

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.10

УДК 678.762.3

А.А. Пушкарева^{1,2}, М.А. Леухина¹, Л.Л. Хименко¹

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСА НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИДИВИНИЛИЗОПРЕНУРЕТАНЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА

Физическая структура полимерных тел, обусловленная различными видами упорядочения во взаимном расположении макромолекул, называется надмолекулярной структурой (НМС). Взаимное расположение, размеры элементов надмолекулярной структуры зависят от конфигурации и конформации, химического состава мономерных звеньев и макромолекулы в целом, размеров отдельных атомов, продолжительности и скорости структурообразования, условий синтеза и переработки. Надмолекулярная структура полимеров определяет комплекс физических свойств, скорость и механизм химических и физико-химических процессов. Вследствие различий в надмолекулярной структуре изделия из одного и того же полимера зачастую имеют разные свойства, как технологические, так и физико-механические.

В связи с этим очень актуален вопрос о разработке методики определения радиуса надмолекулярной структуры полимеров.

В данной работе представлена разработка методики определения среднего размера надмолекулярных образований (НМО) полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера в конденсированном состоянии, так как методы, используемые ранее для определения НМО, в данном случае не подходили в силу разных причин. Для определения размера надмолекулярных образований каучука был выбран метод спектрофотометрии. Исследования проведены на спектрофотометре «ПромЭкоЛаб ПЭ-5400УФ» с лампой накаливания в диапазоне длин волн от 340 до 1100 нм. Методика основана на определении логарифмической зависимости оптической плотности олигомера от длины волны проходящего через него света в видимой и ближней инфракрасной областях и на расчете среднего радиуса (r) НМО с использованием теоретических уравнений, связывающих r с другими спектральными характеристиками. В результате разработанная методика позволила определить радиус 28 промышленных партий полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера и выявить различие между радиусами их НМО.

Ключевые слова: олигомер, надмолекулярная структура, спектрофотометрия, оптическая плотность, радиус надмолекулярной структуры, длина волны, показатель преломления, волновой экспонент.

A.A. Pushkareva^{1,2}, M.A. Leuhina¹, L.L. Himenko¹

¹Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

²UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russian Federation

METHOD FOR DETERMINING THE RADIUS OF THE SUPRAMOLECULAR STRUCTURE OF A POLYDIVINYLIOPRENURETHANEOXIDE OLIGOMER

The physical structure of polymer bodies, due to different types of ordering in the mutual arrangement of macromolecules, is called the supramolecular structure (NMS). The relative position and size of the elements of the supramolecular structure depend on the configuration and conformation, the chemical composition of the monomer units and the macromolecule as a whole, the size of individual atoms, the duration and speed of structure formation, the conditions of synthesis and processing. The supramolecular structure of polymers determines the complex of physical properties, the speed and mechanism of chemical and physico-chemical processes. Due to differences in the supramolecular structure, products made of the same polymer often have different properties, both technological and physico-mechanical.

In this regard, the question of developing a method for determining the radius of the supramolecular structure of polymers is very relevant.

This paper presents the development of a method for determining the average size of supramolecular formations (NMOS) of a polydivinylisoprenurethanepoxide oligomer in the condensed state, since the methods previously used for determining NMOS were not suitable in this case for various reasons. To determine the size of supramolecular formations of rubber, the method of spectrophotometry was chosen. The studies were carried out on a spectrophotometer "PromEcoLab PE-5400UF" with an incandescent lamp in the wavelength range from 340 to 1100 nm.

The method is based on the determination of the logarithmic dependence of the optical density of the oligomer on the wavelength of light passing through it in the visible and near-infrared regions and on the calculation of the average radius (r) of the NMR using theoretical equations relating r to other spectral characteristics. As a result, the developed method made it possible to determine the radius of 28 industrial batches of polydivinylisoprenurethanepoxide oligomer and to identify the difference between the radii of their NMOS.

Keywords: *oligomer, supramolecular structure, spectrophotometry, optical density, radius of supramolecular structure, wavelength, refractive index, wave exponent.*

Введение. В настоящее время полиуретановые олигомерные композиции широко используются как эластичное связующее для приготовления заливочных и пропиточных композиций, для изделий радиопромышленности, для производства герметиков и клеев, для повы-

шения адгезионных свойств кровельных и синтетических спортивных покрытий [1–5]. Одним из таких композиционных связующих является полидивинилизопренуретанэпоксидный олигомер с концевыми эпоксидными группами, произведенный ОАО «Стерлитамакский нефтехимический завод» в 2002–2019 гг.

Благодаря наличию углеводородного скелета, он обеспечивает вулканизатам высокую эластичность в широком диапазоне температур, стойкость к действию кислот и щелочей. Из-за наличия уретанэпоксидного фрагмента в цепи он обладает высокими адгезионными и диэлектрическими свойствами, морозостойкостью до минус 70 °С. Эти свойства являются приоритетными в областях применения данного олигомера [6].

Химические и физические свойства олигомеров зависят от природы и строения полимерной цепи и расположения функциональных групп [7, 8].

Но для получения олигомера с улучшенными физико-механическими свойствами особенно необходимо учитывать молекулярно-массовое распределение (ММР) и взаимное расположение макромолекул и их элементов, так называемую надмолекулярную структуру (НМС) или надмолекулярную организацию (НМО). Этими показателями во многом определяется химическое поведение олигомера и эксплуатационные свойства полученных на его основе материалов [9–13].

Под надмолекулярной структурой полимерных материалов принято понимать взаимное расположение в пространстве структурных элементов – фрагментов цепей макромолекул, звеньев, молекулярных кластеров (глобул, кристаллитов, доменов), образующих макроскопическое полимерное вещество. При этом важная роль принадлежит использованию эффективных приемов регулирования надмолекулярной структуры, особенно на первичных уровнях упаковки макромолекул [14].

Представления о надмолекулярных структурах прочно вошли в физику полимеров. Они базируются на данных многих методов исследования, позволяющих фиксировать в объеме полимера наличие областей разной степени упорядоченности, размеры которых существенно превышают поперечные размеры отдельных макромолекул конкретного полимера и определяют физическую структуру полимеров. Размеры этих областей колеблются от единиц нанометров до микрон и миллиметров [15].

Таким образом, в настоящее время для достижения и регулирования необходимого комплекса физико-механических характеристик полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера, изучение его НМС крайне востребовано. Исходя из этого очень актуальной становится задача разработки методики определения радиуса надмолекулярной структуры.

Выбор метода и оптимальных условий анализа. Изучение размеров НМС полимерных связующих может быть осуществлено при помощи различных физических методов: микроскопия (световая, ультрафиолетовая, электронная), рентгеноструктурный анализ, электронография, спектроскопия (ультрафиолетовая, инфракрасная, ядерного магнитного резонанса и др.), оптические методы (метод двойного лучепреломления и др.) [16].

По данным отечественных и зарубежных источников [17–23] самым оптимальным методом для определения радиуса НМС полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера считается метод спектрофотометрии, который находит все большее применение для изучения умеренно-концентрированных растворов и студней полимеров. Причиной этого является широкая его формативность при выяснении природы надмолекулярной структуры и процессов фазового разделения. Используемый метод является одним из немногих, который позволяет решать сложную проблему – определение размеров частиц в растворах и студнях при определенной концентрации полимера. Малоугловое рассеяние поляризованного света является эффективным для изучения надмолекулярного порядка как в твердых, так и в жидких полимерных системах, позволяющим определять размер элемента НМС от долей микрон до десятков микрон [24].

За основу методики определения радиуса надмолекулярных структур были взяты теоретические разработки, изложенные в работах [25–28] и апробированные на полидивинилизопренуретанэпоксидном олигомере.

Вязкотекучее состояние полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера позволяет определять параметры его надмолекулярной структуры в конденсированном состоянии, поэтому сложная структура олигомера моделируется коллоидной системой, в которой за дисперсную фазу принимается совокупность надмолекулярных образований, а за дисперсионную среду – неассоциированные макромолекулы каучука [26].

Исследования проведены на спектрофотометре «ПромЭкоЛаб ПЭ-5400УФ» с лампой накаливания в диапазоне длин волн от 340 до 1100 нм. Принцип действия прибора основан на том, что в пробе излучение (I_0) частично поглощается, а интенсивность излучения, прошедшего через нее (I), регистрируется детектором. На регистрирующее устройство передается значение оптической плотности (D) согласно уравнению Бугера – Бера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau l}, \quad (1)$$

$$\tau = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)/l = \frac{2,3 \lg \frac{I_0}{I}}{l} = \frac{2,3D}{l}, \quad (2)$$

где τ – коэффициент, называемый мутностью, характеризующий долю интенсивности света при его прохождении на расстоянии $l = 1$ см; $\lg \frac{I_0}{I}$ – оптическая плотность D .

С другой стороны, коэффициент τ в определенном диапазоне длин волн связан с величиной λ уравнением Ангстрема:

$$\tau = A \cdot \lambda^{-n}, \quad (3)$$

где A – константа; n – волновой экспонент.

Откуда величина волнового экспонента может быть определена как тангенс угла наклона в координатах $\lg \tau - \lg \lambda$:

$$n = -\frac{\Delta \lg \tau}{\Delta \lg \lambda}. \quad (4)$$

Согласно зависимости $\tau - D$ волновой экспонент может быть представлен в виде

$$n = -\frac{\Delta \lg D}{\Delta \lg \lambda}. \quad (5)$$

Оптическая плотность D находится в степенной зависимости от длины волны света λ : $D \sim \lambda^{-n}$. Эта зависимость $\lg D - \lg \lambda$ в используемом диапазоне длин волн представляет собой прямую линию, по тангенсу угла наклона которой определяется величина волнового экспонента n , в свою очередь являющегося функцией относительного размера частиц α и относительного показателя преломления m :

$$n = n(\alpha, m), \quad (6)$$

где $\alpha = 2\pi r_{\text{ср}} \mu_0 / \lambda_{\text{ср}}$; $m = \mu / \mu_0$, r – средневолновой размер частиц; $\lambda_{\text{ср}}$ – средняя длина волны в выбранном диапазоне измерения $\Delta\lambda$; μ_0 и μ – показатели преломления дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно.

Зависимости волнового экспонента n от относительного размера частиц представлены на рис. 1 и 2.

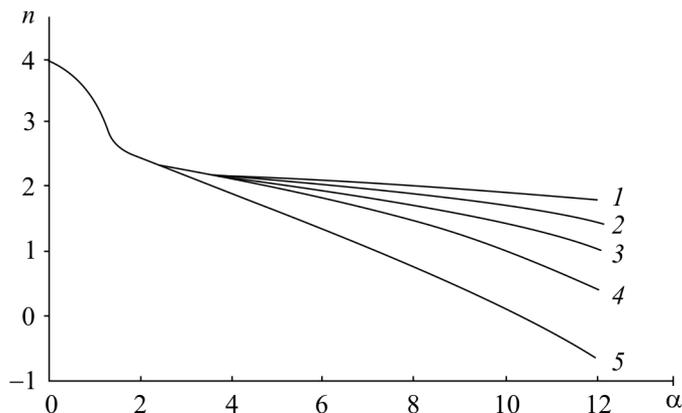


Рис. 1. Зависимость волнового экспонента n от относительного размера частиц при разных значениях относительного показателя преломления m :
 1 – $m = 1,05$; 2 – $m = 1,1$; 3 – $m = 1,12$; 4 – $m = 1,15$; 5 – $m = 1,2$

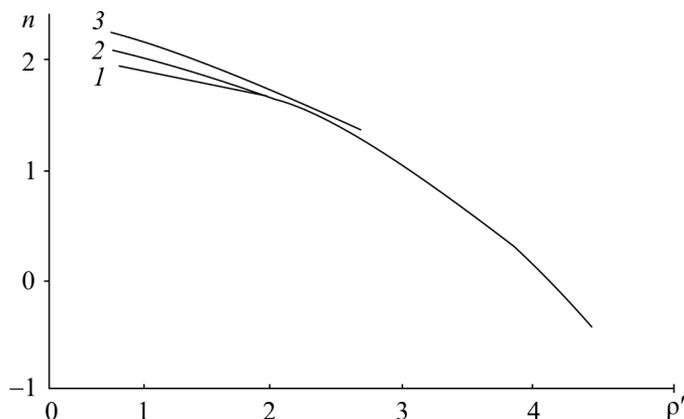


Рис. 2. Зависимость волнового экспонента n от ρ' :
 1 – $m = 1,0$; 2 – $m = 1,05$; 3 – $m = 1,1$

По кривым видно, что при $n < 2,2$ и $m \leq 1,05$ точное определение α затруднено вследствие очень пологого характера калибровочной кривой.

Отсюда при $n < 2,2$ пользуются калибровочной кривой $n = n(\rho')$, представленной на рис. 2.

Величина ρ' имеет смысл фазового сдвига волны в результате ее прохождения через центр сферической частицы. Она является объединенным параметром α и m и связана с ними аналитическим выражением

$$\rho' = 2\alpha(m - 1). \quad (7)$$

Полученное выражение позволяет определить размеры оптически неоднородных частиц при известном m по уравнению

$$\rho' = \frac{4\pi\mu_0 r(m - 1)}{\lambda_{\text{cp}}}, \quad (8)$$

где λ_{cp} – средняя длина волны, откуда легко можно вычислить величину r .

Определение проводится при такой длине, при которой наблюдается максимальное поглощение излучения олигомера (λ_{max}). Для установления значения записывается обзорный спектр пробы, после чего выбирают длину волны, при которой наблюдается максимум поглощения.

Для полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера рабочим диапазоном длин волн является интервал от 600 до 850 нм. С целью уменьшения эффекта многократного рассеяния света в кюветной камере спектрофотометра установлена диафрагма с диаметром отверстия ~ 2 мм.

Выбор рабочей длины (толщины) кюветы от 0,5 до 50 мм провели таким образом, чтобы величина оптической плотности D исследуемой системы в рабочем диапазоне длин волн находилась в пределах $0,2 \leq D \leq 0,9$.

Методика проведения испытания. По измеренным значениям оптической плотности D при длинах волн от 600 до 900 нм (через каждые 50 нм) строят зависимость $\lg D - \lg \lambda$, которая в используемом диапазоне представляет собой прямую линию. Искривление прямолинейного участка указывает на границу λ , за которой нельзя использовать эту зависимость для расчета размеров надмолекулярных образований. После построения зависимости $\lg D - \lg \lambda$ определяют величину волнового экспонента n из соотношения

$$n = - \Delta \lg D / \Delta \lg \lambda. \quad (9)$$

По полученному значению n с помощью калибровочных кривых, представленных на рис. 1, 2, находят величины α и ρ' :

$$n = n(\alpha), \text{ если } 2,2 < n < 4, \quad (10)$$

$$n = n(\rho'), \text{ если } n < 2,2. \quad (11)$$

Радиус надмолекулярных образований полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера в мкм вычисляют в зависимости от значения волнового экспонента по формулам:

$$r = \frac{\alpha \lambda_{\text{cp}} m}{2\pi\mu}; \quad (12)$$

$$r = \frac{\rho' \lambda_{\text{cp}}}{4\pi\mu_0(m-1)}, \quad (13)$$

где r – средневолновой размер частиц; λ_{cp} – средняя длина волны в выбранном диапазоне измерения $\Delta\lambda$; m – относительный показатель преломления олигомера (1,05); μ_0 и μ – показатели преломления дисперсионной среды (1,513) и дисперсной фазы (1,580) соответственно.

Обработка результатов анализа. Изложенные теоретические закономерности были экспериментально проверены на 28 партиях полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера. Величины радиусов надмолекулярной структуры различных партий приведены в таблице.

Результаты определения радиуса надмолекулярной структуры полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера различных партий

Образец	Радиус, мкм	Образец	Радиус, мкм	Образец	Радиус, мкм
п. 11/02	2,10	п. 66/03	2,48	п. 31/04	1,96
п. 11/02	1,94	п. 1/04	2,08	п. 35/04	1,91
п. 8/03	2,18	п. 2/04	2,13	п. 118/10	1,91
п. 30/03	2,38	п. 3/04	2,29	п. 13/11	1,75
п. 34/03	1,94	п. 4/04	2,19	п. 14/11	1,89
п. 58/03	1,89	п. 10/04	2,30	п. 15/11	1,45
п. 62/03	2,26	п. 12/04	2,20	п. 16/11	2,00
п. 23/11	1,69	п. 47/12	2,15	п. 94/12	2,56
п. 25/11	1,42	п. 62/12	2,56	п. 60/17	2,38
п. 125/17	2,31				

Как видно из табличных данных, промышленные партии олигомера отличаются между собой размерами НМО, величина радиуса которых колеблется от 1,42 до 2,56 мкм.

Заключение. На основании проведенных исследований при помощи метода спектрофотометрии разработана методика определения радиу-

са НМС полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера. Полученные экспериментальные данные были обработаны методом математической статистики. Абсолютная погрешность определения среднего радиуса НМО при доверительной вероятности $P = 0,95$ составляет $\pm 0,16$ мкм. Допустимое расхождение между параллельными определениями составляет 0,2 мкм. Данная методика позволяет проводить отбор партий полидивинилизопренуретанэпоксидного олигомера с оптимальным радиусом надмолекулярных образований в целях определения комплекса его физических свойств, скорости и механизма физико-химических и химических процессов и получения требуемых физико-механических характеристик композиционных материалов на его основе.

Список литературы

1. Скорняков А.С. Контактные клеи на основе полиуретанов и натуральных каучуков // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 6. – С. 2–8.
2. Лукина А.И., Студенов И.Г., Парахин И.В. Полимерные пены на основе полиуретанов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 6. – С. 23–20.
3. Разработка и исследование свойств защитного покрытия на основе модифицированного полиуретана / В.Ю. Чухланов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6-7. – С. 1365–1368.
4. Жесткие пенопласты на основе полиуретанов / А.И. Саматадзе [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 5. – С. 2–6.
5. Превосходство некоторой отечественной продукции из полиуретана перед зарубежными аналогами / С.В. Попов [и др.] // Молодой ученый. – 2014. – № 14-1. – С. 34–35.
6. Твердов А.И., Ворончихин В.Д. Промышленное производство диеновых олигомеров в российской федерации // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета). – 2013. – № 22. – С. 036–038.
7. Энгельс С.Г., Евреинов В.В., Кузаев А.И. Реакционноспособные олигомеры. – М.: Химия, 1985. – 304 с.
8. Осошник, И.А., Шутилин Ю.Ф., Карманова О.В. Производство резиновых технических изделий / Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж, 2007. – 972 с.
9. Шур А.М. Высокомолекулярные соединения: учеб. – М.: Высшая школа, 1981. – 656 с.
10. Каргин В.А. Структура и механические свойства полимеров. – М.: Наука, 1979. – 451 с.
11. Зезина А.Б. Высокомолекулярные соединения: учеб. и практ. – М.: Юрайт, 2016. – 340 с.

12. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров. – М.: Химия, 1989. – 432 с.
13. Сутягин В.М., Бондалетова Л.И. Химия и физика полимеров. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 208 с.
14. Матвеева Л.Ю., Ястребинская А.В. Взаимосвязь надмолекулярной структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе термореактивных связующих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 49–54.
15. Лебедев Д.В. Молекулярная подвижность в приповерхностных нанослоях полимеров: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. – СПб., 2011. – 191 с.
16. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров / СПбЛТА. – СПб., 1999. – 628 с.
17. Методы оптической спектроскопии / О.А. Федорова, И.И. Кулакова, Ю.А. Сотникова [и др.]. – М.: Изд-во МГУ, 2015. – 117 с.
18. Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. – Казань: Изд-во КГТУ, 2002. – 604 с. – 294 с.
19. Wilfried Heller, Hari L. Bhatnagar, Masayuki Nakagaki J. Theoretical Investigations on the Light Scattering of Spheres. XIII. The “Wavelength Exponent” of Differential Turbidity Spectra* // Journal of chemical physics. – 1962. – No. 5. – P. 1163–1170.
20. Debye P.J. Molecular-weight determination by light scattering // Phys. Coll. Chem. – 1947. – Vol. 51. – P. 18.
21. Heller W. Range of practical validity of the Debye and the Rayleigh equations for determining molecular weights from light scattering and methods allowing a limited extension of this range // J. Polym. Sci. – 1965. – Vol. 3 – P. 3313.
22. Zimm B.H. The Scattering of Light and the Radial Distribution Function of High Polymer Solutions // J. Chem. Phys. – 1948. – Vol. 16. – P. 1093.
23. Doty P., Steiner R.F. Light Scattering and Spectrophotometry of Colloidal Solutions // J. Chem. Phys. – 1950. – Vol. 18. – P. 1211.
24. Слонимский Г.Л. Современные физические методы исследования полимеров. – М.: Химия, 1982. – 256 с.
25. Золотарев В.М., Никоноров Н.В., Игнатъев А.И. Современные методы исследования оптических материалов. – СПб., 2001. – 266 с.
26. Воробьев В.В. Роль надмолекулярной структуры полярных и неполярных каучуков в формировании структурно-механических свойств связующего и полимерных композиций на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 20.02.86. – М., 1986. – 180 с.
27. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. – М.: Гослитиздат, 1951. – 288 с.
28. Эскин В.Е. Рассеяние света растворами полимеров. – М.: Наука, 1973. – 352 с.

References

1. Skorniyakov A.S. Kontaktnye klei na osnove poliuretanov i natural'nyh kauchukov [Contact adhesives based on polyurethanes and natural rubbers]. *Klei. Germetiki. Tehnologii*, 2011, no. 6, pp. 2-8.
2. Lukina A.I., Parakhin I.G. Polimernye peny na osnove poliuretanov [Polymer foams based on polyurethanes]. *All materials: encyclopedic reference book*, 2016, no. 6, pp. 23-20.
3. Chukhlanov V.Yu. [et al.] Razrabotka i issledovanie svoystv zashhitnogo pokrytija na osnove modifitsirovannogo poliuretana [Development and research of the properties of a protective coating based on modified polyurethane]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no 6-7, pp. 1365-1368.
4. Samatadze A.I. [et al.] Zhestkie penoplasty na osnove poliuretanov [Rigid foams based on polyurethane]. *All materials: encyclopedic reference book*, 2014, no. 5, pp. 2-6.
5. Popov S.V. [et al.] Prevoshodstvo nekotorykh otechestvennoy produkcii iz poliuretana pered zarubezhnyimi analogami [Superiority of some domestic products from polyurethane over foreign analogues]. *Molodoj uchenyj*, 2014, no. 14-1, pp. 34-35.
6. Tverdov A.I., Voronchikhin V.D. Commercial production of diene oligomers in Russian federation. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2013, no. 22, pp. 036-038.
7. Engels S.G., Evreinov V.V., Kuzaev A.I. Reakcionnosposobnye oligomery [Reactionary oligomers]. Moscow, Himija, 1985, 304p.
8. Ososhnik I.A., Shutilin, Yu.F., Karmanova, O.V. Proizvodstvo rezinovykh tehnikeskikh izdelij [Production of rubber technical products]. Voronezh, Voronezh State Technological Academy, 2007, 972 p.
9. Shur A.M. Vysokomolekuljarnye soedineniya [High-molecular compounds]. Moscow, Vysshaja shkola, 1981, 656 p.
10. Kargin V.A. Struktura i mehanicheskie svoystva polimerov [Structure and mechanical properties of polymers]. Moscow, Nauka, 1979, 451 p.
11. Zezina A.B. Vysokomolekuljarnye soedineniya [High-molecular compounds]. Moscow, Jurajt, 2016, 340 p.
12. Tugov I.I., Kostrykina G.I. Himija i fizika polimerov [Chemistry and physics of polymers]. Moscow, Himija, 1989, 432 p.
13. Sutyagin V.M., Bondaletov L.I. Himija i fizika polimerov [Chemistry and physics of polymers]. Tomsk, Tomskij politehnicheskij universitet, 2003, 208 p.
14. Matveeva L.Yu., Yastrebinskaya A.V. Directed regulation of the supramolecular structure of polymer binders and building composites on their basis. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2017, no. 12, pp. 49-54.
15. Lebedev D.V. Molekuljarnaja podvizhnost' v pripoverhnostnykh nanoslojakh polimerov [Molecular mobility in near-surface nanolayers of polymers]. Abstract of Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2011, 191 p.

16. Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. Himija drevesiny i sinteticheskikh polimerov [Chemistry of wood and synthetic polymers], Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskij lesotekhnicheskij universitet antiplagiat, 1999, 628 p.

17. Fedorova O.A., Kulakova I.I. Sotnikova Yu.A. [et al.] Metody opticheskoj spektroskopii [Methods of optical spectroscopy]. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M. V. Lomonosova, 2015, 117 p.

18. Averko-Antonovich I.Yu., Bikmullin R.T. Metody issledovanija struktury i svojstv polimerov [Methods of studying the structure and properties of polymers.stipend]. Kazan, Kazanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2002, 604 p.

19. Wilfried Heller, Hari L. Bhatnagar, Masayuki NakagakiJ Theoretical Investigations on the Light Scattering of Spheres. *XIII. The "Wavelength Exponent" of Differential Turbidity Spectra* */ the journal of chemical physics*, 1962, no. 5, P.1163-1170.

20. Debye P.J. Molecular-wight determination by light scattering. *Phys. Coll. Chem*, 1947, Vol. 51, pp. 18.

21. Heller W. Range of practical validity of the Debye and the Rayleigh equations for determining molecular weights from light scattering and methods allowing a limited extension of this range. *J. Polym. Sci*, 1965, Vol. 3, pp. 3313.

22. Zimm B.H. The Scattering of Light and the Radial Distribution Function of High Polymer Solutions. *J. Chem. Phys*, 1948, Vol. 16, pp.1093.

23. Doty P., Steiner R.F. Light Scattering and Spectrophotometry of Colloidal Solutions. *J. Chem. Phys*, 1950, Vol. 18, pp.1211.

24. Slonimsky G.L. Sovremennye fizicheskie metody issledovanija polimerov [Modern physical methods of polymer research]. Moscow, Himija, 1982, 256 p.

25. Zolotarev V.M., Nikonorov N.V., Ignatiev. A.I. Sovremennye metody issledovanija opticheskikh materialov [Modern methods of optical materials research], Saint Petersburg, Nacional'nyj issledovatel'skij universitet informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki, 2001, 266 p.

26. Vorob'ev V.V. Rol' nadmolekuljarnoj struktury poljarnyh i nepoljarnyh kauchukov v formirovanii strukturno-mehaničeskikh svojstv svjazujushhego i polimernyh kompozicij na ih osnove [The role of the supramolecular structure of polar and nonpolar rubbers of in the formation of structural and mechanical properties of the binder and polymer compositions based on them]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 1986.

27. Shifrin K.S. Rassejanie sveta v mutnoj srede [Light scattering in a turbid medium]. Moscow, Goslitizdat, 1951, 288 p.

28. Eskin V.E. Rassejanie sveta rastvorami polimerov [Light scattering by polymer solutions]. Moscow, Nauka, 1973, 352 p.

Получено 22.03.2021

Об авторах

Пушкарева Ангелина Алексеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры технологии полимерных материалов, порохов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29); инженер-химик АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: ang415285@yandex.ru).

Леухина Мария Алексеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры технологии полимерных материалов, порохов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29); старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, 16, e-mail: Leuhina.ma@mail.ru).

Хименко Людмила Леонидовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии полимерных материалов, порохов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Lhimenko@yandex.ru).

About the authors

Angelina A. Pushkareva (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student of the Department of Technology of Polymer Materials, Gunpowder, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990); Chemical engineer, UEC-Aviadvigatel JSC (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: ang415285@yandex.ru).

Maria A. Leuhina (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student of the Department of Technology of Polymer Materials, Gunpowder» Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990); Senior researcher, JSC Scientific Research Institute of Polymeric Material (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: Leuhina.ma@mail.ru).

Ludmila L. Himenko (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Polymer Materials, Gunpowder, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: Lhimenko@yandex.ru).