

РІВНЕНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ФІЗИКА
КОНДЕНСОВАНИХ
ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНИХ
СИСТЕМ**

Наукові записки Рівненського державного гуманітарного
університету

Випуск 12

РІВНЕ – 2007

ФІЗИКА КОНДЕНСОВАНИХ ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНИХ СИСТЕМ

Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету

Випуск 12. – Рівне: РДГУ, 2007. – 107 с.

Збірник містить публікації, в яких розглядаються питання теоретичних і експериментальних досліджень, моделювання фізичних процесів, що характерні для конденсованого стану речовини. Опубліковані матеріали можуть бути використані науковцями, аспірантами, інженерними працівниками, які ведуть дослідження в цих наукових напрямках. Цілий ряд публікацій можна використати для навчально-виховного процесу в університетах та інститутах.

Головний редактор:

д.х.н., професор, академік МАПСН **Б.С. Колупаєв**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

Заступник головного редактора:

к.ф.-м.н., професор **М.А. Бордюк**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

Члени редколегії:

к.х.н., доцент **О.М. Волошин**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

к.ф.-м.н., професор **Б.П. Дем'янюк**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

д.ф.-м.н., професор **Ю.Ф. Забашта**
(Київський національний університет ім. Тараса Шевченка)

д.ф.-м.н., провідний науковий співробітник, **В. В. Кленко**
(Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, м. Київ)

д.ф.-м.н., професор **Ю.А. Куницький**
(Технічний центр НАН України, м. Київ)

д.х.н., професор, академік НАН України **Є.В. Лєбєдєв**
(Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, м. Київ)

к.ф.-м.н., доцент **В.А. Мащенко**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

к.х.н., доцент **Б.І. Муха**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

д.х.н., провідний науковий співробітник **Ю.М. Нізельський**
(Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, м. Київ)

к.ф.-м.н., доцент **В.І. Нікітчук**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

д.ф.-м.н., професор **В.Я. Прохоренко**
(Національний університет "Львівська політехніка")

д.ф.-м.н., професор **О.П. Руденко**
(Полтавський державний педагогічний університет)

д.ф.-м.н. **В.І. Слісенко**
(Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ)

к.ф.-м.н., доцент **В.А. Сідлецький**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

д.т.н., професор **А.О. Сяський**
(Рівненський державний гуманітарний університет)

д.ф.-м.н., професор, член-кореспондент АПН України **М.І. Шут**
(Національний педагогічний університет ім. М.П. Драгоманова, м. Київ)

Друкується за рішенням Вченої Ради Рівненського державного гуманітарного університету
(протокол №9 від 27 квітня 2007 року)

Адреса редакції:

33000, м. Рівне, вул. Остафова, 31
Рівненський державний гуманітарний університет
каб. 115
e-mail: fkvs_ua@ukr.net
ISBN 966-7281-03-7

© Рівненський державний гуманітарний
університет, 2007

4. *Vollet D.R., Donatti D.A., Ibanez Ruiz A.* A SAXS study of the nanostructural characteristics of TEOS-derived sonogels upon heat treatment up to 1100°C. *J.Non-Cryst Solids* 306 (2002) 11.
5. *Krakovsky I., Urakawa H., Kajiwara K., Kohjiya S.* Time resolve small angle X-ray scattering of inorganic-organic gel formation kinetics. *J. Non-Cryst. Solids* 231 (1998) 31.
6. *Nogami M., Matsushita H., Kasuga T., Hayakawa T.* Hydrogen gas sensing by sol-gel-derived proton-conducting membranes. *Electrochem & Solid State Lett.* 2(8) (1999) 415.
7. *Gray F.M.* Polymer Electrolytes. RSC Materials Monographs (London: The Royal Society of Chemistry), 1997.
8. *Mehta V, J.S. Cooper, J.* *Power Sources.*, 114 (2003) 32.
9. *Matsuda A., Hirata K., Tatsuminago M., Minami T.* Proton-conductive composites composed of phosphoric acid-doped silica gel and organic polymers with sulfo-groups. *J.Ceram.Soc. Japan.* 108 (2000) 45.
10. *Bae J.-M., Honma I., Murata M.* *Solid State Ionics.*, 147 (2002) 189.
11. *Nakajima H., Nomura S., Sugimoto T., J.* *Electrochem. Soc.*, 149 (2002) A953.
12. *Шпак А.П., Шилов В.В., Шилова О.А., Куницкий Ю.А.,* Диагностика наносистем. Многоуровневые фрактальные наноструктуры (Ч. II) (Киев: Академперіодика: 2004).
13. *Schaefer D.W., Martin J.E., Keefer K.D.* in *Physics of Finely Divided Matter*, eds. N.Bocarra and M.Daoud, Springer-Verlag, Berlin, 1985, p.31.
14. *Schaefer D.W., Keefer K.D.* in *Fractals in Physics*, eds. L.Pietronero and E.Tosatti, North-Holland, Amsterdam, 1986, pp.39-45.
15. *Hirata K., Matsuda A., Hirata T., Tatsuminago M., Minami T.* Preparation and characterization of highly proton-conductive composites composed of phosphoric acid-doped silica gel and styrene-thylene-butylene-styrene elastomer. *J.Sol-Gel Sci. & Tech.* 17 (2000) 61.
16. *Лунатов Ю.С., Шилов В.В., Гомза Ю.П., Кругляк Н.Е.,* Рентгенографические методы изучения полимерных систем. (Киев: Наук. думка: 1982).
17. *Beaucage G., J. Appl. Cryst.*, 28 (1995) 717.
18. *Beaucage G., J. Appl. Cryst.*, 29 (1996) 134.

УДК 541.64

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНГРЕДІЄНТІВ НА ФОНОННУ В'ЯЗКІСТЬ ГЕТЕРОГЕННИХ ПОЛІМЕРНИХ СИСТЕМ

В.В.Левчук, М.А. Бордюк, В.О. Сідлецький, О.М. Волошин

Рівненський державний гуманітарний університет, Україна, UA-33000, Рівне, вул. Остафова, 31

Наведено результати дослідження впливу інгредієнтів на фононну в'язкість і теплообмін в полімерних композиційних матеріалах за результатами ультразвукових вимірювань. Визначено час релаксації структурних елементів та теплових фононів систем, коефіцієнти дисипації теплових фононів, об'ємну та в'язкість зсуву досліджених систем.

Results of research of influence of components on phonon viscosity and a thermal exchange in polymeric composite materials by results of ultrasonic measurements are resulted. Time of a relaxation of structural elements and thermal phonons of systems, coefficients of a dissipation of thermal phonons, volumetric and viscosity of shift of the investigated systems is determined.

Вступ

Використання динамічних методів досліджень для гомогенних та гетерогенних твердих середовищ дає можливість отримати важливу інформацію про їх структуру та властивості [1-4].

Оскільки основним в структурі полімерів є розміри і періодичність (чи псевдоперіодичність) будови макромолекули, дослідження питань, про самовільні необоротні процеси поширення енергії коливальними рухами структурної організації таких систем доцільно проводити з використанням квазічастинок – фононів, як джерел носія субстанції. Це зумовлено, насамперед тим, що в аморфних полімерних системах відбуваються процеси розсіювання фононів на неоднорідностях структури. При поширенні звукових хвиль в гетерогенних полімерних системах відбуваються фононні релаксаційні процеси, які відрізняються від

процесів, що спостерігаються в чистих кристалах [5].

В гетерогенній полімерній системі, при поширенні пучка когерентних звукових фононів відбувається взаємодія їх з тепловими фононами. Оскільки довжина вільного пробігу звукових фононів співпадає з довжиною звукової хвилі, а довжина вільного пробігу теплових фононів в аморфних лінійних полімерах рівна міжатомній відстані за ланцюгом головних валентностей, то при поширенні звукових фононів з частотою $\omega = 4 \cdot 10^5$ Гц їх поглинання відбувається за механізмом Ахієзера, тобто фононної в'язкості [6-7]. Розгляд базується на використанні кінетичного рівняння Больцмана для газу фононів. Звукова хвиля розглядається як зовнішня вимушуюча сила, що діє на систему теплових фононів і порушує її термодинамічну рівновагу; зв'язок між цією силою і системою фононів здійснюється через залежність частоти

теплових фононів від змінної деформації викликаній звуком. В результаті змінної деформації система теплових фононів виводиться зі стану рівноваги і намагається повернутися до цього стану за рахунок зіткнень з тепловими фонами; діють механізми релаксації [8-10].

Експериментальна частина

Досліджували аморфний лінійний полімер полівінілхлорид (ПВХ) з $M_n=1,4 \cdot 10^5$ і константою Фікінгера $C = -65$, отриманий суспензійною полімеризацією і очищений переосадженням з розчину, а також композиції на його основі, що містили як наповнювачі високодисперсний мідь (Cu) та фенолформальдегідну смолу БЖ-1-4549-71 з $M_n=4 \cdot 10^2-10^3$. Зразки ПВХ-композицій готували методом механічного змішування з наступним пресуванням в Т-р режимі при тиску 10^7 Па і температурі 403 К [7].

Акустичні властивості систем – швидкість поширення поздовжньої v_l і поперечної v_t хвиль, а також відповідні їм коефіцієнти поглинання (α_l, α_t) досліджували на частоті 0,4 МГц імпульсним методом з прохідним сигналом сумісно з методом обертової пластини [7]. Концентраційну і температурну залежність густини (ρ), питомої теплоємності (C_p) і теплопровідності (λ) визначали згідно роботи [11].

Результати та їх обговорення

Як відомо, поздовжня звукова хвиля є статистичним розподілом областей стиску і розрідження. Температура в областях стиску вища, а в областях розрідження нижча, ніж була до появи хвилі. Відповідно між цими областями може виникнути теплопередача, при якій частина пружної енергії перетворюється в теплову [8]. Поперечна ж хвиля не викликає зміни об'єму, а відповідно і теплового ефекту. Однак, поперечна хвиля зазнає поглинання за рахунок іншого теплового механізму – фононної в'язкості. Це обумовлено тим, що фонони переносять енергію та імпульс, тобто вони володіють ефективною в'язкістю, яка викликає поглинання поперечної хвилі і створює відповідний опір на динаміку структурних елементів. Із результатів досліджень видно, що втрати на розсіювання можуть бути значними. Коефіцієнти поглинання ультразвукової хвилі суттєво змінюються з ростом температури та концентрацією наповнювачів. Коефіцієнти поглинання зростають зі збільшенням концентрації наповнювачів та з ростом температури.

Як було показано раніше, теплоперенос у полімерних системах обумовлений рухом поздовжніх теплових фононів по ланцюгу валентностей макромолекул й обміном енергією між сусідніми підсистемами за рахунок теплових поперечних фононів [10]. Вважаючи, що теплообмін обумовлений структурними елементами макромолекул, а носіями тепла в області склоподібного стану виступають теплові фонони, з урахуванням дисипації теплової енергії будемо мати [6]:

$$\lambda = c_v \rho \left(\frac{\pi}{12} v_l l + \frac{v_t a}{8} \right). \quad (1)$$

Враховуючи те, що час життя поздовжніх і поперечних фононів однаковий і знаючи, що $l = v_l \tau^*$ і $a = v_t \tau^*$, отримаємо:

$$\lambda = \frac{\pi}{12} c_v \rho v_l^2 \tau^* + \frac{v_t^2 \tau^*}{8}, \quad (2)$$

що дозволяє визначити час релаксації теплових фононів у гетерогенних полімерних системах:

$$\tau^* = \frac{24\lambda}{c_v \rho (2\pi v_l^2 + 3v_t^2)}. \quad (3)$$

Вважаючи, що джерелом теплових фононів є коливання структурних елементів (атомних груп) макромолекули і, оскільки в досліджуваних системах поширюються як поздовжні, так і поперечні хвилі, провели розрахунок характеристичного спектру (ω_d^l, ω_d^t) полімерних систем:

$$\omega_d^l = \left(\frac{6\pi^2 N}{V} \right)^{\frac{1}{3}} v_l; \quad \omega_d^t = \left(\frac{6\pi^2 N}{V} \right)^{\frac{1}{3}} v_t. \quad (4)$$

При цьому час релаксації структурних елементів рівний:

$$\tau_d^l = \left(\frac{V}{6\pi^2 N} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v_l}; \quad \tau_d^t = \left(\frac{V}{6\pi^2 N} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{v_t} \quad (5)$$

Аналіз концентраційної залежності τ^* вказує на те, що в випадку збільшення вмісту високодисперсного наповнювача час релаксації теплових фононів мало змінюється, а при введенні фенолформальдегідної смоли зменшується.

Аналіз температурних залежностей τ_d^l, τ_d^t і τ^* вказує на те, що при зростанні температури їх величини збільшуються. Такий характер залежності цих величин зумовлений зростанням рухливості кінетичних одиниць структуроутворень і втягуванням в цей процес більшого числа структурних елементів. Для всіх розглянутих систем найбільш суттєві зміни величин τ_d^l, τ_d^t і τ^* спостерігаються в області температур 333÷353К.

Якщо вважати, що звуковий фонон рухається уздовж ланцюга головних валентностей макромолекули полімеру, то середня швидкість руху відповідно дорівнює [2]:

$$\bar{v} = \sqrt[3]{\frac{3v_l^3 v_t^3}{v_l^3 + 2v_t^3}}. \quad (6)$$

При взаємодії звукового фонуна з атомними групами будуть відбуватися процеси дисипації енергії. Не дивлячись на великий час релаксації звукових фононів, за рахунок розсіювання на неоднорідностях, повний переріз розсіювання довгохвильових акустичних фононів буде величиною його порядку малості [10].

Згідно [11,12] знайдемо характеристичну частоту Дебая

$$\omega_d = \left(\frac{18\pi^2 N_a v_l^3 v_t^3}{V(v_l^3 + 2v_t^3)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

і визначимо час релаксації на розсіювання на неоднорідностях для короткохвильових (теплових)

фононів, вважаючи, що теплові фонони мають частоти ω_d^1 і ω_d^t :

$$\tau_1^* = \frac{1024\pi^4 \rho^2 V_0 \bar{V}^3}{(M_b - M_a)^2 (\omega_d^1)^4}, \tau_2^* = \frac{1024\pi^4 \rho^2 V_0 \bar{V}^3}{(M_b - M_a)^2 (\omega_d^t)^4} \quad (8)$$

Аналіз розрахунків величин τ_1^* , τ_2^* показує, що вони теж є функціями концентрації і температури. Температурна залежність вказує на те, що при зростанні температури значення величин τ_1^* , τ_2^* збільшуються, однак залежність має складний характер. Найбільш суттєві зміни спостерігаються в області релаксацийного α -переходу.

Зміна часу релаксації на розсіювання теплових фононів на атомних групах макромолекули ПВХ у порівнянні з відповідною величиною для звукових фононів супроводжується збільшенням перерізу розсіювання для них. У релеївському наближенні

$$\sigma_1^* \approx \bar{a}^2 \left(\frac{\omega_d^1}{\omega_d} \right)^2 \text{ або } \sigma_2^* \approx \bar{a}^2 \left(\frac{\omega_d^t}{\omega_d} \right)^2 \quad (9)$$

Оскільки величини ω_d^1 , ω_d^t і ω_d співмірні для розглянутих систем, то $\sigma_1^* \approx \sigma_2^* \approx \bar{a}^2$ [13]. Таким чином, при поширенні пучка когерентних поздовжніх звукових фононів, ймовірність їх розсіювання атомними групами дуже мала, в той час як кожний тепловий фонon такою атомною групою інтенсивно розсіюється.

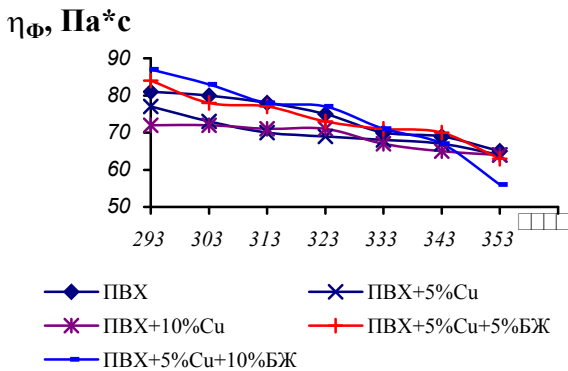


Рис.1. Температурна залежність фонonної в'язкості гетерогенних полімерних систем.

Підтвердженням такої взаємодії звукових і теплових фононів з структурними елементами макромолекул є дисипативні втрати в вигляді коефіцієнтів поглинання механічної енергії системою. З врахуванням об'ємної в'язкості і релаксацийного процесу явищ, маємо

$$\alpha_1 = \frac{\omega^2}{2\rho v_1^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \frac{\lambda(C_p - \omega)}{C_p C_v} \right] + \frac{\omega^2}{2\rho V_1^3} \cdot \frac{\eta'}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (10)$$

де η – в'язкість зсуву, η' – об'ємна в'язкість досліджених систем [14]. Об'ємну в'язкість визначали згідно формули

$$\eta' = \frac{1}{3} \rho \tau (\bar{v}_\infty^2 - \bar{v}^2), \quad (11)$$

де \bar{v}_∞ – швидкість звуку при $\omega \rightarrow \infty$, τ – час релаксації структурних елементів композицій, визначений з використанням схеми Максвелла для деформації зсуву [7], а в'язкість зсуву рівна

$$\eta = \frac{\rho v_\tau^2 \tau}{6} \quad (12)$$

Таблиця.

Вплив температурного поля на час релаксації теплових фононів та об'ємну і в'язкість зсуву в досліджених ПКМ.

T, K	$\tau_d^1 \cdot 10^{14}, c$	$\tau_d^t \cdot 10^{14}, c$	$\alpha_{01} \cdot 10^{-9}, \text{ Нп/м}$	$\alpha_{0t} \cdot 10^{-9}, \text{ Нп/м}$	$\eta, \text{ Пас}$	$\eta', \text{ Пас}$
ПВХ						
293	4,36	10,49	0,97	2,42	416	418
303	4,33	10,60	0,97	2,43	487	490
313	4,39	10,85	0,98	2,43	514	517
323	4,53	11,35	0,98	2,43	505	508
333	4,77	12,05	0,96	2,43	417	421
343	4,9	12,12	0,99	2,43	290	292
353	5,30	12,96	1,01	2,45	190	191
ПВХ+5%Cu						
293	6,21	11,14	1,26	2,44	284	288
303	6,21	11,74	1,26	2,45	376	369
313	6,24	12,14	1,26	2,46	394	389
323	6,35	12,27	1,27	2,46	358	352
333	6,47	12,42	1,28	2,46	285	280
343	6,67	12,56	1,30	2,46	185	181
353	6,84	13,17	1,30	2,46	176	173
ПВХ+10%Cu						
293	6,74	12,05	1,39	2,48	304	295
303	6,74	12,05	1,39	2,48	331	322
313	6,74	12,18	1,39	2,48	300	292
323	6,96	12,18	1,39	2,48	299	290
333	7,19	12,92	1,40	2,48	221	215
343	7,29	13,24	1,40	2,49	215	210
353	7,44	13,41	1,41	2,49	194	189
ПВХ+5%Cu+5%БЖ						
293	6,15	1,12	1,21	2,30	473	1201
303	6,38	1,21	1,21	2,30	535	1515
313	6,46	1,23	1,21	2,30	514	1463
323	6,64	1,29	1,22	2,30	470	1395
333	6,82	1,32	1,22	2,30	473	1402
343	6,93	1,35	1,22	2,30	350	1043
353	7,03	1,51	1,23	2,31	216	789
ПВХ+5%Cu+10%БЖ						
293	4,96	1,15	1,01	2,32	354	1494
303	5,47	1,19	1,06	2,32	316	1181
313	5,70	1,26	1,06	2,32	307	1294
323	5,95	1,28	1,06	2,32	306	1119
333	6,21	1,37	1,07	2,32	274	1058
343	6,70	1,45	1,07	2,33	258	959
353	7,18	1,74	1,09	2,33	156	722

Як видно з результатів розрахунків (таблиця) значення η і η' залежать не тільки від концентрації наповнювача, а й від його типу. Слід відмітити, що

для систем ПВХ+Сивеличини η і η' співмірні. Це свідчить про те, що механізм об'ємної деформації і деформації зсуву в розглянутій області концентрацій наповнювача близькі за рахунок широких меж зміни часу релаксації. Введення до цих систем фенолформальдегідної смоли не впливає суттєво на в'язкість зсуву і спричинює збільшення об'ємної в'язкості більше, ніж у два рази. З підвищенням температури величини η і η' зменшуються для всіх досліджених систем.

У випадку структуроутворень, для яких час релаксації τ незначний і величина $\omega\tau \ll 1$, отримуємо:

$$\alpha_1 = \frac{\omega^2}{2\rho v_1^3} \left[\left(\frac{4}{3}\eta + \eta' \right) + \frac{\lambda(C_p - C_v)}{C_p C_v} \right]. \quad (13)$$

Як показують результати розрахунків коефіцієнта дисипації поздовжньої звукової хвилі α_1 , при її взаємодії з атомними групами макромолекул його величина складає 40 – 80 Нп/м. При взаємодії звукової хвилі з структуроутвореннями для яких час релаксації складає близько 10^{-6} , релаксуюча об'ємна в'язкість дає внесок в дисипативні втрати порядку 5÷10 % від величини загального коефіцієнта поглинання.

Для визначення коефіцієнта дисипації теплових фононів будемо розглядати сукупність фононів як фононний газ. Оскільки час релаксації теплових фононів визначається відношенням (3), то оцінку еквівалентної фононної в'язкості проводили згідно співвідношення [15-16]

$$\eta_\delta = \frac{4R T}{\pi C_p \bar{v}_2 \mu}, \quad (14)$$

де μ – молярна маса композиції.

З урахуванням фононної в'язкості, коефіцієнт дисипації теплових фононів визначимо як

$$\alpha_{0l} = \frac{(\omega_d^l)^2 \eta}{2\rho v_1^3}, \quad (15)$$

$$\alpha_{0t} = \frac{(\omega_d^t)^2 \eta_\phi}{2\rho v_1^3}. \quad (16)$$

Значення величин α_{0l} і α_{0t} мало змінюються з концентрацією наповнювачів і близькі між собою для різних наповнених систем. Аналіз отриманих результатів (таблиця) показує, що $\alpha_{0t} > \alpha_{0l}$.

Температурні залежності α_{0l} і α_{0t} характеризуються тим, що по мірі зростання температури величини коефіцієнтів поглинання теплових фононів зростають.

Висновки

На основі експериментальних даних і теоретичних розрахунків встановлено вплив інгредієнтів і температурного поля на величину фононної в'язкості в гетерогенних полімерних системах. Визначено час релаксації структурних елементів та час розсіювання теплових фононів, об'ємну та в'язкість зсуву для досліджених полімерних систем.

Література:

1. *Перепечко И.И.* Акустические методы исследования полимеров. – М.: Химия, 1973. – 410 с.
2. *Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П.* Основы молекулярной акустики. – М.: Наука, 1964. – 514 с.
3. *Бордюк Н.А., Никитчук В.И., Волошин О.М., Липатов Ю.С., Колупаев Б.С.* Влияние ангармонических эффектов на структурно-механические и теплофизические свойства наполненных полимерных систем // Инженерно-физический журнал. – Т. 68. – №1. – 1995. – С. 44-50.
4. *Колупаев Б.С., Липатов Ю.С., Никитчук В.И., Бордюк М.А., Волошин О.М.* Композиційні матеріали з від'ємним коефіцієнтом Пуассона // Доповіді АН України. – № 12. – 1993. – С. 130-134.
5. *Бордюк М.А.* Процеси взаємодії звукових фононів з елементами структури гетерогенних полімерних систем // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. – Вип. 2. – 1997. – С. 33-36.
6. *Колупаев Б.С., Бордюк Н.А., Липатов Ю.С.* Влияние давления в Т-р режиме на вязкоупругие свойства граничных слоев в наполненных гибкоцепных полимерах // Композиционные полимерные материалы. – 1983. – Вып. 19. – С. 3-7.
7. *Колупаев Б.С.* Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем. – Львов: Вища школа, 1980. – 204 с.
8. *Дж. Рейсленд.* Физика фононов. – Москва: Мир, 1975.
9. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. Учебное пособие. – М.: Наука, 1984. – 400 с.
10. *Бордюк М.А., Бордюк Т.М., Самсонюк О.М., Колупаев Б.С.* Дослідження процесів дисипації механічної енергії в гетерогенних системах на основі гнучколанцюгових лінійних полімерів // Журнал фізичних досліджень. – Т.6. – № 3. – 2002. – С. 317-323.
11. *Бордюк Н.А., Колупаев Б.С., Левчук В.В., Касаткин В.Г.* Влияние фосфогипса на акустические свойства поливинилхлоридных композиций // Высокомолекулярные соединения. – А. – 1996. – Т.38. – № 6. – С. 1-6.
12. *Б.С. Колупаев, Н.А. Бордюк* Влияние силовых и температурных полей на релаксацию структурных элементов композиционных полимерных материалов // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. – Вип. 5. – 1998. – С. 3-11.
13. *Гуревич В.Л.* Кинетика фононных систем. – М.: Наука, 1980.
14. *Иванищук С.Н., Бордюк Н.А., Липатов Ю.С., Колупаев Б.С.* Вязкоупругие и теплофизические свойства переходных слоев ПВХ-систем модифицированных поливинилбутиралем // Высокомолекулярные соединения. – А. – Т.32. – № 6. – 1990. – С. 1224-1231.
15. *Бордюк Н.А., Волошин О.М., Демянюк Б.П., Липатов Ю.С., Колупаев Б.С.* Теплофизические свойства модифицированного поливинилхлорида // Высокомолекулярные соединения. – А. – Т. 32. – № 6. – 1990. – С. 1232-1237.
16. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

ФІЗИКА
КОНДЕНСОВАНИХ
ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНИХ
СИСТЕМ

Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету
Випуск 12.

Відповідальний за випуск **Бордюк М.А.**
Випуск підготував **Маркевич І.М.**
Підписано до друку 30.09.2007 р. Тираж 100 прим.

Рівненський державний гуманітарний університет
33000, м. Рівне, вул. Остафова, 31.