

УДК 678.674'524:543.42

А. О. Шрубок, Б. Ж. Хаппи Вако

Белорусский государственный технологический университет

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

В статье рассмотрены проблемы и особенности рециклинга отходов полиэтилентерефталата и показано, что одним из перспективных способов переработки ПЭТ-отходов является сольвентный способ, позволяющий получать чистые с высокими физико-механическими свойствами вторичные полимеры. Цель работы – установление структурных особенностей мелкодисперсных ПЭТ-порошков с размером частиц от 5 до 70 мкм, полученных сольвентным способом из различных полимерных ПЭТ-отходов (бутылочный ПЭТ, отходы полиэфирных волокон). Оценку структурного состояния и степени кристалличности ПЭТ-порошков осуществляли на основе анализа их ИК-спектров. Были рассчитаны относительные интенсивности полос поглощения, характерные для транс- и гош-конформаций, ПЭТ-порошков по отношению к реперным полосам при 1505 и 1570 см⁻¹, и спектральные коэффициенты (D_{973}/D_{795} и D_{848}/D_{795} , D_{1042}/D_{795} и D_{895}/D_{795} , D_{1098}/D_{1370} и D_{1255}/D_{1370}). Отмечено, что на соотношение транс- и гош-конформаций в ПЭТ-порошках оказывает влияние тип исходного ПЭТ-отхода (волокна, ПЭТ-бутылки) и соотношение ПЭТ-отход : органический растворитель. Увеличение соотношения ПЭТ-отходы : растворитель при получении полимерных порошков от 1 : 10 до 1 : 30 приводит к возрастанию их степени кристалличности в среднем в 4,3 раза. Отмечено, что использование соотношения интенсивностей полос D_{1098}/D_{1370} и D_{1255}/D_{1370} хорошо согласуется с данными по степени кристалличности ПЭТ-порошков, определенной по плотностям кристаллической и аморфной фазы полимера, что позволяет использовать их для оценки степени кристалличности ПЭТ-порошков.

Ключевые слова: отходы полиэтилентерефталата, переработка отходов, мелкодисперсные полимерные порошки, степень кристалличности, ИК-спектроскопия, спектральные коэффициенты.

Для цитирования: Шрубок А. О., Хаппи Вако Б. Ж. Оценка степени кристалличности мелкодисперсных порошков вторичного полиэтилентерефталата методом ИК-спектроскопии // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 41–48.

A. O. Shrubok, B. J. Happi Wako

Belarusian State Technological University

THE ESTIMATION OF THE CRYSTALLINITY DEGREE OF FINE POWDERS OF SECONDARY POLYETHYLENE TEREPHTHALATE BY IR-SPECTROSCOPY

The article considers the problems and peculiarities of recycling of polyethylene terephthalate waste. The paper has shown that one of the promising ways of PET waste recycling is solvent method, which allows to obtain pure secondary polymers with high physical and mechanical properties. The aim of the work is to define the structural features of fine PET powders with particle size from 5 to 70 μm produced by solvent method from various polymer PET wastes (bottled PET, polyester fiber wastes). The structural state and crystallinity degree of PET powders were characterized by IR spectroscopy. The relative intensities of absorption bands, typical for trans- and gosh-conformations, of PET powders in relation to the reference bands at 1505 and 1570 cm⁻¹, and spectral ratios (D_{973}/D_{795} and D_{848}/D_{795} , D_{1042}/D_{795} and D_{895}/D_{795} , D_{1098}/D_{1370} and D_{1255}/D_{1370}) were calculated. It is shown that the ratio of trans- to gosh-conformations in PET powders is affected by the PET waste type (fibers, PET bottles) and the ratio of PET : organic solvent. The increase of the ratio waste : solvent from 1 : 10 to 1 : 30 leads to the increase of their crystallinity degree on the average 4.3 times. It is shown that using the ratio of intensities of bands D_{1098}/D_{1370} and D_{1255}/D_{1370} correlates well with the data on the crystallinity degree of PET powders determined by the densities of the crystal and amorphous polymer phase. It has been found that these spectral coefficients can be used to assess the crystallinity degree of PET powders.

Key words: polyethylene terephthalate waste, waste processing, fine polymer powders, crystallinity degree, IR spectroscopy, spectral coefficients.

For citation: Shrubok A. O., Happi Wako B. J. The estimation of the crystallinity degree of fine powders of secondary polyethylene terephthalate by IR-spectroscopy. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 2 (259), pp. 41–48 (In Russian).

Введение. Полиэтилентерефталат (ПЭТ) является одним из самых распространенных полимеров для производства пластиковой тары пищевого и фармацевтического назначения, полиэфирных волокон, нитей, технических изделий. По мере роста производства и потребления ПЭТ возрастает и объем образующихся полимерных отходов. Несмотря на то, что при синтезе ПЭТ и его переработке количество производственных отходов ПЭТ составляет от 0,6–0,9% (производство преформ) до 10% (формование изделий из листового ПЭТ) от перерабатываемого сырья, основным источником полиэфирных отходов является пластиковая тара для продуктов питания и напитков [1, 2].

С одной стороны, отходы ПЭТ характеризуются высокой технологичностью и относительной легкостью механической переработки, с другой – уровень их переработки в мире существенно различается: в странах Азии и Евросоюза он достигает 80%, а в Республике Беларусь – не более 20% [3–5]. Обусловлено это целым рядом факторов.

1. Сложность организации сбора и подготовки ПЭТ-отходов. Например, доля ПЭТ-бутылок в объеме твердых бытовых отходов составляет около 4% и их выборка из такого объема экономически нецелесообразно. Для увеличения количества собранных ПЭТ-отходов в большинстве стран мира созданы различные системы и программы сбора и сортировки полимерных отходов.

2. Затраты на сбор, подготовку и переработку отходов ПЭТ в ПЭТ-флексы меньше стоимости первичного ПЭТ только при совокупности технологических, экологических и экономических факторов. Внедрение таких мер, как жесткие законы, регламентирующие использование и утилизацию отходов, экологическое налогообложение, действующие компенсационные механизмы за сбор и переработку отходов, информационная работа с населением, строительство эффективных производств по переработке отходов и т. п., способствует увеличению доли рециклинга ПЭТ.

3. Загрязненность ПЭТ-отходов другими полимерами, клеями, красителями приводит к снижению физико-механических и эстетических свойств вторичного ПЭТ. Проблема засоренности ПЭТ-отходов значительно ограничивает возможность их повторного использования для получения волокон и бутылок.

4. Наличие в отходах ПЭТ влаги вызывает гидролиз и частичную деструкцию ПЭТ при их переработке, что негативно сказывается на конечных свойствах получаемого полимера. Содержание влаги в ПЭТ не должно превышать 0,01% [6].

Механический способ переработки отходов ПЭТ в флексы является преимущественным, од-

нако он не позволяет получать вторичный полимер высокой чистоты ввиду невозможности полной очистки отходов от примесей других полимеров, красителей, органических загрязнителей и накопления во вторичном полимере продуктов термодеструкции и гидролиза. Для получения ПЭТ высокой степени чистоты при механической переработке отходов необходимо использовать дорогостоящие процессы их ручной сортировки, водную промывку, очистку растворителями, сушку, что экономически неоправдано и на данный момент в промышленности практически не реализовано [1, 7].

Более 80% производимого во всем мире ПЭТ используется для получения упаковки, в которой полимер контактирует с продуктами питания или лекарственными средствами, поэтому потребность в высококачественном, «близком к исходному» переработанном ПЭТ будет возрастать. Спрос на вторичный ПЭТ ограничен его высокой стоимостью по сравнению с первичным ПЭТ и технологичностью, т. е. способностью соответствовать требованиям по чистоте, содержанию влаги и физико-механическим свойствам. В связи с этим особое значение приобретают технологии переработки полимерных отходов, позволяющие сохранить чистоту и высокие физико-механические свойства вторичных полимеров.

Основная часть. Особенностью полиэтилентерефталата является его способность существовать как в аморфном, так и кристаллическом состоянии. Аморфно-кристаллическое состояние ПЭТ определяет его свойства на различных стадиях переработки: внешний вид, физико-механические и электрические свойства [8]. ПЭТ в аморфном состоянии характеризуется отсутствием упорядоченных структур макромолекул, низкой степенью кристалличности (2,1–2,5%), прозрачностью. Макромолекулы ПЭТ в кристаллическом состоянии образуют различные упорядоченные структуры в зависимости от температуры и степени кристалличности: сферолиты, кристаллиты, ламели, меандровые структуры [9]. Наличие кристаллических структур в ПЭТ придает ему белый цвет, высокую плотность и температуру стеклования. После механической обработки степень кристалличности ПЭТ возрастает, при этом максимальная степень кристалличности ПЭТ составляет не более 50–65% [8, 9]. Степень кристалличности ПЭТ и ориентация макромолекул определяют технологические параметры его переработки и механические свойства. В связи с этим исследования структурных особенностей вторичного ПЭТ или продуктов его переработки являются актуальной задачей.

Одним из возможных методов рециклинга отходов с получением чистых, незагрязненных полимеров является применение сольвентного

способа, заключающегося в использовании растворителей и осадителей [10–13]. В данной работе порошки ПЭТ с размером частиц от 5 до 70 мкм были получены из различных видов полимерных отходов (бутылочный ПЭТ, отходы полиэфирных волокон) по разработанному на кафедре нефтегазопереработки и нефтехимии сольвентному способу. Поскольку ориентация ПЭТ как в чистом виде, так и в полимерных смесях заметно влияет на механические, оптические и электрические свойства полимерных композиций и изделий, исследование структурных особенностей порошков ПЭТ представляет важную научную и практическую задачу. Изменяя соотношение полимер – растворитель и растворитель – осадитель, можно получать полимерные порошки из ПЭТ с различной дисперсностью и степенью кристалличности.

Цель работы – установление структурных особенностей мелкодисперсных ПЭТ-порошков, полученных сольвентным способом из различных полимерных ПЭТ-отходов.

Для изучения химического строения составного звена полимеров одним из информативных методов является инфракрасная спектроскопия. ИК-спектры аморфного и кристаллического ПЭТ заметно отличаются, что позволяет использовать данный метод для оценки структурного состояния и степени кристалличности ПЭТ. Известно [14–16], что для элементарного звена ПЭТ возможны колебания как за счет фениленкарбонильной, так и этиленгликолевой связи (рис. 1).

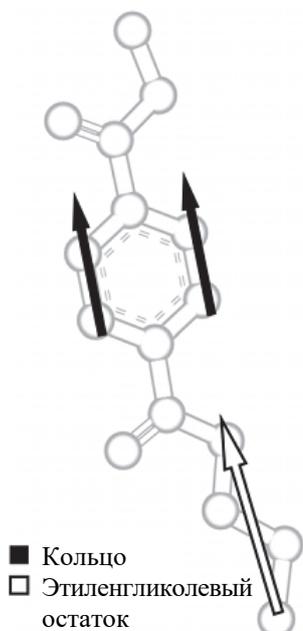


Рис. 1. Элементарное звено ПЭТ

Поворот звеньев вокруг связи гликольного остатка обуславливает наличие двух изомеров

гош- и транс-конформации. Установлено, что переход элементарного звена в транс-конформацию является обязательным условием кристаллизации ПЭТ, в то время как в аморфном состоянии макромолекулы находятся в гош- и транс-конформациях в динамическом равновесии.

Сопоставляя интенсивности полос поглощения, характерных для колебаний гликольного остатка в гош- и транс-конформациях, можно качественно охарактеризовать структурные особенности макромолекул ПЭТ, но для количественной оценки этого недостаточно. Полосы поглощения ИК-спектров ПЭТ при 1470, 1340, 975 и 848 см^{-1} характерны для транс-конформации, а при 1460, 1370, 1042 и 895 см^{-1} – для гош-конформаций этиленгликолевой сегмента. Кристаллическая структура ПЭТ характеризуется сдвигом характеристических полос поглощения и дает более интенсивные полосы при 1475, 1387, 988 и 874 см^{-1} . Полосы поглощения, связанные с изменением конфигурации цепи полиэфира колебаниями CH_2 -группы, наличием гош- и транс-изомеров, отражены в табл. 1 [14, 15, 17, 18].

Таблица 1

Характеристические полосы поглощения ИК-спектров ПЭТ

Волновое число, см^{-1}	Характер колебаний	Конформация
848	Маятниковые колебания CH_2 в гликольном остатке	Транс-
895	Деформационные колебания CH_2 в гликольном остатке	Гош-
962–975	Валентные колебания эфирной группы $\text{C}-\text{O}$	Транс-
1015	Плоские деформационные колебания связи $\text{C}-\text{H}$	Гош-
1042	Деформационные колебания эфирной группы $\text{C}-\text{O}$	Гош-
1255	Деформационные колебания эфирной группы $\text{C}-\text{O}$	Транс-
1340–1350	Вeerные колебания CH_2	Транс-
1370–1375	Вeerные колебания CH_2	Гош-
1460	Ножничные колебания CH_2	Гош-
1470	Ножничные колебания CH_2	Транс-
1505	Скелетные колебания ароматического кольца	–
1725	Валентные колебания группы $\text{C}=\text{O}$	–

ИК-спектры ПЭТ-порошков записывали на ИК-Фурье спектрометре Инфра-спек ФСМ 1202, запрессовывая навеску порошка в таблетку из KBr, в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, с разрешением 2 см^{-1} . ИК-спектр порошка ПЭТ представлен на рис. 2.

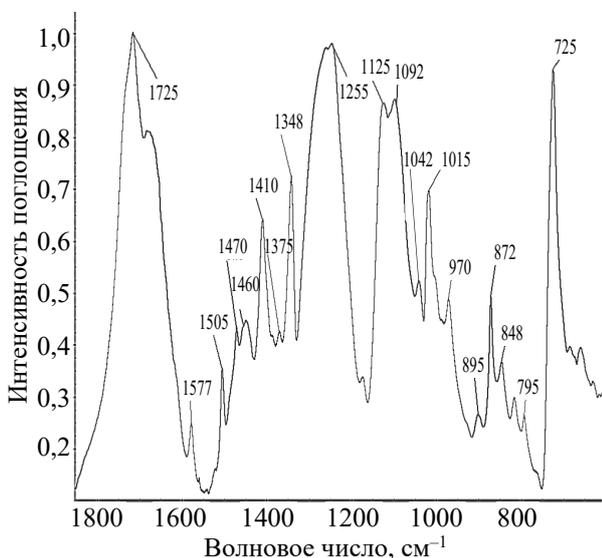


Рис. 2. ИК-спектр ПЭТ-порошка

Сравнение ИК-спектров в области «отпечатков пальцев» ($1500\text{--}700\text{ см}^{-1}$) позволяет установить конформационные переходы, основываясь на изменении формы и интенсивности полос, характерных для транс- и гош-конформаций.

Для количественной оценки этих изменений предложено использовать в качестве реперной полосы полосу сопряженных $C=C$ -связей ароматического кольца при 1505 и 1570 см^{-1} [19]. Были рассчитаны относительные интенсивности полос поглощения, характерных для транс-

и гош-конформаций, порошков ПЭТ из различных полиэфирных отходов (табл. 2). Согласно табл. 2 в образцах ПЭТ-отходов присутствуют как транс-, так и гош-конформации. При использовании сольвентного метода получения порошков из ПЭТ-отходов на соотношение транс- и гош-конформаций в получаемых порошках оказывает влияние соотношение взятого ПЭТ-отхода и органического растворителя. С увеличением соотношения ПЭТ : растворитель относительные интенсивности полос поглощения, характерные для гош-конформаций и аморфного состояния полимера, снижаются, при этом изменения в интенсивностях полос, характерных для транс-конформаций, не столь очевидны.

Авторы работы [20] связывают увеличение интенсивностей колебаний транс-конформаций в пленках ПЭТ с повышением степени кристалличности, однако в аморфном состоянии транс- и гош-конформации ПЭТ существуют в равновесии и по изменению интенсивностей колебаний только транс-конформаций судить о степени кристалличности ПЭТ не представляется возможным.

В связи с этим в качестве критерия, позволяющего оценить изменение степени кристалличности, предложено использовать соотношения интенсивностей различных полос поглощения (транс-конформации – 973 и 848 см^{-1} , гош-конформации – 1042 и 895 см^{-1}) по отношению к интенсивности полосы поглощения 795 см^{-1} , слабо меняющейся при переходе из одной конформации в другую [14, 15].

В работах П. Г. Шмидта показано, что соотношение D_{973}/D_{795} хорошо коррелируется с данными рентгенофазового анализа и в сочетании с данными по плотности дает информацию о соотношении транс-конформаций ПЭТ, находящихся в аморфной и кристаллической фазах.

Таблица 2

Относительные интенсивности полос поглощения порошков ПЭТ

D_x/D_{1505}	ПЭТ-отходы	Порошок из отходов волокон		Порошок из ПЭТ-бутылок		
		при соотношении ПЭТ : растворитель				
		1 : 10	1 : 20	1 : 10	1 : 20	1 : 30
Относительные полосы поглощения (транс-конформация)						
848	1,438	0,987	1,073	1,540	1,071	0,435
975	0,877	0,538	1,143	0,698	0,500	0,261
1255	0,831	2,534	3,575	3,984	2,153	2,913
1348	0,200	1,274	1,600	1,984	1,184	1,000
1470	0,700	0,560	0,718	1,079	0,673	0,739
Относительные полосы поглощения (гош-конформация)						
1015	0,885	1,171	2,473	1,794	0,969	0,870
1042	0,638	0,342	1,285	0,524	0,204	0,130
1375	0,154	0,179	0,250	0,302	0,112	0,043
1460	0,638	0,363	0,425	0,587	0,592	0,609

Таблица 3

Оценка степени кристалличности порошков ПЭТ

Коэффициент	ПЭТ-отходы	Порошок из отходов волокон		Порошок из ПЭТ-бутылок		
		получен при соотношении ПЭТ : растворитель				
		1 : 10	1 : 20	1 : 10	1 : 20	1 : 30
D_{973}/D_{795}	0,79	0,75	1,69	0,59	0,62	0,67
D_{848}/D_{795}	1,29	1,38	1,58	1,31	1,54	1,71
D_{1042}/D_{795}	0,57	0,48	1,90	0,45	0,39	0,33
D_{895}/D_{795}	0,81	0,37	0,39	0,56	0,44	0,33
D_{1098}/D_{1370}	5,30	11,71	13,42	11,16	14,45	40,00
D_{1255}/D_{1370}	5,40	14,12	14,30	13,21	19,18	67,00
Степень кристалличности, %	–	13,2	13,4	12,8	14,5	56,0

Отношение полос поглощения при 1098 см^{-1} (валентные колебания С–О–С) и 1255 см^{-1} (деформационные колебания С–О–С), характерное для транс-конформации ПЭТ, к полосе поглощения вверных колебаний метиленовых групп при $1370\text{--}1375\text{ см}^{-1}$, также может использоваться для характеристики степени кристалличности [21, 22]. По ИК-спектрам порошков ПЭТ были рассчитаны указанные соотношения и сопоставлены с данными по степени кристалличности, определенной по плотности порошков в соответствии с принятой методикой [15] (табл. 3).

Анализ табл. 3 показывает, что вид использованных ПЭТ-отходов (волокна или бутылки) в меньшей степени влияет на соотношение кристаллической и аморфной фазы в полимерных порошках, чем количество применяемого растворителя. Согласно источникам [23, 24] взаимодействие органических растворителей с ПЭТ приводит к кристаллизации его аморфной фазы за счет образования сферолитов и их превращения в кристаллиты, при этом чем больше соотношение растворитель : ПЭТ, тем выше степень кристалличности ПЭТ-порошков.

Возрастание соотношения ПЭТ: растворитель при получении порошков приводит к увеличению коэффициентов D_{973}/D_{795} и D_{848}/D_{795} , характерных для транс-конформации ПЭТ, и снижению коэффициентов D_{1042}/D_{795} и D_{895}/D_{795} , характерных для гош-конформаций. Коэффициенты D_{1098}/D_{1370} и D_{1255}/D_{1370} показывают, что увеличение количества используемого растворителя при получении полимерных порошков из различных видов ПЭТ-отходов (волокна, ПЭТ-бутылки) также вызывает возрастание их степени кристалличности. Регулирование степени кристалличности ПЭТ-порошков возможно за счет изменения количества органического растворителя, используемого при получении полимерных порошков. Так, повышение количества растворителя в 3 раза способствует увеличению степени кристалличности ПЭТ-порошка в среднем в 4,3 раза. Применение соотношения интенсивностей полос D_{1098}/D_{1370} и D_{1255}/D_{1370} хо-

рошо согласуется с данными по степени кристалличности порошков ПЭТ, определенной по плотностям кристаллической и аморфной фаз, что позволяет применять их для оценки степени кристалличности ПЭТ-порошков.

Заключение. Исследование структурных особенностей мелкодисперсных ПЭТ-порошков, полученных сольвентным способом, методом ИК-спектроскопии позволило охарактеризовать их аморфную и кристаллическую фазы. Оценку структурного состояния и степени кристалличности ПЭТ-порошков осуществляли на основе анализа их ИК-спектров. Были рассчитаны относительные интенсивности полос поглощения, характерные для транс- и гош-конформаций, ПЭТ-порошков по отношению к реперным полосам при 1505 и 1570 см^{-1} , и спектральные коэффициенты (D_{973}/D_{795} и D_{848}/D_{795} , D_{1042}/D_{795} и D_{895}/D_{795} , D_{1098}/D_{1370} и D_{1255}/D_{1370}). Установлено, что на соотношение транс- и гош-конформаций в получаемых полимерных порошках оказывает влияние соотношение ПЭТ : органический растворитель и в меньшей степени тип исходного ПЭТ-отхода (волокна, ПЭТ-бутылки). Увеличение соотношения ПЭТ-отходы : растворитель при получении полимерных порошков от 1 : 10 до 1 : 30 приводит к возрастанию их степени кристалличности в среднем в 4,3 раза. Степень кристалличности мелкодисперсных порошков ПЭТ, рассчитанная по ИК-спектрам (коэффициенты D_{973}/D_{795} и D_{848}/D_{795} , D_{1042}/D_{795} и D_{895}/D_{795} , D_{1098}/D_{1370} и D_{1255}/D_{1370}), подтверждается данными, полученными по общепринятой методике ее определения по плотности полимерных порошков.

Работа выполнена в рамках государственного задания 6.6 «Разработка научно обоснованных технологических приемов регулирования структурно-механических свойств и стабильности битумных вяжущих для дорожного и коммунального строительства» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.6 «Строительные материалы, конструкции, технологии» (2021–2025 гг.).

Список литературы

1. Шайерс Дж. Рециклинг пластмасс: наука, технология, практика. СПб.: Научные основы и технологии, 2012. 640 с.
2. Керницкий В. И., Жир Н. А. Переработка отходов полиэтилентерефталата // Полимерные материалы. 2014. № 8. С. 11–21.
3. An analysis of European plastics production, demand and waste data // Plastics Europe (the Association of Plastics Manufacturers in Europe) and EPRO (the European Association of Plastics Recycling and Recovery Organizations). URL: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf> (date of access: 06.04.2022).
4. Отчет об объемах сбора вторичных материальных ресурсов и отходов товаров и упаковки, размерах расходования денежных средств, полученных от производителей и поставщиков за 2021 год // Оператор вторичных материальных ресурсов. URL: https://vtoperoperator.by/sites/default/files/operator_2021_0.pdf (дата обращения: 06.04.2022).
5. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник // Национальный статистический комитет Республики Беларусь (Белстат). 2021. 203 с. URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 06.04.2022).
6. Машкович А. М. Особенности переработки полиэтилентерефталата в пленки и листы // Полимерные материалы. 2018. № 4. С. 36–41.
7. Вторичная переработка пластмасс / под ред. Ф. Ла Мантия. СПб.: Профессия, 2006. 400 с.
8. Химия и технология производства полиэтилентерефталата / У. Р. Урманцев [и др]. СПб.: Недра, 2016. 130 с.
9. Табаев Б. В., Хлесткин Р. Н., Масленников Е. И. Особенности кристаллизации аморфного полиэтилентерефталата в твердой фазе в условиях механических деформаций // Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17, № 4. С. 29–31.
10. Рециклинг отходов многослойных пластиков / В. Т. Липик [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 4. Химия и технология органических веществ. 2006. Вып. XIV. С. 71–75.
11. Method for recycling polyesters or polyester mixtures from polyester-containing waste: pat. US 20070265361 / A. Maurer, U. Knauf, G. Wolz, M. Frankl, O. Beck. Publ. 3.05.2011.
12. Способ очистки загрязненных полимеров: пат. RU 2687936 / Д.М. Лайман, М. Гуннерсон, Х. Шонеман, К. Уильямс. Оpubл. 16.05.2019.
13. Джайлз Д., Брукс Д., Сабсай О. Ю. Производство упаковки из ПЭТ. М.: Профессия, 2006. 368 с.
14. Schmidt P. G. Polyethylene Terephthalate Structural Studies // Journal of polymer science. 1963. Vol. 1. P. 1271–1292. DOI: 10.1002/pol.1963.100010417.
15. Петухов Б. В. Полиэфирные волокна. М.: Химия, 1976. 272 с.
16. Roberge M., Prud'homme R. E., Brisson J. Molecular modelling of the uniaxial deformation of amorphous polyethylene terephthalate // Polymer. 2004. Vol. 45. P. 1401–1411. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.04.005.
17. Chen Z., Hay J. N., Jenkins M. J. FTIR spectroscopic analysis of poly(ethylene terephthalate) on crystallization // European Polymer Journal. 2012. No. 48. P. 1586–1610. DOI: 10.1016/j.tca.2012.11.002.
18. Инфракрасная спектроскопия полимеров / под ред. И. Деханта. М.: Химия, 1976. 473 с.
19. Фомина Н. Н., Иващенко Ю. Г., Полянский М. М. Изучение структурных особенностей полиэтилентерефталата при вторичной переработке // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 93–97.
20. Влияние 1,1,3-тригидроперфторпропанола-1 на структуру и свойства пленок полиэтилентерефталата / С. В. Кудашев [и др.] // Известия ВолгГТУ. Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. 2013. Вып. 11, № 19 (122). С. 86–90.
21. C. Cole K., Ajji A., Pellerin É. New Insights into the Development of Ordered Structure in Poly(ethylene terephthalate). 1. Results from External Reflection Infrared Spectroscopy // Macromolecules. 2002. 35 (3). P. 770–784. DOI: 10.1021/ma011492i.
22. Polyethylene terephthalate-multiwall nanotubes nanocomposites: Effect of nanotubes on the conformations, crystallinity and crystallization behavior of PET / S. Tzavalas [et al.] // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 2008. No. 46 (7). P. 668–676. DOI: 10.1002/polb.21378.
23. Desai A. B., Wilkes G. L. Solvent-induced crystallization of polyethylene terephthalate // Journal of Polymer Science: Polymer Symposia. 1974. No. 46(1). P. 291–319. DOI: 10.1002/polc.5070460123.
24. Facile Preparation of Hydrophobic PET Surfaces by Solvent Induced Crystallization / E. Afonso [et al.] // Coatings. 2022. No. 12(2). 137. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/2/137> (date of access: 06.04.2022). DOI: 10.3390/coatings12020137.

References

1. Shayers Dzh. *Retsikling plastmass: nauka, tekhnologiya, praktika* [Plastics recycling: science, technology, practice]. St. Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2012. 640 p. (In Russian).
2. Kernitskiy V. I., Zhir N. A. Recycling of polyethylene terephthalate waste. *Polimernyye materialy* [Polymer materials], 2014, no. 8, pp. 11–21 (In Russian).
3. An analysis of European plastics production, demand and waste data. *Plastics Europe (the Association of Plastics Manufacturers in Europe) and EPRO (the European Association of Plastics Recycling and Recovery Organizations)*. Available at: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf> (accessed 06.04.2022).
4. Report on the volume of collection of secondary material resources and waste of goods and packaging, the amount of spending money received from manufacturers and suppliers for 2021 (Operator of secondary material resources). Available at: https://vtoroperator.by/sites/default/files/operator_2021_0.pdf (accessed 06.04.2022). (In Russian).
5. Environmental protection in the Republic of Belarus. Statistical compendium (National Statistical Committee of the Republic of Belarus (Belstat)). 2021. 203 p. Available at: <https://www.belstat.gov.by> (accessed 06.04.2022). (In Russian).
6. Mashkovich A. M. Features of processing polyethylene terephthalate into films and sheets. *Polimernyye materialy* [Polymer materials], 2018, no. 4, pp. 36–41 (In Russian).
7. *Vtorichnaya pererabotka plastmass* [Recycling of plastics] / ed. F. La Mantiya. St. Petersburg, Professiya Publ., 2006, 400 p. (In Russian).
8. Urmantsev U. R., Grudnikov I. B., Tabaev B. V., Lakeev S. N., Ishalina O. V. *Khimiya i tekhnologiya proizvodstva polietilentereftalata* [Chemistry and production technology of polyethylene terephthalate]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2016. 130 p. (In Russian).
9. Tabaev B. V., Khlestkin R. N., Maslennikov E. I. Features of crystallization of amorphous polyethylene terephthalate in the solid phase under mechanical deformation. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, vol. 17, no. 4, pp. 29–31 (In Russian).
10. Lipik V. T., Evsey A. V., Pobedinskaya N. P., Prokopchuk N. R. Recycling waste of multilayer plastics. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IV, Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology, 2006, issue XIV, pp. 71–75 (In Russian).
11. Maurer A., Knauf U., Wolz G., Frankl M., Beck O. Method for recycling polyesters or polyester mixtures from polyester-containing waste. Patent US 20070265361, 2011.
12. Layman D. M., Gunnerson M., Shoneman Kh., Uil'yams K. Method for cleaning contaminated polymers. Patent RU 2687936, 2019 (In Russian).
13. Dzhaylz D., Bruks D., Sabsay O. Yu. *Proizvodstvo upakovki iz PET* [Production of PET packaging]. Moscow, Professiya Publ., 2006, 368 p. (In Russian).
14. Schmidt P. G. Polyethylene Terephthalate Structural Studies. *Journal of polymer science*, 1963, vol. 1, pp. 1271–1292. DOI: 10.1002/pol.1963.100010417.
15. Petukhov B. V. *Poliefirnyye volokna* [Polyester fibers]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 272 p. (In Russian).
16. Roberge M., Prud'homme R. E., Brisson J. Molecular modelling of the uniaxial deformation of amorphous polyethylene terephthalate. *Polymer*, 2004, vol. 45, pp. 1401–1411. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.04.005.
17. Chen Z., Hay J. N., Jenkins M. J. FTIR spectroscopic analysis of poly(ethylene terephthalate) on crystallization. *European Polymer Journal*, 2012, no. 48, pp. 1586–1610. DOI: 10.1016/j.tca.2012.11.002.
18. *Infrakrasnaya spektroskopiya polimerov* [Infrared spectroscopy of polymers] / ed. I. Dekhanta. Moscow, Khimiya Publ., 1976, 473 p. (In Russian).
19. Fomina N. N., Ivashchenko Yu. G., Polyanskiy M. M. Study of the structural features of polyethylene terephthalate during recycling. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2017, no. 2, pp. 93–97 (In Russian).
20. Kudashev S. V., Urmantsev U. R., Tabaev B. V., Arisova V. N., Danilenko T. I., Zheltobryukhov V. F. Influence of 1,1,3-trihydroperfluoropropanol-1 on the structure and properties of polyethylene terephthalate films. *Izvestiya VolgGTU* [News of the VolgGTU], series Chemistry and Technology of Organoelement Monomers and Polymeric Materials, 2013, issue 11, no. 19 (122), pp. 86–90 (In Russian).
21. Cole K., Ajji A., Pellerin É. New Insights into the Development of Ordered Structure in Poly(ethylene terephthalate). 1. Results from External Reflection Infrared Spectroscopy. *Macromolecules*, 2002, 35 (3), pp. 770–784. DOI: 10.1021/ma011492i.

22. Tzavalas S., Mouzakis D. E., Drakonakis V., Gregoriou, V. G. Polyethylene terephthalate-multiwall nanotubes nanocomposites: Effect of nanotubes on the conformations, crystallinity and crystallization behavior of PET. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2008, no. 46 (7), pp. 668–676. DOI: 10.1002/polb.21378.

23. Desai A. B., Wilkes G. L. Solvent-induced crystallization of polyethylene terephthalate. *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*, 1974, no. 46(1), pp. 291–319. DOI: 10.1002/polc.5070460123.

24. Afonso E., Martínez-Gómez A., Huerta A., Tiemblo P., García N. Facile Preparation of Hydrophobic PET Surfaces by Solvent Induced Crystallization. *Coatings*, 2022, no. 12 (2). 137. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/2/137> (accessed 06.04.2022). DOI: 10.3390/coatings12020137.

Информация об авторах

Шрубок Александра Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазопереработки и нефтехимии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shrubok@belstu.by

Хаппи Вако Блэк Жюниор – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: wakojunior@mail.ru

Information about the authors

Shrubok Aleksandra Olegovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Oil and Gas Processing and Petroleum Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shrubok@belstu.by

Happi Wako Black Junior – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wakojunior@mail.ru

Поступила 08.04.2022