

Термодинамика скрытой маркировки упаковки из прозрачной термоусадочной пленки

Валерий Ю. Конюхов	¹	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413
Александр А. Николаев	²	a.a.nikolaev@mospolytech.ru	 0000-0003-3232-6753
Алёна А. Прихожая	²	lekalena03@gmail.com	 0009-0004-3424-6428
Вячеслав К. Долгонос	²	dolgonosov@inbox.ru	 0009-0000-9962-6211
Александр П. Кондратов	²	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия

² Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. Описаны оптические свойства, двойное лучепреломление и эффект плеохроизма в многослойных покрытиях и пластиковой упаковке, изготовленной из поливинилхлорида отечественного производства. Плеохроизм плёнок наиболее интенсивно проявляется в потоке света, проходящего сквозь несколько слоёв плёнки, и имеет широкий диапазон цвета при комбинации в материалах для гибкой прозрачной упаковки нескольких слоёв термоусадочной плёнки поливинилхлорида и двуосноориентированной плёнки изотактического полипропилена. Установлено, что цвет нескольких слоёв термоусадочной плёнки поливинилхлорида в проходящем поляризованном свете изменяется при воздействии органических растворителей. Это явление предложено использовать для скрытой маркировки упаковки или этикетки и борьбы с контрафактным производством товаров массового потребления, реализуемого населению в торговой сети магазинов. Экспериментально обосновано оптимальное количество слоёв прозрачной полимерной плёнки для достижения заметности защитной маркировки и возможности идентификации товара по товарному знаку или с использованием штрихового кода. Цветовое различие многослойных плёнок поливинилхлорида до и после обработки летучим растворителем достигает 35 единиц при двух и более слоях, обуславливает яркий цвет товарного знака и/или достаточный контраст кода, применяемого для скрытой маркировки упаковки или этикетки, выявляемых в поляризованном свете. Показано применение критерия Флори-Хаггинса для количественной оценки изменения цвета пакета плёнок поливинилхлорида под действием органических растворителей. Измерены величины модуля упругости, кинетика и степень максимального набухания пленки поливинилхлорида в 10 органических жидкостях различного химического строения. Изменение прозрачности и цвета маркировки пакета плёнок поливинилхлорида тем быстрее, чем меньше значения критерия Флори-Хаггинса.

Ключевые слова: полимерные пленки, растворители, набухание, цвет, маркировка товаров, упаковка, поливинилхлорид, защита от подделки, плеохроизм, двойное лучепреломление, критерий Флори-Хаггинса.

Thermodynamics of hidden labeling of transparent shrink film packaging

Valery Yu. Konyukhov	¹	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413
Alexander A. Nikolaev	²	a.a.nikolaev@mospolytech.ru	 0000-0003-3232-6753
Alyona A. Prihozhaya	²	lekalena03@gmail.com	 0009-0004-3424-6428
Vyacheslav K. Dolgonosov	²	dolgonosov@inbox.ru	 0009-0000-9962-6211
Alexander P. Kondratov	²	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation

Abstract. Optical properties, birefringence and the effect of pleochroism in multilayer coatings and plastic packaging made of polyvinyl chloride of domestic production are described. Film pleochroism is most intensely manifested in the flux of light passing through several layers of film and has a wide range of colors when several layers of polyvinyl chloride shrink film are combined in materials for flexible transparent packaging and biaxially oriented isotactic polypropylene film. It has been established that the color of several layers of polyvinyl chloride shrink film in transmitted polarized light changes under the influence of organic solvents. This phenomenon is proposed to be used for hidden marking of packaging or labels and combating counterfeit production of consumer goods sold to the public in a retail network of stores. achieving the visibility of security marking and the ability to identify goods by trademark or using a bar code. The color difference between multilayer films of polyvinyl chloride before and after treatment with a volatile solvent reaches 35 units with two or more layers, determines the bright color of the trademark and/or sufficient contrast of the code used for hidden marking of packaging or labels detected in polarized light. The application of the Flory-Huggins criterion for quantitative assessment of color change in a package of polyvinyl chloride films under the influence of organic solvents is shown. The values of the modulus of elasticity, kinetics and the degree of maximum swelling of the polyvinyl chloride film in 10 organic liquids of various chemical structure are measured Flory-Huggins.

Keywords: polymer films, solvents, swelling, color, labeling of goods, packaging, polyvinyl chloride, anti-counterfeiting, pleochroism, double refraction, Flory-Huggins criterion.

Для цитирования

Конюхов В.Ю., Николаев А.А., Прихожая А.А., Долгонос В.К., Кондратов А.П. Термодинамика скрытой маркировки упаковки из прозрачной термоусадочной пленки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 110–117. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-110-117

For citation

Konyukhov V.Yu., Nikolaev A.A., Prihozhaya A.A., Dolgonosov V.K., Kondratov A.P. Thermodynamics of hidden labeling of transparent shrink film packaging. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 110–117. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-110-117

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Прогнозирование способности жидкости проникать в структуру полимерной пленки при вытяжке в жидкой среде необходимо для успешного целенаправленного выбора компонентов для скрытой оптической маркировки прозрачной упаковки по запатентованной технологии [1]. Эффект поглощения жидкой среды термоусадочной полимерной пленкой составляет часть одновременно протекающих процессов изменения размеров, механических свойств и структуры полимеров при наличии внешнего или внутреннего (усадка) механического напряжения, поэтому для его описания и прогнозирования правомерно использовать основные закономерности физико-химической механики полимеров [2,3]. Центральным вопросом прогнозирования физико-химической стойкости полимерных материалов является связь механических и оптических свойств полимеров с физико-химическими параметрами контактирующей среды.

В физико-химической механике сформировалось два основных подхода к объяснению влияния физически активных жидкостей на процессы деформирования и разрушения полимеров: адсорбционный, локально-пластификационный. Наибольшее распространение получил адсорбционный подход [4,5], согласно которому активность жидкой среды по отношению к деформируемому полимеру определяется способностью молекул жидкости адсорбироваться на вновь образующихся поверхностях растягиваемого полимерного тела в микротрещинах и снижать их поверхностную энергию. Сущность локально-пластификационного подхода заключается в постулировании определяющего влияния локальной пластификации или растворения микрзоны полимера в вершине растущей трещины (дефекта) проникающей жидкой средой на механические свойства всего полимерного тела.

В рамках пластификационного подхода в дополнение к многочисленным данным, описанным в [3], следует остановиться на результатах систематического изучения механических и сорбционных свойств полиэтилентерефталатных пленок, деформируемых с постоянной скоростью, в контакте с органическими жидкостями, приведенных в [6] и [7]. В качестве жидких сред были выбраны производные бензола как жидкости, молекулы которых подобны фрагментам макромолекулы полиэтилентерефталата. Авторы анализировали связь прочности и относительного удлинения пленок, определяемых в режиме вытяжки с постоянной скоростью деформации, с молярным объемом, вязкостью и параметром растворимости жидкой среды,

а также с равновесной степенью набухания полиэтилентерефталата (ПЭТФ) в исследуемой жидкости. По изменению механических свойств полимерных пленок жидкости были условно разделены на три группы.

Первую составляют малополярные жидкости с относительно большим молярным объемом и сравнительно малой вязкостью: толуол; о-, м-, п-ксилолы; п-цимол. При механических испытаниях полиэтилентерефталатных пленок в этих средах в условиях одновременного введения жидкости в контакт с образцом и начала растяжения наблюдается значительное – примерно двукратное – снижение его прочности, а также увеличение удлинения до разрыва более чем в 3 раза по сравнению со значениями, получаемыми при испытании на воздухе. При растяжениях в жидкости на поверхности образца возникает множество крейзов. Фрактограммы разрушения и форма деформационных кривых пленок позволяют утверждать, что жидкости первой группы переводят полимер из стеклообразного состояния в высокодисперсное ориентированное состояние.

Ко второй группе относят жидкости, при испытании в которых не только прочность пленок, но и удлинение до разрыва уменьшаются примерно в $2\div 2,5$ раза по сравнению с их уровнем на воздухе. К этим жидкостям относятся бензол и его галогенпроизводные. Разрушение в этих средах является следствием быстрого развития одной трещины. Очевидно, при использованной авторами скорости растяжения пленок в средах второй группы в полиэтилентерефталате не успевают протекать релаксационные процессы, и разрушение имеет хрупкий характер.

Третью группу составляют среды, при испытании в которых прочность и удлинение ПЭТФ либо незначительно уменьшаются, либо практически не изменяются. К этой группе относятся полярные жидкости, характеризующиеся сравнительно большим дипольным моментом молекул и повышенной вязкостью. В жидких средах третьей группы ПЭТФ сильно и быстро набухает, особенно в тех, которые не вызывают снижения его прочности при испытании с постоянной скоростью растяжения сразу после возникновения контакта жидкости с пленкой.

Для количественного описания сорбции жидкостей и диффузионных процессов в полимерах принято использовать три основных параметра экспериментально определяемых независимыми методами: коэффициент диффузии D , коэффициент проницаемости P и коэффициент растворимости S . Эти параметры связаны между собой известным соотношением [8].

$$P = D \cdot S \quad (1)$$

Для прогнозирования процессов проникания жидкости в полимер по механизму активированной диффузии расчетным путем используют параметр растворимости Гильдебранда (δ) полимера и жидкости [9].

Параметр растворимости (δ) определяется экспериментально по величине энергии когезии равной энтальпии испарения жидкости (ΔE_{ev}) и используется в теории растворов полимеров для прогнозирования совместимости высокомолекулярных и низкомолекулярных органических веществ (2).

$$\delta = \left(\frac{\Delta E_{ev}}{V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Для количественно оценки термодинамических условий сорбции и скорости диффузионных процессов используют Критерий Флори-Хаггинса (χ), который позволяет оценить термодинамическую совместимость полимера и растворителя, определяя, будет ли образовываться истинный раствор при их совмещении или система останется двухфазной дисперсией [10–12].

Процесс поглощения жидкости полимерами определяемый по критерию Флори-Хаггинса может иметь несколько термодинамических состояний: $\chi < 0,5$ – растворитель термодинамически хороший и полимер способен неограниченно набухать; $\chi > 0,5$ – растворитель плохой, полимер не набухает или сорбируется медленно и в ничтожных количествах.

Критерий Флори-Хаггинса χ можно рассчитать по формуле Флори-Ренера [13]:

$$\ln(1 - \Phi_E) + \Phi_E + \chi \Phi_E^2 + Z^1 \Phi_E^{\frac{1}{3}} = 0 \quad (3)$$

$$\chi = \frac{-\ln(1 - \Phi_E) + \Phi_E + Z^1 \Phi_E^{\frac{1}{3}}}{\Phi_E^2} \quad (4)$$

где Φ_E – объемная доля полимера в его равновесном состоянии:

$$\Phi_E = \frac{W_0}{W_1} \quad (5)$$

где W_0 – исходный объем полимера в мм³, W_1 – конечный его объем в мм³.

$$Z = \frac{V_2}{V_1} \quad (6)$$

где Z – безразмерный параметр, равный отношению молярного объема субцепей полимера V_2 к молярному объему растворителя V_1 .

$$V_2 = RTE^{-1} \Phi_E^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, E – модуль упругости набухшего полимера.

$$V_1 = \frac{M}{\rho} \quad (8)$$

где M – молярная масса растворителя г/моль, ρ – плотность растворителя г/см³.

Объекты исследования

Термоусадочные пленки поливинилхлорида отечественных и зарубежных производителей: АО «Дон-полимер», толщиной 70 ± 10 мкм, «Dongil Chemical», толщиной $50 \pm 3,5$ мкм, «Klockner Pentaplast», толщиной 45 ± 5 мкм. Растворители, входящие в состав печатных полиграфических красок [14–15]: 1,2 дихлорэтан, ацетон; диоксан; о-ксилол; этилацетат; бутилацетат.

Поляризационные пленки NPF F1205DU (Япония), поляризационные стеклянные фильтры [16].

Полиграфические секции машин и принтеров струйной печати марки Epson DX6, Epson i3200 E1 и Seiko SPT510/35 с головками [17].

Результаты и их обсуждение

Многослойные прозрачные и бесцветные термоусадочные пленки поливинилхлорида приобретают в поляризованном свете различную окраску, определяющуюся числом и толщиной слоев [18]. Координаты цвета пакета пленок в цветовом пространстве [19, 20] (окраска в проходящем и отраженном поляризованном свете) значительно изменяются при воздействии растворителей на любой из прозрачных слоев пленки поливинилхлорида.

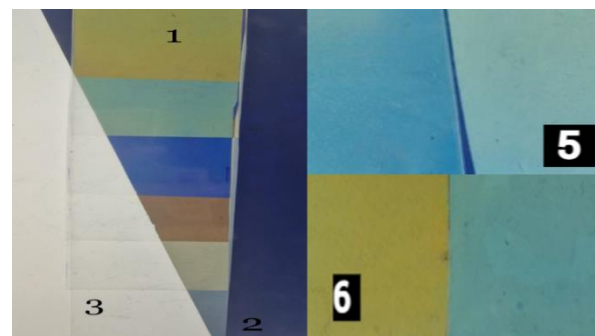


Рисунок 1. Фотографии стопы Столетова из ТУ пленки поливинилхлорида в поляризованном свете (1). Пленочный поляризатор (2). Стопа Столетова без поляризатора (3). Изменение цвета 5-го и 6-го слоев пленки в стопе Столетова после обработки 1,2 – дихлорэтаном

Figure 1. Photographs of Stoletov's foot made of PVC polyvinyl chloride film in polarized light (1). Film polarizer (2). Stoletov's foot without polarizer (3). Color change of the 5th and 6th film layers in Stoletov's foot after treatment with 1,2 – dichloroethane

На фотографиях, полученных в поляризованном свете видно, что органические жидкости существенно меняют цвет слоистого полимерного материала в проходящем поляризованном свете (рисунок 1). Изменение цвета многослойного материала после контакта с растворителем имеет устойчивую закономерность заметную невооруженным глазом и подтверждаемую спектральным анализом фотографий. Желтый цвет участка многослойного материала из 6 слоев после контакта с растворителем приобретает цвет многослойного материала из 5 слоев. Голубой цвет участка многослойного материала из 5 слоев после контакта с растворителем приобретает синий цвет многослойного материала из 4 слоев. Таким образом правомерно констатировать «невидимость» внешнего слоя пакетов многослойных пленок вследствие обработки растворителем или его прозрачность.

Для исследования влияния органических растворителей (пластификаторов) на цвет многослойных пленок поливинилхлорида в поляризованном свете собирали многослойные пакеты лент (стопа Столетова), на которые наносили слой жидкости с помощью полиграфической техники одним движением ракеля по трафаретной форме.

«Невидимость» внешнего слоя пакетов многослойных пленок вследствие обработки растворителем является результатом реструктурирования полимерных материалов на надмолекулярном уровне и количественно оценивается контрастом и / или цветовым различием ΔE [12].

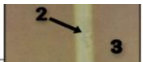
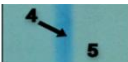
	ΔE		ΔE		ΔE
1 слой	35	3 слой	20	5 слой	20
Фон (0)		2 слой		4 слой	

Рисунок 2. Фотографии в проходящем поляризованном свете пакета из нескольких слоев пленки с «меткой» нанесенной этилацетатом. Цветовое различие [2] между меткой и цветом пакета из 3 слоев пленки $\Delta E = 20$ единиц
Figure 2. Photographs in transmitted polarized light of a package of several layers of film with a "label" applied with ethyl acetate. The color difference [2] between the label and the color of a package of 3 film layers is 20 units

Эффект изменения цвета части упаковки в поляризованном свете как маркировки и «невидимости» внешнего слоя пакетов многослойных пленок после пластификации предложено использовать в защите товаров от подделки и борьбе с контрафактным производством эксклюзивной прозрачной тары и упаковки из полимерной пленки. Эта возможность иллюстрируется результатом фотографирования в поляризованном свете многослойной упаковки из пленки

поливинилхлорида после нанесения слоя летучего растворителя (например, этилацетата) в форме узкой полосы (рисунок 2). Цветовое различие ΔE метки и фона в поляризованном свете на порядок превышает чувствительность глаз человека ($2 \div 3$ ед.), незаметно невооруженным глазом и поэтому вполне пригодно для скрытой оптической маркировки.

Действие растворителей на оптические характеристики прозрачной упаковки из многослойных термоусадочных пленок поливинилхлорида обусловлено их физической активностью по отношению к полимеру в напряженном состоянии. Мерой физической активности растворителей является величина и скорость абсорбции жидкости, и способность снижать уровень внутренних напряжений. Для количественного описания абсорбции жидкостей использовали гравиметрию набухания пленок (рисунок 3), справочные данные по химической стойкости полимеров и термодинамические параметры совместимости твердых и жидких органических веществ.

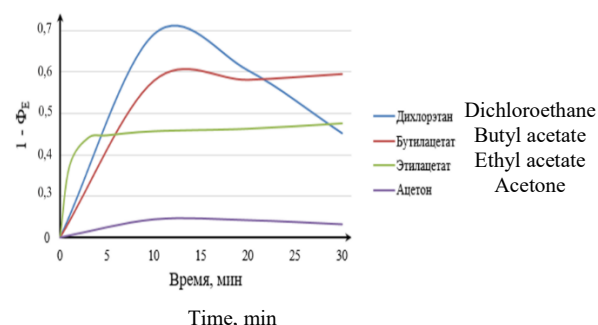


Рисунок 3. Доля растворителя в полимере при набухании пленок поливинилхлорида
Figure 3. The proportion of solvent in the polymer during swelling of polyvinyl chloride films

Для расчёта параметров растворимости жидкости и термоусадочных пленок поливинилхлорида использовали константы Смолла органических веществ и справочные данные экспериментальных исследований растворения или набухания полимеров поливинилхлорида в летучих растворителях. Параметр растворимости поливинилхлорида, использованного для производства термоусадочной пленки, составляет $9,55 \pm 1,5$ (калл/см³)^{1/2}.

Для расчёта параметров растворимости и критерия совместимости жидкости с ПВХ Флори-Хаггинса (χ) исследовали набухание и механические свойства (модуль Юнга) термоусадочных пленок поливинилхлорида в состоянии максимального содержания в них пластифицирующей жидкости (таблица 1 и 2).

Таблица 1.

Сорбция растворителей пленкой поливинилхлорида и её упругость при набухании

Table 1.

Sorption of solvents by a polyvinyl chloride film and its elasticity during swelling

Растворитель Solvent	Модуль Юнга пленки в жидкости, МПа Young's modulus of film in liquid, MPa	Сорбция жидкостей пленкой Sorption of liquids by film	
		масс. %	Φ_E
1,2-дихлорэтан 1,2-dichloroethane	2,35	246	0,31
Бутилацетат Butyl acetate	5,75	197	0,68
Этилацетат Ethyl acetate	7,69	137	0,69
Ацетон Acetone	5,17	250	0,81
Диоксан Dioxane	3,33	179	0,98
о-Ксилол o-Xylene	19,3	101	0,93

Так, например, для термоусадочных пленок поливинилхлорида производства АО «Дон Полимер» после сорбции 1,2 – дихлорэтана в течение 10 минут установлены Φ_E – объемная доля полимера в его равновесном состоянии

$$\Phi_E = \frac{W_0}{W_1} = 0,31$$

И отношение молярного объема субцепей полимера V_2 к молярному объему растворителя

$$Z = \frac{V_2}{V_1} = 8,96$$

Для термоусадочных пленок поливинилхлорида производства АО «Дон Полимер» после сорбции бутилацетата в течение 10 минут $\Phi_E = 0,68$, и $Z = 2,85$

Для термоусадочных пленок поливинилхлорида производства АО «Дон Полимер» после сорбции этилацетата в течение 5 минут $\Phi_E = 0,69$ и $Z = 2,89$

Подстановка этих и остальных значений в формулу Флори–Ренера (2) позволяет представить результаты оценки экспериментальной оценки в порядке снижения «качества» растворителей по критерию Флори–Хаггинса χ (таблица 2).

Таблица 2.

Свойства растворителей и характеристики их взаимодействия с пленкой поливинилхлорида

Table 2.

Solvent properties and characteristics of their interaction with polyvinyl chloride

Растворитель Solvent	Параметр растворимости, $(\text{кал/см}^3)^{1/2}$ Solubility parameter, $(\text{cal/cm}^3)^{1/2}$	Разность параметров растворимости жидкости и ПВХ Difference between solubility parameters of liquid and PVC	Критерий Флори–Хаггинса χ Flory-Huggins criterion	Минимальное время маркировки, с Minimum labeling time, s	$t_{\text{набухания}}$, °C
1,2-дихлорэтан 1,2-dichloroethane	9,4	0,15	-0,14	5	83,5
Бутилацетат Butyl acetate	8,7	0,85	0,35	15	126,0
Этилацетат Ethyl acetate	9,0	0,45	0,36	20	77,1
Ацетон Acetone	9,7	-0,45	0,67	35	56,0
Диоксан Dioxane	10,8	-1,25	3,25	60	101,0
о-Ксилол o-Xylene	8,7	0,55	1,03	75	144,0

Из таблицы видно, что максимальной термодинамической совместимостью с указанными пленками поливинилхлорида обладает 1,2-дихлорэтан, при его сорбции критерий Флори–Хаггинса принимает наименьшее (даже отрицательное) значение. Это согласуется с теоретическими оценками возможной совместимости хлорированных углеводов с поливинилхлоридом, являющимся близким аналогом по составу и структуре молекул к структуре повторяющегося звена макромолекул. Некоторые растворители (этилацетат и бутилацетат) имеют критерий Флори–Хаггинса $< 0,5$, что свидетельствует о хорошем термодинамическом качестве их как растворителей. Самым термодинамически

несовместимым с пленками поливинилхлорида оказался диоксан, действие которого на оптические свойства пленок минимально.

Заключение

С помощью цветной фотографии и спектрального анализа прозрачной упаковки в проходящем поляризованном свете показано изменение цвета и прозрачности многослойных полимерных пленок под действием органических растворителей. Цвет многослойных пленок в поляризованном свете изменяется по мере набухания в жидкостях и определяется количеством слоев, кинетикой набухания и взаимной ориентацией оптических осей поляризаторов относительно направления усадки пленок.

В ходе экспериментов доказана возможность применения параметра термодинамической совместимости полимеров и органических растворителей критерия Флори-Хаггинса для количественной оценки скорости изменения цвета пакета плёнок поливинилхлорида в поляризованном свете. Изменение цвета тем значительнее и быстрее чем меньше значения критерия Флори-Хаггинса.

Цветовое различие многослойных плёнок поливинилхлорида до и после кратковременной (5–20 с) обработки летучим растворителем (1,2-дихлорэтаном, бутил- или этилацетатом) достигает 35 единиц уже при двух слоях плёнок и обеспечивает контраст достаточный для скрытой маркировки упаковки или этикетки, выявляемой в поляризованном свете.

Литература

- 1 Пат. № 2791434 C1, RU, G11B 7/24. Способ записи информации на бесцветных прозрачных полимерных пленках / Кондратов А.П., Николаев А.А., Пухова Е.А., Верещагин В.Ю. № 2022111470; Заявл. 27.04.2022; Оpubл. 07.03.2023, Бюл. № 7.
- 2 Volynskii A.L., Bakeev N.F. Solvent Crazing of Polymers. Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1995.
- 3 Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. Л.: Химия, 1980. 254 с.
- 4 Peterlin A., Olf H.G. J. Polymer Sci., Polymer Symp. 1975. Vol. 13. No. 50. P. 243.
- 5 Sinevich E.A., Bykova I.V., Bakeev N.F. Influence of interphase surface energy on the structure of craze polymer // High-molecular compounds. Series B. 1998. Vol. 40. No. 10. P. 1671.
- 6 Pertsov N.V., Traskin V.Y. Influence of the environment on the mechanical properties of dispersed systems and materials. Moscow, 1992. 155 p.
- 7 Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Высокодисперсное ориентированное состояние полимеров. М.: Химия, 1984. 190 с.
- 8 Reitlinger S.A. Permeability of polymeric materials. Moscow: Khimiya Publ., 1974. 272 p.
- 9 Askadsky A.A., Kondrashchenko V.I. Computer Materials Science of Polymers. Vol. 1. Russian Academy of Sciences. Institute of Elemental Organ Compounds named after A.N. Nesmeyanov. Atomic-Molecular Level. Moscow: Scientific World, 1999. 543 p.
- 10 Denisyuk E.Ya., Volkova E.R. The effect of the thermodynamic quality of solvent on the kinetics of polymer network swelling // Polymer Science, Series A. 2003. Vol. 45. No. 7. P. 686.
- 11 Denisyuk E.Ya. Thermodynamics of deformation and swelling of crosslinked polymers under small deformations // Polymer Science Series A. 2012. Vol. 54. P. 240. doi: 10.1134/S0965545X12030017
- 12 Denisyuk E.Y. Mechanics and Thermodynamics of Deformation for a Liquid-Saturated Elastic Materials in the Approximation of Small Deformations // Mechanics of Solids. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 164. doi: 10.3103/S0025654418020073
- 13 Denisyuk E.Y. Barodiffusion Processes of Solvent Transport in Reticulated Polymers // Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics. 2010. Vol. 9. No. 1. P. 131.
- 14 Konyukhov V.Yu., Shpineva M.A. Thermodynamics of systems: photopolymers low-molecular liquids // J. Chem. Chem. Eng. 2013. Vol. 7. No. 5. P. 462.
- 15 Safronov A.P., Adamova L.V., Kurlyanskaya G.V. Flory–Huggins Parameters of Guar Gum, Xanthan Gum, Agarose, and Gellan Gum in Aqueous Solutions // Polymer Science. 2019. Vol. 61. No. 1. P. 33. doi: 10.1134/S2308112019010152
- 16 Gogoladze I.A., Guseva I.Y. Study of the properties of offset hybrid paints // Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Printing and Publishing. 2011. No. 2. P. 27.
- 17 Savin I.V. Analysis of Features and Basic Properties of UV Paints // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2019. No. 9. P. 248.
- 18 Li L.-H., Kontsevoi O.Y., Rhim S.H., Freeman A.J. Structural, electronic, and linear optical properties of organic photovoltaic PBTTT-C14 crystal // The Journal of Chemical Physics. 2013. Vol. 138. P. 164503.
- 19 Weber M.F., Nevitt T.J., Merrill W.W. CN1293613A Цветоизменяющая пленка. 2001–05–02. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021721628/publication/CN1293613A?q=pr%3DCN1293613A>
- 20 Singh R., Dutt S., Sharma P. et al. Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety // Global Challenges. 2023. Vol. 7. No. 4. P. 2200209. doi: 10.1002/gch2.202200209
- 21 Mnyango J.I., Hlangothi S.P. Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review // Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. 2024. doi: 10.1177/14777606241308652
- 22 Hazer B., Karahaliloğlu Z. Biocompatible PVC Derivatives with Some Natural Substances for Potential Active Food Packaging Materials // ACS Food Science & Technology. 2023. Vol. 3. No. 11. P. 1854–1863. doi: 10.1021/acsfoodscitech.3c00241
- 23 Karakuş M.Ş. Structural Properties, Mechanical Behavior, and Food Protecting Ability of Chickpea Protein-Derived Biopolymer Films // Polymers. 2025. Vol. 17. No. 14. P. 1938. doi: 10.3390/polym17141938
- 24 Ranade T., Sati A., Pratap A. et al. Curcumin-integrated biopolymer films for active packaging: current trends and future directions // Chemical Papers. 2025. Vol. 79. No. 3. P. 1303–1334. doi: 10.1007/s11696-025-03892-1

References

- 1 Kondratov A.P., Nikolaev A.A., Pukhova E.A., Vereshchagin V.Yu. et al. Method of recording information on colorless transparent polymer films. Patent RU 2791434, 2023. (in Russian)
- 2 Volynskii A.L., Bakeev N.F. Solvent Crazing of Polymers. Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1995.
- 3 Manin V.N., Gromov A.N. Physical and chemical resistance of polymer in operating conditions. Leningrad: Khimiya Publ., 1980. 254 p. (in Russian)
- 4 Peterlin A., Olf H.G. Relaxation processes in deformed polymers. Journal of Polymer Science: Polymer Symposia. 1975. vol. 50. no. 1. pp. 243–254. doi: 10.1002/polc.5070500122

- 5 Sinevich E.A., Bykova I.V., Bakeev N.F. Influence of interphase surface energy on the structure of crazed polymers. *Polymer Science Series B*. 1998. vol. 40. no. 10. pp. 1671–1674. (in Russian)
- 6 Pertsov N.V., Traskin V.Y. Influence of the environment on the mechanical properties of dispersed systems and materials. Moscow, 1992. 155 p. (in Russian)
- 7 Volynsky A.L., Bakeev N.F. Highly dispersed oriented state of polymers. Moscow: Khimiya Publ., 1984. 190 p. (in Russian)
- 8 Reitlinger S.A. Permeability of polymeric materials. Moscow: Khimiya Publ., 1974. 272 p. (in Russian)
- 9 Askadsky A.A., Kondrashchenko V.I. Computer Materials Science of Polymers. Vol. 1. Atomic-Molecular Level. Moscow: Scientific World, 1999. 543 p. (in Russian)
- 10 Denisyuk E.Ya., Volkova E.R. The effect of the thermodynamic quality of solvent on the kinetics of polymer network swelling. *Polymer Science Series A*. 2003. vol. 45. no. 7. pp. 686–692.
- 11 Denisyuk E.Ya. Thermodynamics of deformation and swelling of crosslinked polymers under small deformations. *Polymer Science Series A*. 2012. vol. 54. no. 3. pp. 240–248. doi: 10.1134/S0965545X12030017
- 12 Denisyuk E.Y. Mechanics and Thermodynamics of Deformation for a Liquid-Saturated Elastic Materials in the Approximation of Small Deformations. *Mechanics of Solids*. 2018. vol. 53. no. 2. pp. 164–173. doi: 10.3103/S0025654418020073
- 13 Denisyuk E.Y. Barodiffusion Processes of Solvent Transport in Reticulated Polymers. *Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics*. 2010. vol. 9. no. 1. pp. 131–142. (in Russian)
- 14 Konyukhov V.Yu., Shpineva M.A. Thermodynamics of systems: photopolymers low-molecular liquids. *Journal of Chemical and Chemical Engineering*. 2013. vol. 7. no. 5. pp. 462–469.
- 15 Safronov A.P., Adamova L.V., Kuryandskaya G.V. et al. Flory–Huggins Parameters of Guar Gum, Xanthan Gum, Agarose, and Gellan Gum in Aqueous Solutions. *Polymer Science, Series A*. 2019. vol. 61. no. 1. pp. 33–41. doi: 10.1134/S2308112019010152
- 16 Gogoladze I.A., Guseva I.Y. Study of the properties of offset hybrid paints. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Printing and Publishing*. 2011. no. 2. pp. 27–32. (in Russian)
- 17 Savin I.V. Analysis of Features and Basic Properties of UV Paints. *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2019. no. 9. pp. 248–254. (in Russian)
- 18 Li L.-H., Kontsevoi O.Y., Rhim S.H., Freeman A.J. et al. Structural, electronic, and linear optical properties of organic photovoltaic PBTTT-C14 crystal. *The Journal of Chemical Physics*. 2013. vol. 138. no. 16. pp. 164503. doi: 10.1063/1.4801997
- 19 Weber M.F., Nevitt T.J., Merrill W.W. Color-changing film. Patent CN1293613A, 2001. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021721628/publication/CN1293613A> (in Russian)
- 20 Singh R., Dutt S., Sharma P. et al. Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety. *Global Challenges*. 2023. vol. 7. no. 4. pp. 2200209. doi: 10.1002/gch2.202200209
- 21 Mnyango J.I., Hlangothi S.P. Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2024. doi: 10.1177/14777606241308652
- 22 Hazer B., Karahaliloğlu Z. Biocompatible PVC Derivatives with Some Natural Substances for Potential Active Food Packaging Materials. *ACS Food Science & Technology*. 2023. vol. 3. no. 11. pp. 1854–1863. doi: 10.1021/acsfoodscitech.3c00241
- 23 Karakuş M.Ş. Structural Properties, Mechanical Behavior, and Food Protecting Ability of Chickpea Protein-Derived Biopolymer Films. *Polymers*. 2025. vol. 17. no. 14. pp. 1938. doi: 10.3390/polym17141938
- 24 Ranade T., Sati A., Pratap A. et al. Curcumin-integrated biopolymer films for active packaging: current trends and future directions. *Chemical Papers*. 2025. vol. 79. no. 3. pp. 1303–1334. doi: 10.1007/s11696-025-03892-1

Сведения об авторах

Валерий Ю. Конюхов д.х.н., профессор, кафедра общей химии (№19) института общей профессиональной подготовки, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ, Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Александр А. Николаев старший преподаватель, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, a.a.nikolaev@mospolytech.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3232-6753>

Алёна А. Прихожая студент, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, lekalena03@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-3424-6428>

Вячеслав К. Долгонос аспирант, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, dolgonosov@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9962-6211>

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, apkrezerv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Information about authors

Valery Yu. Konyukhov Dr. Sci. (Chem.), professor, department of General Chemistry (No. 19) of the Institute of General Professional Training, National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russian Federation, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Alexander A. Nikolaev Senior lecturer, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, a.a.nikolaev@mospolytech.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3232-6753>

Alyona A. Prihozhaya Student, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, lekalena03@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-3424-6428>

Vyacheslav K. Dolgonosov Graduate student, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, dolgonosov@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9962-6211>

Alexander P. Kondratov Dr. Sci. (Tech.), professor, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, apkrezerv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Вклад авторов

Валерий Ю. Конюхов предложил методику проведения эксперимента, выполнение математических расчетов, корректировал рукопись до её подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Александр А. Николаев проводил эксперименты, помогал в математических расчетах, корректировал рукопись до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Алёна А. Прихожая обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Вячеслав К. Долгонос обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Александр П. Кондратов предложил методику проведения эксперимента, написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Valery Yu. Konyukhov proposed a methodology for conducting the experiment, performing mathematical calculations, corrected the manuscript before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiarism

Alexander A. Nikolaev conducted experiments, helped with mathematical calculations, corrected the manuscript before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiarism

Alyona A. Prihozhaya review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Vyacheslav K. Dolgonosov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Alexander P. Kondratov proposed a methodology for conducting the experiment, wrote the manuscript, corrected it before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 07/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2025
Received 07/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2025