

УДК [53.54-126]:378.147

UDC [53.54-126]:378.147

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ КУРСА «ФИЗИКА ПОЛИМЕРОВ»

ULTRASONIC EXAMINATIONS IN LABORATORY PRACTICE OF THE COURSE “PHYSICS OF POLYMERS”

Н. А. Бордюк,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальных дисциплин Ровенской медицинской академии (Украина);

Т. Н. Шевчук,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Ровенского государственного гуманитарного университета (Украина);

В. А. Мащенко,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры автоматизации, электротехнических и компьютерно-интегрированных технологий Национального университета водного хозяйства и природопользования (Украина)

N. Bordyuk,

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Fundamental Disciplines, Rovno Medical Academy (Ukraine);

T. Shevchuk,

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Physics, Rovno State Humanitarian University (Ukraine);

V. Mashchenko,

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Automatization, Electrotechnical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water Economy and Nature Management (Ukraine)

Поступила в редакцию 21.01.21.

Received on 21.01.21.

Анализируются ультразвуковые методы исследования свойств полимеров и возможности их использования в лабораторном практикуме курса «Физика полимеров».

Ключевые слова: полимер, ультразвуковые методы, практикум, физика, студент, знания, образования, система.

The article analyzes ultrasonic methods of studying the properties of polymers and possibilities of using them in laboratory practice of the course “Physics of polymers”.

Keywords: polymer, ultrasonic methods, practice, Physics, student, knowledge, education, system.

Введение. В исследовании физических свойств и изучении строения полимерных систем важное значение имеют акустические методы, в том числе в области ультразвуковых частот, основанные на измерении скорости и поглощения упругих волн. Преимущество этих методов заключается в том, что они позволяют исследовать силовое поле молекул и их взаимное расположение, кинематику и динамику движения кинетических единиц, получить информацию о внутренней структуре систем [1].

Если в полимерной системе возбуждаются от внешнего источника звуковые колебания, то они создают в окружающей среде упругие напряжения, которые обуславливают распространение колебаний в пространстве. В ультразвуковых исследованиях, при использовании волн малых амплитуд, ком-

поненты тензора напряжений и деформации находятся в пределах закона Гука. При таких деформациях, зная скорости распространения звуковых волн в полимерных системах, определяются константы Ламе, а соответственно и вязкоупругие модули полимерных композиционных материалов [2].

Распространение упругих волн в гетерогенных полимерных системах сопровождается поглощением акустической энергии. Одной из главных причин рассеяния и поглощения звука является внутреннее трение (вязкость). Определение коэффициента поглощения звуковых волн в дисперсных системах позволяет устанавливать корреляцию между термодинамическими и кинетическими параметрами таких систем и их строением [3].

Основным результатом проведенных экспериментальных исследований температурной зависимости вязкости, скорости распространения продольной и поперечной звуковых волн, соответствующих коэффициентов поглощения, а также тангенса механических потерь есть вывод о том, что в полимерных системах имеется очень широкий спектр времени релаксации [4].

Основная часть. Приоритетным элементом современного образования является использование научных методов исследования в учебном процессе. Рассмотрим возможности внедрения ультразвуковых методов исследования полимеров в лабораторный практикум курса «Физика полимеров» [5].

Работа экспериментальной установки базируется на прохождении продольных и поперечных ультразвуковых волн (УЗ) через образец, погруженный в иммерсионную жидкость. Условие хорошего акустического контакта между жидкостью и образцом выполняется автоматически. Это позволяет считать образец эквивалентным отрезком определенной длины d , нагруженным на обоих его концах сопротивлением, равный волновому сопротивлению жидкости, что допустимо при использовании высокочастотных импульсов, так как при этом в жидкости не возникают стоячие волны. Средой распространения ультра-

звуковых волн в кювете является силиконовое масло марки ПФМС-4.

Экспериментальная установка состоит из кюветы (рисунок 1), в фиксированном положении находятся неподвижные металлические держатели (2, 3), в которых с помощью изоляционных прокладок (5) и электродов (6) крепятся пьезоизлучатель (7) и пьезоприемник (8). Под кюветой, на специальных креплениях (9), находится шагающий двигатель (10). На вал двигателя насажен держатель, где находится исследуемый образец (11). При повороте оси вала (12), перпендикулярной направлению распространения ультразвуковой волны, в полимерном образце возбуждаются продольные и поперечные колебания. В случае, когда угол падения волны в образце со строго параллельными поверхностями равен нулю, в нем распространяется только продольная волна. При увеличении угла поворота в образце будут распространяться две волны продольная и поперечная (рисунок 2а). При достижении критического угла $\theta_{кр.}$ (угол Брюстера) продольная волна будет распространяться по поверхности (рисунок 2б), а в образце распространяется только поперечная волна, причем на границе жидкость – полимерный образец выполняется закон Снеллиуса:

$$\frac{\sin(\theta_{кр.})}{v} = \frac{\sin(\theta_t)}{v_t}. \quad (1)$$

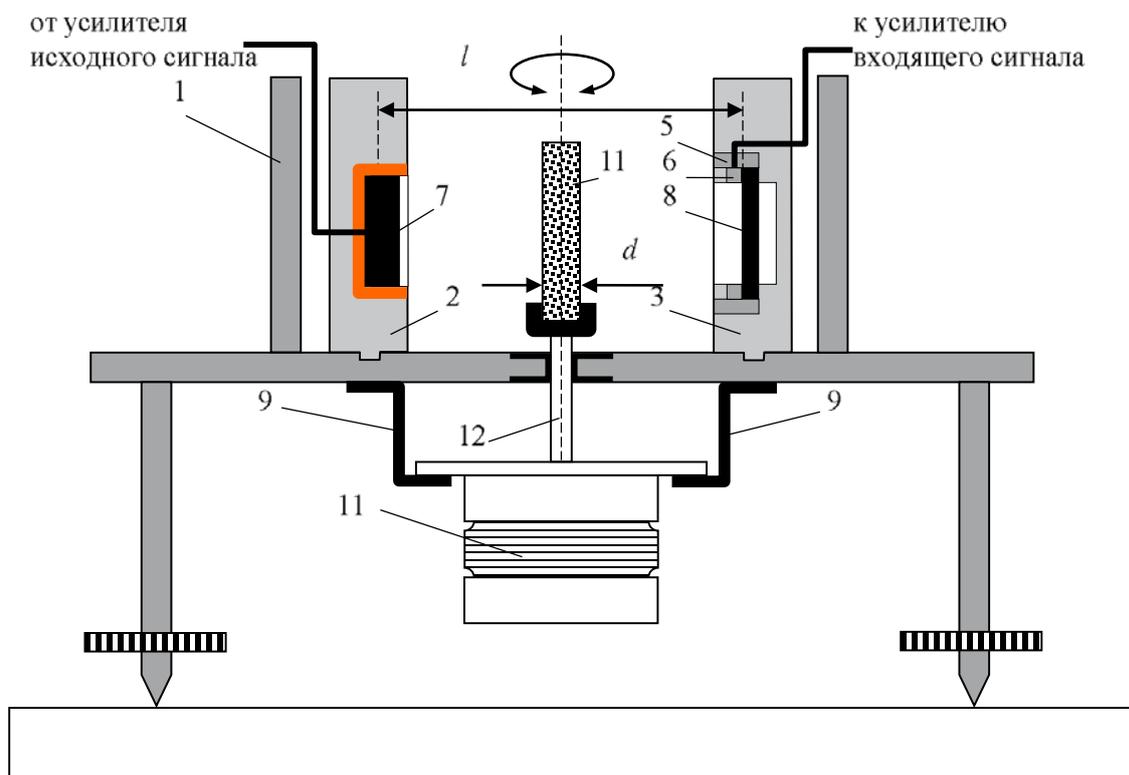


Рисунок 1. – Схема кюветы

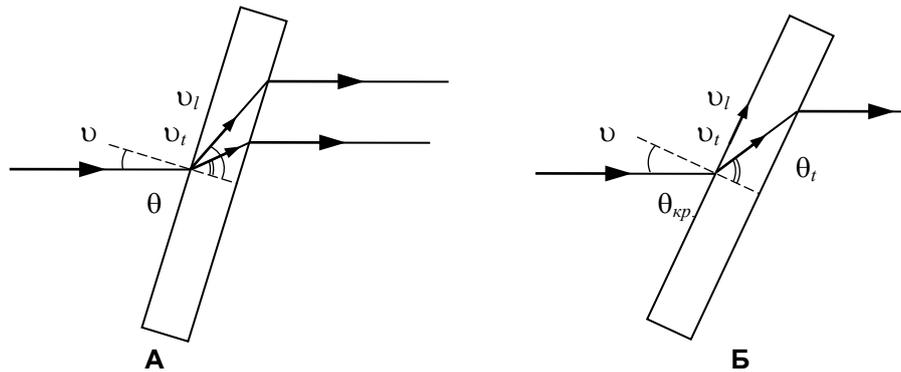


Рисунок 2. – Схема определения угла Брюстера

Установка позволяет за один прием определить скорости распространения продольной v_l и поперечной волны v_t , а также коэффициенты их затухания α_l и α_t .

Электронный блок установки разработан на базе однокристалльного микроконтроллера Atmega 48. На микроконтроллер в электронном блоке возлагаются следующие задачи: формирование зондирующего импульса; выявление принимаемого сигнала и измерения его амплитуды; определение времени задержки принимаемого сигнала относительно зондирующего импульса; передача полученных данных в ПК для дальнейшей обработки; прием от ПК команды и формирования соответствующих управляющих сигналов на шаговый двигатель для поворота исследуемого образца; индикация состояния работы установки и параметров измерения. Микроконтроллер и схема управления шаговым двигателем ПБМГ-200-265-2 реализует режим шагов и полшагов. Полному обороту оси двигателя соответствует 200 и 400 импульсов, соответственно шаг и полшаг поворота составляют $1,8^\circ$ и $0,9^\circ$.

Без полимерного образца, в первую очередь, определяется скорость распространения ультразвуковой волны в иммерсионной жидкости (v_p), по времени прохождения сигнала в жидкости (τ) и амплитуда сигнала (A_0), пришедшего на приемник. Величину v_p рассчитываем по соотношению:

$$v_p = \frac{l}{\tau}, \quad (2)$$

где l – расстояние между излучателями (рис. 1).

Скорость распространения продольной волны в образце рассчитываем по следующему соотношению:

$$v_l = \frac{v_p d}{d - \Delta\tau v_p}, \quad (3)$$

Скорость распространения поперечной волны в образце определяем:

$$v_t = \frac{v_p}{\sqrt{\sin^2(\theta_{кр.}) + \left(\cos(\theta_{кр.}) - \frac{v_p \Delta\tau_t}{d}\right)^2}}, \quad (4)$$

где d – толщина образца; $\Delta\tau_{l,t} = \tau - \tau_{l,t}$, $\tau_{l,t}$ – время прохождения ультразвукового сигнала в кювете с иммерсионной жидкостью и образцом при измерении продольной (поперечной) волны, измеренное измерителем временных интервалов.

Коэффициент Пуассона по значениям скоростей распространения ультразвуковых волн в образце вычисляем по соотношению:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов поглощения продольной α_l и поперечной α_t волн используем соотношение:

$$\alpha_l = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A_l}, \quad (6)$$

$$\alpha_t = \frac{\sqrt{v_t^2 - v_p^2 \sin^2(\theta_{кр.})}}{v_t d} \ln \frac{A_0}{A_t}, \quad (7)$$

где $A_{l,t}$ – амплитуда сигнала продольной (поперечной) УЗ-волн после прохождения сквозь образец.

Обмен данными между электронным блоком установки и ПК, визуализацию результатов измерения и расчет упругих параметров полимерных систем проводили с по-

мощью разработанной программы. Работа программы предусматривает: открытие последовательного порта ПК, через который происходит обмен данными; ввод данных (толщина и плотность образца); расчет скорости ультразвука в иммерсионной жидкости; обработку результатов измерений и представление данных в виде таблицы и графика зависимости A_t от угла поворота образца; определение угла Брюстера по максимуму величины амплитуды сигнала; расчет упругих параметров; вывод и печать результатов расчета.

В лабораторном практикуме предлагаются работы, результаты экспериментальных исследований которых дают возможность осуществлять оценку механических, теплофизических свойств полимеров и их систем. Экспериментальные исследования полимерных систем проводятся с использованием предлагаемой установки. В каждой лабораторной работе особое внимание уделяется наиболее полному раскрытию физической сущности явлений и установлению закономерностей, которыми эти явления описываются. Для анализа основных закономерностей, изучаемых в работе физического практикума, предлагается теоретический материал для самоподготовки, изучение которого дает возможность студенту выяснить взаимосвязь между физическими величинами, которые описывают явление, процессы, исследуемые экспериментально. Выполнение работ физического практикума могут быть смоделированы с использованием современного компьютерного обеспечения. Большинство лабораторных работ составлены так, что студентам предоставляется возможность выполнения небольших самостоятельных исследований. Студент устанавливает режим работы приборов, выбирает область измерений и способ регистрации.

Для выполнения лабораторных работ этого практикума можно использовать полимерные образцы, получаемые методом горячего прессования, готовые пластмассовые изделия или полимерные пленки. Выполнение некоторых работ возможно по нескольким вариантам. Основная идея их выполнения состоит в том, чтобы органично совместить практику проведения лабораторных работ, практику решения задач и научно-исследовательскую работу. Такой параллельный подход дает возможность изучать теоретический материал по принципам развития и дополнения.

Рассмотрим структуру таких работ.

Лабораторная работа. Исследование процессов распространения ультразвука в полимерах и определение модулей продольной и поперечной деформации

Цель: определить скорость ультразвука в исследуемом полимерном образце; рассчитать модули продольной (E) и поперечной (μ) деформаций.

Оборудование: полимерный образец, ультразвуковая установка, микрометр.

Теоретические сведения. Ультразвуковая волна, как и любая другая волна, периодическая в пространстве и во времени. Если участок среды имеет объем V и массу m , в которой распространяется ультразвуковая волна, то потенциальная энергия такой волны:

$$W_{\text{п}} = \frac{EV\omega^2 A^2}{2v_l^2} \cos^2(\omega t + \phi), \quad (8)$$

где E – модуль упругости материала, v_l – скорость продольной ультразвуковой волны, а кинетическая энергия волны:

$$W_{\text{к}} = \frac{\rho V\omega^2 A^2}{2} \cos^2(\omega t + \phi), \quad (9)$$

где ρ – плотность среды.

Анализ соотношений (8) и (9) показывает, что $W_{\text{п}}$ и $W_{\text{к}}$ бегущей волны меняются в одной фазе. Полная энергия участка волны равна:

$$W = W_{\text{п}} + W_{\text{к}} = \frac{V\omega^2 A^2}{2} \left(\frac{E}{v_l^2} + \rho \right) \cos^2(\omega t + \phi). \quad (10)$$

Согласно закону сохранения энергии (пренебрегая потерями на рассеяние) получают $W_{\text{п max}} = W_{\text{к max}}$ или:

$$\frac{EV\omega^2 A^2}{2v_l^2} = \frac{\rho V\omega^2 A^2}{2}. \quad (11)$$

Откуда:

$$\frac{E}{v_l^2} = \rho. \quad (12)$$

Таким образом, модуль продольной деформации:

$$E = \rho v_l^2, \quad (13)$$

а соответственно модуль поперечной деформации:

$$\mu = \rho v_t^2, \quad (14)$$

где v_t – скорость распространения поперечной ультразвуковой волны.

Описание экспериментальной установки. Схема ультразвуковой установки и принцип ее работы рассмотрены выше. С учетом процессов рассеивания и поглощения ультразвуковых волн, при известных скоростях v_1 , v_t и коэффициентах их поглощения α_1 , α_t рассчитывают действительные и мнимые части модуля продольной деформации (E' , E'') модуля сдвига (μ' , μ'') и объемного модуля (k' , k'') по соотношениям:

$$E' = \rho v_t^2 \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad E'' = \rho v_t^2 \frac{2\alpha_t v_t}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}, \quad (15)$$

$$\mu' = \rho v_t^2 \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad \mu'' = \rho v_t^2 \frac{2\alpha_t v_t}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}, \quad (16)$$

$$k' = E' - \frac{4}{3}\mu'; \quad k'' = E'' - \frac{4}{3}\mu'' \quad (17)$$

где ρ – плотность; ω – частота ультразвукового сигнала.

Порядок выполнения работы.

1. Закрепив образец в держателе дифференциальной кюветы, определить время прохождения ультразвуковой волны через образец (фиксируем время между двумя импульсами для одного и второго приемника).

ЛИТЕРАТУРА

- Enhanced toughness of multilayer graphene-filled poly(vinylchloride) composites prepared using melt-mixing method / H. Wang [et al.] // Polymer composites. – 2017. – V. 38, № 1. – P. 138–146.
- Fractal percolation approach in determining structured and mechanical properties of polyurethane auxetics / T. M. Shevchuk [et al.] // Metallophysics and Advanced Technologies. – 2020. – V. 42. – № 9. – P. 1293–1302. doi.org/10.15407/mfint.42.09.1293.
- Recent development and future trends in coir fiber-reinforced green polymer composites: review and evaluation / S. Jayavani [et al.] // Polymer composites. – 2016. – V. 37. – № 11. – P. 3296–3309.
- The frequency spectrum of the structure elements of filled poly (vinylchloride) / B. S. Kolupaev [et al.] // J. Polym. Mater. – 1995. – №12. – P. 143–149.
- Шевчук, Т. Н.* Формирования знаний о макромолекулярных системах у будущих учителей физики при изучении курса «Физика полимеров» / Т. Н. Шевчук, Н. А. Бордюк // Весті БДПУ. Серія 3. – 2018. – №4(98). – С. 32–36.

2. Пользуясь микрометром, определить толщину образца.

3. Согласно формулам (3) и (15) определить v_1 и E .

4. Поворачивая образец, наблюдаем сложную интерференционную картину, а при достижении критического угла имеем картину прохождения только поперечной волны (картина упрощается и наблюдается затухающий синусоидальный сигнал). Время определяется аналогично пункту 1.

5. Используя формулы (4) и (16), определить v_t и μ .

6. Согласно соотношению (15) определить модуль объемной деформации.

7. Сравнить значения E , μ , K и сделать выводы.

Заключение. Внедрение в учебно-воспитательный процесс современных ультразвуковых экспериментальных методов исследования полимеров позволяет усовершенствовать лабораторный практикум спецкурсов науки о высокомолекулярных соединениях. Кроме того, развивается гибридный интеллект студентов, преподавателей как адаптивная система информационного взаимодействия; формируются у будущих педагогов навыки и умения поиска информации современных исследований в области фундаментальной науки, моделирование физических, химических, биологических процессов в макромолекулярных системах.

REFERENCES

- Enhanced toughness of multilayer graphene-filled poly(vinylchloride) composites prepared using melt-mixing method / H. Wang [et al.] // Polymer composites. – 2017. – V. 38, № 1. – P. 138–146.
- Fractal percolation approach in determining structured and mechanical properties of polyurethane auxetics / T. M. Shevchuk [et al.] // Metallophysics and Advanced Technologies. – 2020. – V.42. – № 9. – P. 1293–1302. doi.org/10.15407/mfint.42.09.1293.
- Recent development and future trends in coir fiber-reinforced green polymer composites: review and evaluation / S. Jayavani [et al.] // Polymer composites. – 2016. – V. 37. – № 11. – P. 3296–3309.
- The frequency spectrum of the structure elements of filled poly (vinylchloride) / B. S. Kolupaev [et al.] // J. Polym. Mater. – 1995. – №12. – P. 143–149.
- Shevchuk, T. N.* Formirovaniya znaniy o makromolekulyarnykh sistemah u budushchih uchitelej fiziki pri izuchenii kursa «Fizika polimerov» / T. N. Shevchuk, N. A. Bordyuk // Vesci BDFPU. Seryya 3. – 2018. – №4(98). – S. 32–36.