янчука  
вул. С. Дем'янчука, 4, Рівне, 33028, Україна*

*<sup>†</sup>E-mail: [Boris\\_Kolupaev@ukr.net](mailto:Boris_Kolupaev@ukr.net)*

*Отримано 31.01.2017*

Наведено результати дослідження динамічної в'язкопружності металонанодисперсних систем, отриманих на основі полівінілхлориду (ПВХ), в мегагерцовому діапазоні частот при температурах  $298 \text{ K} \leq T \leq T_g + 10 \text{ K}$ . На основі аналізу особливостей енергообміну між елементами структури розглянутого композиту з'ясовано механізм виникнення динамічної в'язкості та її зв'язок з максвеллівською теорією релаксаційної в'язкопружності. Встановлене аналітичне співвідношення між динамічною в'язкістю, об'ємною та зсувною деформаціями дозволяє прогнозувати поведінку ПВХ-систем у механічних та температурних полях.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** композит, в'язкість, релаксація, структурний елемент, в'язкопружність

### 1. ВСТУП

Встановлено [1], що в розбавленому розчині центральні сегменти макромолекули мають більше число полімерних сусідів, ніж елементи, які перебувають на периферії. У випадку нерозбавлених полімерів рух макромолекули при  $T < T_g$  (де  $T_g$  – температура склування) значно обмежено завдяки внутрішньому тертю [2]. Проте, тут картина дещо спрощується, оскільки кожен сегмент перебуває в однаковому оточенні, створеному іншими сегментами макромолекул полімеру. Однак, наявність сил інтрамолекулярної взаємодії, які діють при цьому, не дозволяє з'ясувати до кінця механізм виникнення динамічної в'язкопружності нерозбавлених полімерів. Зокрема, не відомо як застосувати теорію Рауза і/або Зимма [1] стосовно в'язкості розбавлених розчинів полімерів до нерозбавлених систем. У ряді випадків [3] перевагу надають теорії Рауза, використовуючи поняття мономерного коефіцієнта тертя або внутрішньої в'язкості. В цілому слід зазначити, що на відміну від розріджених газів та унарних рідин [4], молекулярно-кінетичний механізм виникнення в'язкопружності полімерів потребує подальших теоретичних розробок та експериментальних досліджень. Вихід із ситуації, що склалася, прагнуть знайти, розглядаючи дисипативні ефекти в полімерах, які

перебувають у механічному полі змінної напруги. При цьому опис процесу здійснюють за допомогою відношення складової напруги, яка перебуває у фазі з швидкістю деформації, до швидкості деформації. Ця величина має розмірність в'язкості  $\eta$  і являє собою її дійсну частину  $\eta = \eta' - j\eta''$  [1]. Встановлено [5], що в режимі періодичної деформації величина  $\eta' = \sigma''/\omega$  (де  $\sigma''$  – уявна частина модуля зсуву;  $\omega$  – циклічна частота). Проте, виникає ряд проблем, зокрема: для гетерогенних полімерних систем (ГПС) величина  $\eta$  набуває нескінченно великого значення, прагнучи до в'язкості встановленої течії [1]; необхідно розробити механічну (чи електричну) модель, шляхом введення ньютонівської і гуковської складових [5], згідно яких  $\eta' = \eta$  прагне до обмежених скінченних значень при низьких частотах; слід з'ясувати молекулярно-кінетичну природу динамічної в'язкопружності, яка проявляється в нагромадженні та розсіюванні енергії у вигляді тепла. Так, у випадку полімерів і ГПС, які деформуються змінним періодично діючим полем, матеріал проявляє проміжні властивості між твердим тілом та рідиною [6]. При цьому, для опису поведінки надмолекулярних структур необхідно попередньо охарактеризувати типи конформацій, які приймає макромолекула. Це вимагає розгляду спочатку розміщення всього ланцюга, потім окремих його частин і завершується цей процес з'ясуванням структуроутворень на рівні атомних масштабів [7]. З допомогою дослідження в'язкопружних властивостей систем вдається розв'язати ряд цих питань, однак, в цілому, вплив структуроутворень на величину динамічної в'язкості, як і дії змінних зовнішніх полів та інгредієнтів, ще до кінця не з'ясований. Особливі труднощі виникають при дослідженні композитів на основі лінійних гнучколанцюгових полімерів, які містять в якості наповнювачів нанодисперсні порошки металів. При цьому сама полімерна матриця, як переохолоджена рідина, має флуктуаційну структуру, елементи якої характеризуються кінцевим часом життя  $\tau$ , а нанодисперсний метал виступає джерелом межового шару МШ, будучи, фактично, третьою фазою [8]. Такий багатоступеневий підхід до розгляду ГПС додатково ускладнює з'ясування природи динамічної в'язкості. Проте, виходячи з феноменологічних підходів [5], трактують процес деформації полімерних систем під дією напруги зсуву як суму чисто пружної частини, яка відповідає твердому тілу, і в'язкої, характерної для рідини. При цьому поняття часу життя структурного елемента  $\tau$  є основою використання молекулярно-кінетичного підходу до аналізу феноменологічної теорії Максвелла, опираючись на яку, в якості мети роботи, з'ясуємо взаємозв'язок механізму динамічної в'язкості з релаксаційною пружністю та дисипацією енергії ГПС.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Основою для отримання композитів в режимі температура-тиск ( $T-p$ ) слугував полівінілхлорид (ПВХ) суспензійної полімеризації марки ПВХ-Л9 рецептури №6 (ЗАТ “Каустик”, Башкирстан, Російська Федерація), молекулярної маси  $1.2 \cdot 10^5$ . Нанодисперсні наповнювачі отримували двома способами. Перший – полягає в тому, що в масі полімера розміщували металевий провідник, електричний вибух (ЕВП) якого дає можливість отримати наночастинки металу з одночасним рівномірним їх розподілом в полімерній матриці. Так, у випадку мідного провідника довжиною 66 мм та перерізом (0.08...0.58) мм отримані наночастинки діаметром (45...2) нм, об'ємний вміст наповнювача регулювали ваговим методом [2]. Другим способом слугував синтез нанодиспер-

сного порошку металу, який проводили в два етапи. Перший: в ультразвуковому-полі хімічним методом (ф/х) здійснювали відновлення металу з солі з наступним промиванням колоїдної системи. Таким чином отримали металевий осад з розмірами частинок діаметром  $\leq 100$  нм. Другий етап – дану суспензію поміщали в реактор і пропускали змінний електричний струм. Вибрана напруга певної частоти забезпечувала виникнення між електродами періодичних електричних розрядів, які викликали електроерозійне подрібнення і електрогідравлічне руйнування агломератів дисперсного металу. Подальше перемішування суспензії проводили ультразвуковим полем, що забезпечувало однорідність системи і утворення наночастинок металу до  $(35 \pm 1)$  нм. Об'ємний вміст наповнювача в ПВХ варіювали в діапазоні  $0 < \varphi \leq 0.5$  об.%.  $T$ - $p$  режим здійснювали при  $T = 403$  К і  $p = 10$  МПа.

Дослідження швидкості поширення поздовжньої ( $v_l$ ) і поперечної ( $v_t$ ) ультразвукової хвилі, а також відповідних їм коефіцієнтів затухання ( $\alpha_l, \alpha_t$ ), проводили на частоті  $\omega = 0.4$  МГц з допомогою експериментальної ультразвукової установки [2]. За відомими їх значеннями розраховували величини модулів зсуву ( $G$ ) та об'ємної деформації ( $K$ ) [1].

Похибка вимірювання швидкостей відповідно складала  $(0.5 \dots 1.0)\%$ , а коефіцієнтів поглинання –  $8.0\%$ . Густина зразків  $\rho$  визначали методом гідростатичного зважування з точністю  $0.2\%$ .

### 3. МОДЕЛЬ

Розглянемо дію на ПВХ-систему ультразвукового поля частотою  $\omega$  при циклічній деформації. Виберемо в якості структурного елемента макромолекули мономерну ланку, що дозволяє, для з'ясування фізики процесу в'язкопружної деформації композиту, застосовувати елементи молекулярно-кінетичної теорії аморфних тіл, запропонованої в [9]. Крім цього, самі макромолекули, в різних температурних діапазонах, можуть проявляти певні форми рухливості, що дає можливість макроскопічному аморфному полімеру поставити у відповідність релаксаційний спектр [8]. Характерно, що, знаючи час життя структурного елемента  $\tau$ , можна, згідно принципу температурно-частотної еквівалентності (ТЧЕ) [1], фіксувати як пружний, так і не пружний відгук системи на дію зовнішнього ультразвукового поля.

Встановлено [5], що при синусоїдальній деформації відношення розсіяної енергії до нагромадженої її величини за період  $T_0$  пропорційне  $\text{tg } \delta$  і це твердження неодноразово перевірялося експериментально [1]. Для порівняння були спроби [8] встановити взаємозв'язок величини  $\text{tg } \delta$  з коефіцієнтом поглинання  $\alpha$ , динамічною в'язкістю  $\eta$  та іншими в'язкопружними характеристиками матеріалу. Однак, кількісний взаємозв'язок між ними, в ряді випадків, не встановлений. З метою розв'язання даного питання використаємо енергетичний підхід до опису та аналізу процесу взаємодії полімеру з зовнішнім динамічним механічним і температурним полем.

Максимальна зміна енергії, яка нагромаджена за  $T_0$  в одиниці об'єму тіла, у випадку деформації зсуву, дорівнює [5]

$$\Delta W_1 = \int_0^{\gamma_0} G' \gamma d\gamma = \frac{G' \gamma_0^2}{2}, \quad (1)$$

де  $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t = \gamma_0 \exp(j\omega t)$ ;  $j = \sqrt{-1}$ . Поряд з цим, дисипація енергії зростає, оскільки

ки її акумуляція досягає максимального значення протягом  $t = T_0/4$ . Це дозволяє [2] порівняти її з величиною енергії  $\Delta W_2$ , яка розсіяна за чверть періоду, тобто

$$\Delta W_2 = \int_0^{\gamma} \frac{G' \dot{\gamma}}{\omega} d\gamma = \frac{\pi G'' \gamma_0^2}{4}. \quad (2)$$

Відповідно, відносна частка енергії дисипації процесу деформації тіла під дією ультразвукової хвилі до загальної її величини становить

$$\beta = \frac{\Delta W_2}{\Delta W_1 + \Delta W_2} = \frac{\pi G''}{2G' + \pi G''}. \quad (3)$$

Схематично даний процес, у першому наближенні, представимо у вигляді моделі Алфрея [1], яка відповідає спектру запізнення при об'ємній та деформації зсуву з часом максвеллівської релаксації  $\tau_2$  (інші символи пояснені в тексті). В той же час, згідно схеми заміщення, запропонованої Максвеллом [5], залежність між об'ємною деформацією і зміною повного тиску на систему аналогічна співвідношенню між електричною напругою  $V$  і кількістю електрики  $q$ , у випадку електричного кола, яке складається із ємності  $C_1$ , з'єднаної послідовно з контуром, утвореним паралельним з'єднанням ємності  $C_2$  і опору  $R_2$ . При цьому, ємності  $C_1$  і  $C_2$  відіграють роль коефіцієнтів стисливості  $\kappa_1 = K^{-1}$ ,  $\kappa_2 = G^{-1}$ , а  $R_2$  – роль коефіцієнта об'ємної в'язкості  $\eta$ . Проведені розрахунки, враховуючи, що  $q$  і  $V$  пропорційні  $\exp(j\omega t)$ , показують, що

$$\dot{\xi} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{j\omega C_1 \tau_2}{C_2 + j\omega \tau_2 (C_1 + C_2)}, \quad (4)$$

де  $\xi$  – різниця потенціалів на ємності  $C_1$  та  $C_2$ , відповідно;  $\tau_2 = R_2 C_2$  – час максвеллівської релаксації. Виділивши дійсну і уявну частину залежності (4) та використавши взаємозв'язок  $C_1$ ,  $C_2$  з  $K$  і  $G$ , з умови, що  $\beta \equiv |\dot{\xi}|$ , маємо

$$\eta = \frac{KG}{\omega} \left[ \frac{\pi \operatorname{tg} \delta}{(K + G)(2G - \pi K \operatorname{tg} \delta)} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

де  $\operatorname{tg} \delta = G''/G' = 2\alpha_t v_t \omega^{-1}$ . Отримане співвідношення вказує на те, що в процесі дії на полімер напругою, величина якої змінюється за гармонічним законом, реалізується одночасно комбінація складових об'ємної ( $K$ ) та деформації зсуву ( $G$ ), які суттєво різняться по характеру: одна являє собою зміну форми, друга – зміну об'єму. Вони супроводжуються також різними молекулярними процесами [8]. Крім цього, величина  $\eta$  залежить від частоти дії  $\omega$  зовнішнього поля, що значно ускладнює з'ясування молекулярно-кінетичної інтерпретації об'ємної в'язкості полімерів та композитів на їх основі.

Проаналізуємо отримані співвідношення, виходячи з результатів експерименту при умові, коли час максвеллівської релаксації  $\tau_2$  або час осілого життя структурного елемента  $\tau$  співмірний з періодом дії ультразвукового поля  $T_0$  і значно перевищує період коливань  $\tau_0$  структуроутворень в околі квазірівноважного положення [5].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На Рис. 1 представлені температурні залежності величини модулів зсуву та об'ємної деформації ГПС при сталій величині вмісту нанодисперсної міді, отриманої шляхом ЕВП та Cu, NiCr – фізико-хімічним методом. Характерно, що їх величина нелінійно зменшується з підвищенням температури та залежить від вмісту нанодисперсного металу (Рис. 2) і способу його отримання. На різну ступінь модифікуючої дії нанодисперсного металу на полімер вказують також результати концентраційної залежності величини  $\alpha_l$  та  $\alpha_t$  систем при  $T = \text{const}$  (Рис. 3). Такі зміни в'язкопружних характери-

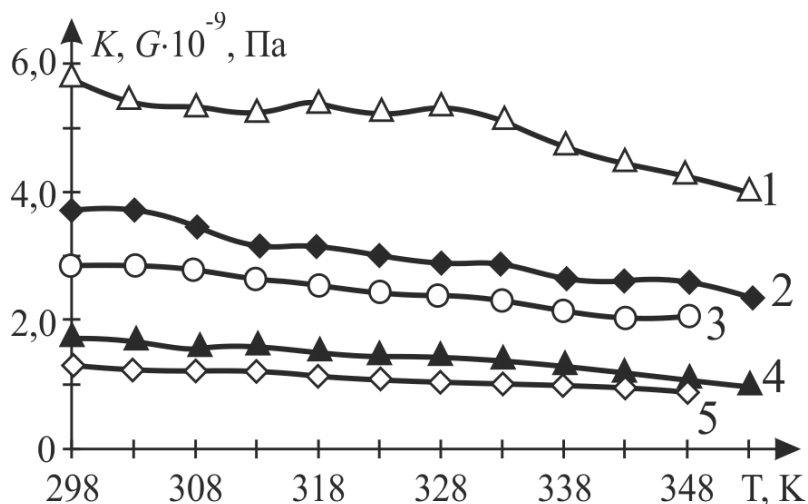


Рис. 1. Температурні залежності модулів пружності  $K$  і  $G$  ПВХ-систем:  
 1 –  $K$  для ПВХ+0.05 об.% NiCr, 2 –  $K$  для ПВХ+0.3 об.% Cu (ЕВП),  
 3 –  $K$  для ПВХ+0.3 об.% Cu (ф/х), 4 –  $G$  для ПВХ+0.1 об.% NiCr,  
 5 –  $G$  для ПВХ+0.2 об.% Cu (ЕВП)

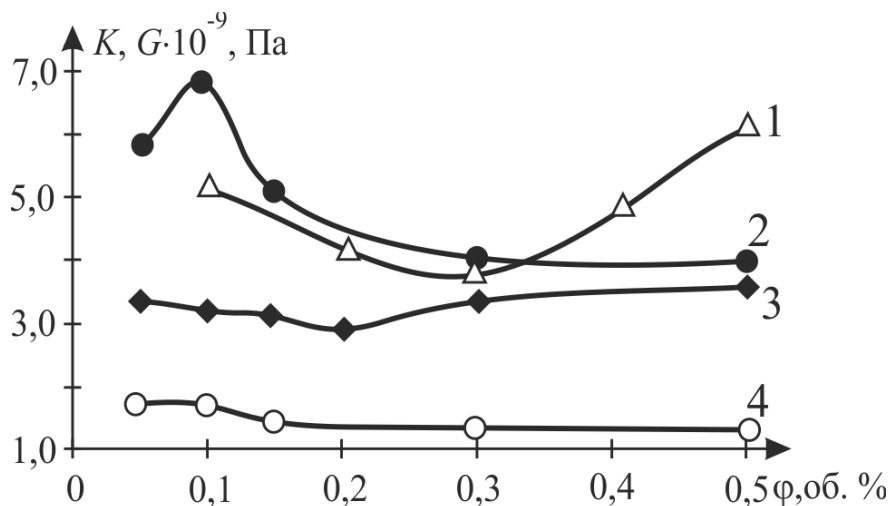


Рис. 2. Концентраційні залежності модулів пружності  $K$  і  $G$  ПВХ-систем:  
 1 –  $K$  для ПВХ+NiCr, 2 –  $K$  для ПВХ+Cu (ЕВП), 3 –  $K$  для ПВХ+Cu (ф/х),  
 4 –  $G$  для ПВХ+NiCr при  $T = 303$  К

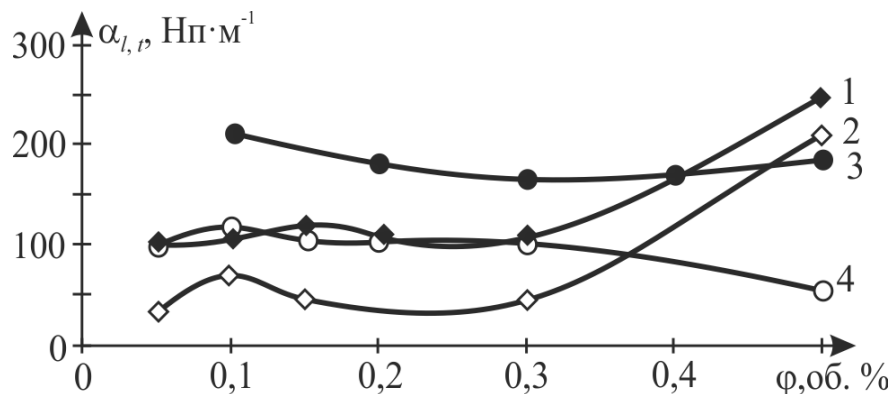


Рис. 3. Концентраційні залежності величини коефіцієнтів поглинання поздовжніх ( $\alpha_l$ ) та поперечних ( $\alpha_t$ ) ультразвукових коливань в ПВХ-системах при  $T = 298$  К: 1 –  $\alpha_l$  для ПВХ+Ni Cr, 2 –  $\alpha_l$  для ПВХ+Cu (ф/х), 3 –  $\alpha_t$  для ПВХ+Ni Cr, 4 –  $\alpha_t$  для ПВХ+Cu (ЕВП)

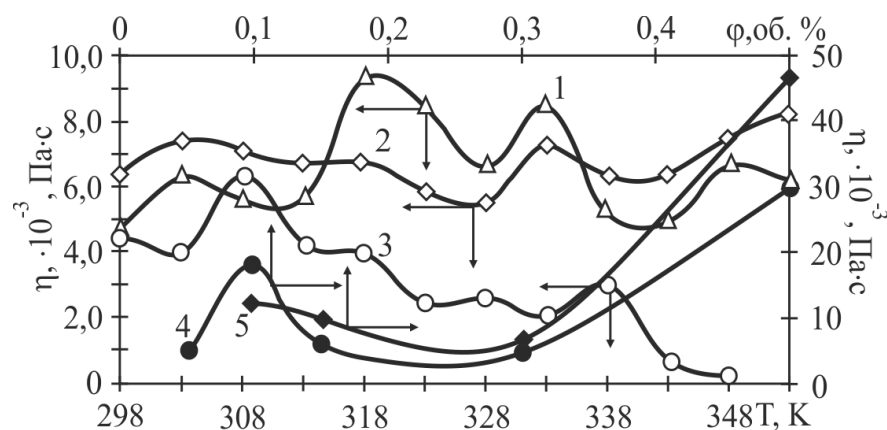


Рис. 4. Температурні (1, 2, 3) та концентраційні при  $T = 298$  К (4, 5) залежності об'ємної в'язкості  $\eta$  ПВХ-систем: 1 – ПВХ+0.05 об.% Ni Cr, 2 – ПВХ+0.3 об.% Cu (ЕВП), 3 – ПВХ+0.5 об.% Cu (ф/х), 4 – ПВХ+Ni Cr, 5 – ПВХ+Cu (ЕВП)

стик композиту, згідно співвідношення (5), знаходять свій прояв у характері залежності  $\eta = f(\varphi)|_T$  та  $\eta = \psi(T)|_\varphi$ , які представлені на Рис. 4.

Наявність девіаційного модуля зсуву та об'ємного стиску (розтягу), які враховані в співвідношенні (5), засвідчує існування девіаційного коефіцієнта об'ємної в'язкості, як прояв відхилення структурного елемента системи від стану квазірівноваги [9]. Такий висновок підтверджується також залежністю величини  $\eta$  від  $\text{tg } \delta$ , який має релаксаційну природу [1]. Це дає підстави визначити час релаксації Максвелла з умови, що  $\tau_2 = R_2 C_2 = \eta/G$ . Проведені розрахунки показали, що, наприклад, для ПВХ та систем ПВХ+0.1 об.% Cu (ЕВП); ПВХ+0.3 об.% Cu (е/х); ПВХ+0.5 об.% Ni Cr величина  $\tau_2$  дорівнює  $2.9 \cdot 10^{-6}$ ,  $8.3 \cdot 10^{-6}$ ,  $7.9 \cdot 10^{-6}$  і  $22.6 \cdot 10^{-6}$  с відповідно.

Слід зауважити, що в теорії Максвелла фізичний зміст часу релаксації, як структурно-чутливу характеристику тіла, залишився нез'ясованим. В той же час, з точки зору молекулярно-кінетичної теорії [4], його ототожнюють з часом осілого життя  $\tau$  структурного елемента системи. Враховуючи, що  $\omega = 0.4 \cdot 10^6$  с $^{-1}$ , а  $\tau(\tau_2)$  для ПВХ-систем



змінюється в діапазоні  $0.9 \cdot 10^{-6} \leq \tau(\tau_2) \leq 2.3 \cdot 10^{-5}$  с (при  $T = 298$  К), добуток  $\omega\tau(\tau_2)$  задовольняє умову  $1.2 \leq \omega\tau(\tau_2) \leq 9$ . Таким чином, період коливань зовнішньої сили  $T_0 = 2\pi\omega^{-1}$  лежить в області змін часу релаксації – при таких умовах коливний рух структурних елементів тіла має не лише в'язкий, але приймає переважно пружний характер, забезпечуючи полімерному композиту, в цілому, в'язкопружні властивості. Виконання саме такої умови викликає зацікавленість дослідників вивчати в'язкопружні властивості систем на межі переходу кіло-мегагерцевого діапазону частот [7].

Оскільки максвеллівський час релаксації  $\tau_2$  по порядку величини співмірний з середнім часом осілого життя  $\tau$  структурного елемента, використовуючи принцип ТЧЕ, представимо температурну залежність  $\tau$  як [8]

$$\tau = \tau_0 \exp(U/kT), \quad (6)$$

де  $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-12}$  с.

Це дає можливість аналіз процесу динамічної в'язкопружності ПВХ-систем провести з точки зору рухливості (як міри гнучкості макромолекул [9]) елементів структури тіла, т.о. середньої швидкості, яку отримує будь-який з них відносно оточуючого середовища, якщо на нього діє зовнішня сила, рівна одиниці, в той час, коли сусідні елементи не зазнають дії зовнішніх сил. В свою чергу, реалізація рухливості структуроутворень потребує зміни вільної енергії всієї системи, яка у випадку аморфного гнучколанцюгового полімеру, складається із сукупності мікроблоків [8] і характеризується ближнім порядком [9]. Основою для подальших розрахунків термодинамічних функцій є рівняння для вільної енергії Гамільтона [6], аналітичний вираз якого для ГПС ще не встановлено [7], тому, згідно співвідношення (6), визначимо величину енергії активації  $U$ , як зміну вільної енергії композита, що забезпечує перехід структурного елемента в новий квазірівноважний стан. Проведені розрахунки показали, що величина  $U$  при  $T = 298$  К набуває значень  $5.5 \cdot 10^{-20}$ ,  $6.4 \cdot 10^{-20}$ ,  $6.3 \cdot 10^{-20}$  і  $6.8 \cdot 10^{-20}$  Дж для ПВХ та систем на його основі ПВХ+0.1 об.% Cu (ЕВП), ПВХ+0.3 об.% Cu (e/x), ПВХ+0.5 об.% Ni Cr відповідно, співмірних з енергією міжмолекулярної взаємодії [9]. Така зміна величини енергії активації вказує на те, що під дією нанодисперсних металів Cu та Ni Cr зростає ступінь порядку у відносному розподілі структурних елементів, а їхня кінетична енергія зменшується. При цьому зростання часу осілого життя вказує на збільшення ефективних розмірів мікроблоків і/або суперсіток [6], які впорядковують стан композиту. По ступеню модифікуючого впливу на величину  $\tau(\tau_2)$ ,  $U$ ,  $\eta$  активність нанодисперсних металів зменшується в ряду: Ni Cr, Cu (ф/x), Cu (ЕВП) при їх вмісті в ПВХ в діапазоні  $0 \leq \varphi \leq 0.5$  об.%.

## 5. ВИСНОВКИ

На основі аналізу процесу енергообміну між елементами структури, з врахуванням їх рухливості, встановлено аналітичний взаємозв'язок між динамічною в'язкістю та в'язкопружними модулями композитів, які містять в якості активних модифікаторів ПВХ нанодисперсні порошки металів Ni Cr, Cu.

Методи отримання таких нанонаповнювачів та їх суміщення з полімером в  $T$ -р режимі можуть слугувати основою технологічного процесу створення металонанополімерів. Феноменологічний підхід та елементи молекулярно-кінетичної теорії до опису процесів

динамічної в'язкопружності можна використати при прогнозуванні, створенні, визначенні умов експлуатації ГПС в динамічних механічних та температурних полях при  $T < T_g$ .

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Mason P. Properties of polymers and nonlinear acoustics // Physical acoustics: Principles and methods. Part B, Vol. II. — New York and London : Academic Press, 1965. — 420 p.
- [2] Contribution of thermal fluctuations to thermophysical properties of modified poly(vinylchloride) / B. B. Kolupaev, V. V. Klepko, E. V. Lebedev et al. // Polymer Sciences, Ser. A. — 2015. — Vol. 57, no. 2. — P. 139–146.
- [3] Nakada O. Theory of viscoelasticity of amorphous polymers // Journal of Physical Society of Japan. — 1985. — Vol. 23. — P. 1804–1821.
- [4] Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — Л. : Наука, 1975. — 592 с.
- [5] Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. — М. : ИЛ, 1963. — 535 с.
- [6] Френкель С. Я., Цыгельный И. М., Колупаев Б. С. Молекулярная кибернетика. — Львов : Свит, 1990. — 166 с.
- [7] Хохлов А. Р. О некоторых перспективных направлениях современной науки о полимерах // Высокмолекулярные соединения. Сер. А. — 1990. — Т. 32, № 9. — С. 1795–1810.
- [8] Бартнев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров. — Л. : Химия, 1990. — 430 с.
- [9] Волинский А. Л., Бакеев Н. Ф. Структурная самоорганизация аморфных полимеров. — М. : Физматлит, 2005. — 328 с.

## REFERENCES

- [1] P. Mason, *Properties of polymers and nonlinear acoustics*. New York and London: Academic Press, 1965.
- [2] B. B. Kolupaev, V. V. Klepko, E. V. Lebedev, V. V. Levchuk, and Y. R. Maksimtsev, “Contribution of thermal fluctuations to thermophysical properties of modified poly(vinylchloride),” *Polymer Sciences, Ser. A*, vol. 57, no. 2, pp. 139–146, 2015.
- [3] O. Nakada, “Theory of viscoelasticity of amorphous polymers,” *Journal of Physical Society of Japan*, vol. 23, pp. 1804–1821, 1985.
- [4] J. Frenkel, *Kinetic theory of liquids*. London: Dover, 1955.
- [5] J. D. Ferry, *Viscoelastic properties of polymers*. New York: Wiley, 1970.
- [6] S. Y. Frenkel, I. M. Cygelnyi, and B. S. Kolupaev, *Molecular cybernetics*. Lviv: Svit, 1990.



- [7] A. R. Hohlov, “On some promising areas of polymer science,” *High-Molecular Compounds. Series A.*, vol. 32, no. 9, pp. 1795–1810, 1990.
- [8] G. M. Bartenev and S. Y. Frenkel, *Polymer physics*. Leningrad: Khimiya, 1990.
- [9] A. L. Volynskii and N. F. Bakeev, *Structural self-organization of amorphous polymers*. Moscow: Fizmatlit, 2005.

**Б. Б. Колупаев**

**Динамическая вязкоупругость металлонанодispersного  
поливинилхлорида**

Приведены результаты исследования динамической вязкоупругости металлонанодисперсных систем, полученных на основе поливинилхлорида (ПВХ), в мегагерцовом диапазоне частот при температурах  $298 \text{ K} \leq T \leq T_g + 10 \text{ K}$ . На основании анализа особенностей энергообмена между элементами структуры рассматриваемого композита установлен механизм возникновения динамической вязкости и ее взаимосвязь с максвелловской теорией релаксационной вязкоупругости. Установленные аналитические соотношения между динамической вязкостью, объемной и сдвиговой деформациями позволяют прогнозировать поведение ПВХ-систем в механических и температурных полях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** композит, вязкость, релаксация, структурный элемент, вязкоупругость

**B. B. Kolupaev**

**A dynamic viscoelasticity of the metalnanodispersible polyvinylchloride**

The paper deals with presenting of results of studying of a dynamic viscoelasticity of the metalnanodispersible systems obtained on the basis of a polyvinylchloride (PVC) in Megahertz frequency range at the temperatures of  $298 \text{ K} \leq T \leq T_g + 10 \text{ K}$ . From the analysis of peculiarities of energy exchange between the structural elements of the considered composite, the mechanism of emergence of the dynamic viscosity and its interrelation with the Maxwell theory of relaxation viscoelasticity are revealed. The derived analytical relations between the dynamic viscosity, volume and a shear strains allow the prediction of the PVC systems behavior in the mechanical and temperature fields.

**KEY WORDS:** composite, viscosity, relaxation, structural element, viscoelasticity