

DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-4-63-68

УДК 677.494.6:678.82

ЗАМЕДЛЕНИЕ ГОРЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЕ ПЭТ НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА

Н. Р. ПРОКОПЧУК¹, Л. А. ЛЕНАРТОВИЧ^{1*}, Т. А. ВИШНЕВСКАЯ¹, Ю. М. МОЖЕЙКО²

¹Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

²ОАО «Могилевхимволокно», пр-т Шмидта, 300, 212035, г. Могилев, Беларусь

Цель работы — модифицировать полиэтилентерефталат (ПЭТ) на стадии его синтеза в лабораторных условиях наночастицами диоксида титана (TiO₂); сформовать мононити и осуществить термовытяжку методами, приближенными к промышленной технологии производства полиэфирных нитей на ОАО «Могилевхимволокно»; изучить их стойкость к горению и механические свойства; предложить гипотезу замедления горения и упрочнения ПЭТ при его модифицировании наночастицами TiO₂.

Авторами исследованы свойства ПЭТ мононитей, полученных при введении на стадии синтеза сверхмалых количеств TiO₂: 0,005 мас.%, 0,010 мас.%, 0,015 мас.% и 0,020 мас.%.

Устойчивость к горению образцов ПЭТ определяли согласно ГОСТ 28157 и ГОСТ 12.1.044. Энергию активации термоокислительной деструкции рассчитывали методом Бройдо по данным динамической термогравиметрии. Механические свойства мононитей ПЭТ, термовытянутых в 4,5 раза, оценивали тензометрическим методом.

Установлено оптимальное содержание вводимых при синтезе ПЭТ наночастиц TiO₂, равное 0,015 мас.%, при котором получили максимальные показатели наномодифицирования: рост энергии активации термоокислительной деструкции с 180 кДж/моль до 200 кДж/моль; снижение суммарного времени горения с 22 с до 1 с; увеличение прочности при разрыве с 26 сН/текс до 35 сН/текс и модуля упругости с 420 сН/текс до 570 сН/текс при практически неизменном относительном удлинении при разрыве.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, наночастицы диоксида титана, устойчивость к горению, прочность при разрыве, ПЭТ нити.

SLOWING COMBUSTION AND STRENGTHENING PET WITH TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES

N. R. PROKOPCHUK¹, L. A. LENARTOVICH^{1*}, T. A. VISHNEVSKAYA¹, YU. M. MOZHEYKO²

¹Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

²OJSC Mogilevkhimvolokno, Schmidt Ave., 300, 212035, Mogilev, Belarus

Main purpose of research is to modify polyethylene terephthalate (PET) at its synthesis stage in laboratory conditions by titanium dioxide nanoparticles (TiO₂); to form and to stretch thermally monofilament yarns by methods close to industrial technology of polyester threads manufacturing used at Open Joint Stock Company “Mogilevkhimvolokno”; to explore burning resistance and mechanical properties; to hypothesize that being modified by dioxide nanoparticle results in retardation of PET burning process as well as strengthening of PET structure.

Authors of the research explored the properties of PET monofilament yarns after they had been doped at their synthesis stage with super-small amounts of titanium dioxide nanoparticles: 0.005 wt.%, 0.010 wt.%, 0.015 wt.% and 0.020 wt.%.

*Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: liliya.porova@mail.ru

Burning resistance of PET specimens was specified according to GOST 28157 and GOST 12.1.044. Thermal oxidative breakdown value was calculated using Broydo method based on dynamic thermogravimetry data. Mechanical properties of PET monofilament yarns, thermally stretched by 4.5 times, were evaluated using strain-measuring method.

During the research it was determined that 0.015 wt.% is optimal content value for titanium dioxide nanoparticles doped in course of PET synthesis. This value enables to obtain maximum nanomodification performance: increase of thermal oxidative breakdown value from 180 kJ/mole to 200 kJ/mole, reduction of overall burning time from 22 s to 1 s, increase of breaking strength from 26 cN/tex to 35 cN/tex and elasticity coefficient from 420 cN/tex to 570 cN/tex at practically unchanged breaking elongation value.

Keywords: polyethylene-terephthalate, titanium dioxide nanoparticles, the fire resistance, tensile stress at break, PET filaments.

Введение

Текстильные материалы на основе ПЭТ волокон широко применяются во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве и быту. Связано это с уникальными свойствами полиэфирных волокон: помимо высоких технических характеристик (однородность по толщине, высокая прочность, химическая стойкость, устойчивость к многократным деформациям, истиранию), изделия из них характеризуются хорошими воздухопроницаемостью, гигиеничностью и гипоаллергенностью. Почти единственный недостаток изделий из полиэфирных волокон — их высокая горючесть [1]. Достаточно эффективными методами огнезащиты синтетических волокнообразующих полимеров являются: внесение замедлителей горения в расплав полимера, модификация химического состава мономеров и поверхностная обработка волокон на стадии их получения [2–5]. Вместе с тем введение замедлителей горения в реакционную смесь на стадии получения полимера или в его расплав приводит к ухудшению физико-механических и волокнообразующих свойств полимерного материала, а поверхностная пропитка замедлителями горения неустойчива к водным обработкам из-за химической инертности полиэфирного материала и бездефектности поверхности его волокон. Поэтому, проблема создания волоконной продукции пониженной горючести в сочетании с высокими физико-механическими показателями является актуальной.

Однако решение этой проблемы с помощью традиционных антипиренов, вводимых в волокна в значительных количествах (от нескольких мас.% до десятков мас.%) связано со значительными трудностями. Антипирены существенно ухудшают деформационно-прочностные свойства полимеров, препятствуя ориентации макромолекул и росту межмолекулярных взаимодействий. Для комплексного решения таких задач возможно использование наноматериалов. Ранее нами [6] научно обоснована и экспериментально подтверждена возможность существенного упрочнения лабораторных ПЭТ мономеров, модифицированных 0,015 мас.% углеродными нанотрубками, введенными в полимер на стадии его синтеза.

Научная идея данной работы заключается в

снижении горючести и повышении прочности ПЭТ волокон путем их наномодифицирования диоксидом титана в сверхмалых количествах (сотые-десятые доли мас.%). В литературе [7] имеются сведения о снижении горючести полипропилена наночастицами TiO_2 , введенными в расплав полимера в количестве 5 мас.%. При этом предполагается, что наночастицы TiO_2 подавляют процессы дымообразования за счет образования коксового остатка, влияют на образование защитной пленки, изолирующей полимер от пламени и кислорода воздуха.

В работе [8] показано, что шерстяные и шелковые ткани, обработанные суспензией TiO_2 с концентрацией от 0,5 г/л до 10 г/л в сочетании с обычными антипиренами, проявляют замедление горения. Согласно [3], частицы TiO_2 способствуют формированию физического теплоизоляционного барьера, уменьшающего передачу тепла и кислорода между пламенем и волокнами и тем самым снижающего скорость горения.

Цель работы — модифицировать полиэтилентерефталат на стадии его синтеза в лабораторных условиях наночастицами диоксида титана; сформировать мономер и его термовытянуть методами, приближенными к промышленной технологии производства полиэфирных нитей, реализованной на ОАО «Могилевхимволокно»; изучить стойкость к горению и механические свойства полученных нитей; предложить гипотезу замедления горения и упрочнения ПЭТ при его модифицировании наночастицами TiO_2 .

Материалы и методы исследования

Процессы синтеза ПЭТ на лабораторной установке центральной исследовательской лаборатории ОАО «Могилевхимволокно», формования и термовытяжки мономеров подробно описаны в работе [6]. Наночастицы TiO_2 («Chongqing Xinhua Chemical», КНР) получены сжиганием TiCl_4 в воздушной плазме и представляют собой смесь фаз анатаза и рутила. Площадь удельной поверхности частиц составляет 12,5 м²/г, насыпная плотность 0,5–2,0 г/см³. Порошок имеет распределение частиц по размерам от 80 нм до 110 нм. В качестве дисперсионной среды для приготовления наносуспензий TiO_2 использовали этиленгликоль (ГОСТ 10164) — один из мо-

номеров, применяемых при синтезе ПЭТ. Наночастицы TiO_2 вводили в реакционную среду дробными порциями на стадии синтеза полимера в количествах 0,005 мас.%; 0,001 мас.%; 0,015 мас.% и 0,020 мас.%. Время синтеза регулировали для получения образцов с близкой характеристической вязкостью [9]. Гранулы ПЭТ перед формованием при температуре 275 °С сушили в условиях вакуума (55 мм рт. ст.) при температуре 160 °С в течение 12 ч. Термовытяжку осуществляли при 90 °С до кратности 4,5 с помощью обогреваемого каландра с намоточным устройством «Rondol» («Rondol Industrie», Франция).

Определение стойкости к горению образцов ПЭТ проводили двумя способами: согласно ГОСТ 28157 «Пластмассы. Методы определения стойкости к горению» (метод Б) и ГОСТ 12.1.044 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Образцы для испытаний по первому методу получали из мононитей прессованием при 270 °С в бруски размером 125×10×2 мм. Бруски закрепляли вертикально. Пламя газовой горелки подносили к центру свободного конца образца на 10 с. Затем горелку относили от образца и регистрировали время горения образца t_1 . Когда горение образца прекращалось, пламя подносили к образцу повторно. Через 10 с горелку снова относили от образца и регистрировали время горения t_2 . Вычисляли суммарное время горения 5 брусков каждого образца $t_{с.г.}$. Под образцом на расстоянии 300 мм от конца помещали слой ваты размером около 50×50 мм и толщиной 6 мм. На него падали капли расплава полимера.

Для второго способа образцы готовили в виде отрезков мононитей длиной 5 мм. Их помещали в мешочки прямоугольной формы длиной 65 мм, шириной 10 мм, высотой 160 мм из стеклоткани, тол-

щиной 0,15 мм, сшитые металлическими скрепками. Мешочек вносили в пламя горелки, когда его температура достигала 200 °С. Через каждые 30 с измеряли температуру газов горения полимера. Исследовали два образца: немодифицированный ПЭТ и ПЭТ, полученный введением в реакционную среду 0,015 мас.% TiO_2 .

Устойчивость к термоокислительной деструкции образцов определяли на приборе «TGA/DSC-1HT/1600 319DTA» («Mettler Toledo Instruments», Швейцария) в воздушной среде при скорости линейного подъема температуры 5 град/мин. По данным динамической термогравиметрии методом Бройдо рассчитывали энергию активации процесса по скорости потери массы образцом [6].

Механические испытания образцов мононитей проводили на тензомере «Т 2020» («Alpha Technologies», США). Зажимная длина образцов 80 мм, скорость их растяжения 5 мм/мин. Средний диаметр мононитей 0,8 мм определяли с помощью толщинометра «Mitutoyo» («Mitutoyo Group», Япония). Погрешность измерений составляла не более 1%. В качестве результата испытаний принимали среднее арифметическое значение 10 измерений каждого образца. Статистическую обработку полученных результатов проводили в соответствии с ГОСТ 14359 «Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования».

Результаты и их обсуждение

Замедление горения ПЭТ нитей с увеличением в них содержания наночастиц TiO_2 весьма существенно (табл. 1).

Суммарное время горения $t_{с.г.}$ серии из пяти образцов после двукратного приложени пламени по ГОСТ 28157, метод Б и извлечения их из пламени

Таблица 1 — Характеристика горения ПЭТ образцов
Table 1 — Characteristics of the PET samples burning reactions

Композиция	$t_{с.г.}$, с	Наличие и характер капель, воспламенение ваты
Немодифицированный ПЭТ	21	Горящие капли. Вата воспламеняется. Образец под воздействием пламени интенсивно плавится и льется в виде капель низкой вязкости, за счет этого иногда происходит тушение пламени, т. е. сами горящие капли тушат пламя. Вязкость очень низкая. Возгорание образца происходит сразу же после внесения в пламя и продолжается и после извлечения образца из пламени
ПЭТ 0,005% TiO_2	13,5	Горящие капли. Вата воспламеняется. Во время горения очень сильно вытягивается в виде волокна, капает отдельными небольшими каплями. Вязкость капель увеличивается, полимер менее текуч. Самостоятельно горит после извлечения из пламени
ПЭТ 0,010% TiO_2	9	Горящие капли. Вата воспламеняется. Во время горения капает отдельными небольшими каплями, вытягивается в виде волокон. Горит после извлечения из пламени 1–2 с
ПЭТ 0,015% TiO_2	1	Горящие капли. Вата воспламеняется. Вытягивается в виде волокон. После извлечения из пламени не горит, за исключением одного образца, который горит 1 с

газовой горелки снизилось с 22 с до 1 с. Несмотря на то, что все исследованные образцы по стойкости к горению относятся к категории ПВ-2 в соответствии с приложением А «Категории стойкости к горению вертикально закрепленных образцов» (метод Б, ГОСТ 28157), т. е. вата, находящаяся под образцами на расстоянии 300 мм воспламеняется горящими падающими каплями расплава полимера, установленное замедление горения имеет не только научное, но и важное практическое значение. После извлечения образцов из пламени горелки после 10 с горения образец ПЭТ, полученный при введении в реакционную среду 0,015 мас.% TiO_2 , самостоятельно не горит. После повторного внесения в пламя на 10 с и вынесения из него горение не поддерживается, что соответствует категории ПВ-0. Требованиям категории ПВ-0 отвечает также суммарное время горения $t_{\text{с.г}}$ модифицированных образцов, которое значительно меньше 50 с.

С увеличением содержания наночастиц в ПЭТ поведение расплава под действием силы тяжести принципиально изменяется: капли расплава немодифицированного ПЭТ большие и падают с большой частотой, в то же время по мере увеличения концентрации наночастиц TiO_2 частота падения капель замедляется, и они вытягиваются в волокна. Это свидетельствует о возможном усилении межмолекулярных взаимодействий в расплавах ПЭТ наночастицами TiO_2 , вероятно, за счет взаимодействия активной поверхности наночастиц с полярными группами $-\text{COOH}$ и $-\text{OH}$ полимера. Таким образом, сетка, образованная карбонильными и гидроксильными группами макромолекул полимера, пронизывается сеткой из наночастиц TiO_2 с высокой поверхностной энергией.

На усиление межмолекулярных взаимодействий в расплавах наномодифицированного ПЭТ указывают также данные термоаналитического анализа образцов нитей. Межмолекулярные взаимодействия увеличивают энергию активации термоокислительной деструкции (потенциальный барьер E_d разрыва химических связей в основной цепи полимера), поэтому с ростом содержания наночастиц в ПЭТ растет E_d (рис. 1).

Рост параметра E_d значительный: со 180 кДж/моль

у немодифицированного ПЭТ до 200 кДж/моль у ПЭТ, содержащего 0,015 мас.% наночастиц TiO_2 . Дальнейшее увеличение содержания наночастиц в ПЭТ нецелесообразно, т. к. приводит к снижению E_d из-за нарушения равномерности распределения наночастиц в полимерной матрице. Избыток наночастиц в отдельных частях объема полимера нарушает сетку, образованную наночастицами с макромолекулами ПЭТ. Межмолекулярные взаимодействия начинают снижаться, что вызывает снижение параметра E_d .

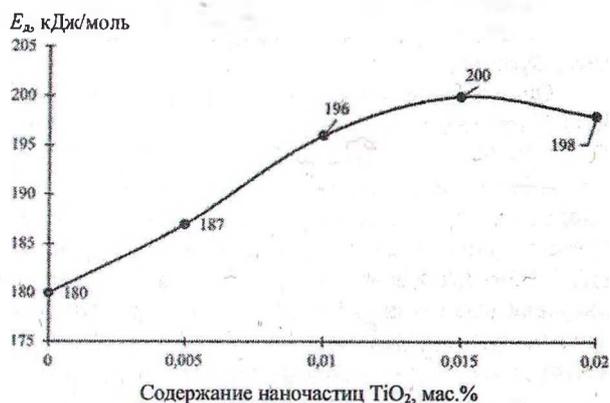


Рисунок 1 — Зависимость энергии активации термоокислительной деструкции от содержания наночастиц диоксида титана
Fig. 1 — Dependence the activation energy of thermooxidative destruction on the concentration of dioxide titanium nanoparticles

Об усилении межмолекулярных взаимодействий в ПЭТ при введении в него наночастиц TiO_2 свидетельствует также исчезновение экзотермического пика холодной кристаллизации на кривых ДСК у наномодифицированного ПЭТ, в то время как у немодифицированного ПЭТ он отчетливо проявляется при 117,4 °С. Усиление межмолекулярных взаимодействий наночастицами TiO_2 замедляет движение звеньев макромолекул ПЭТ, снижает гибкость макромолекул, необходимую для образования кристаллов (рис. 2).

Полученные по ГОСТ 12.1.044 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» данные для композиций ПЭТ, содержащих 0,015 мас.% наночастиц TiO_2 и немодифицированного ПЭТ приведены на рис. 3.

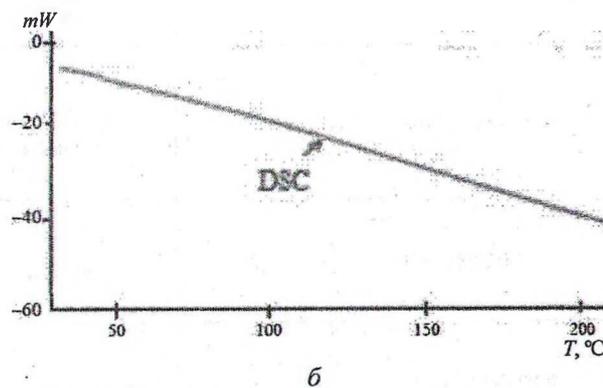
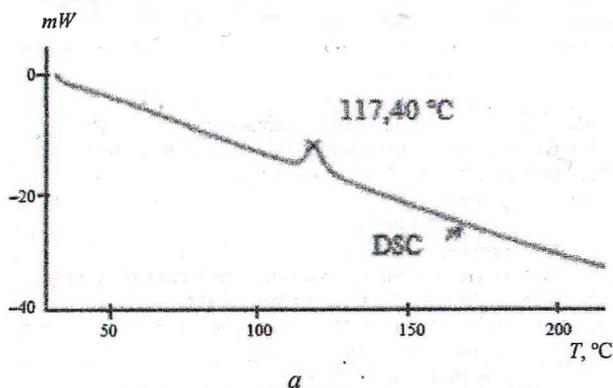


Рисунок 2 — Кривые ДСК для ПЭТ моноволокон: а — исходный ПЭТ; б — ПЭТ + 0,015% TiO_2
Fig. 2 — DSC curves for PET filaments: а — basic PET; б — PET + 0.015% TiO_2

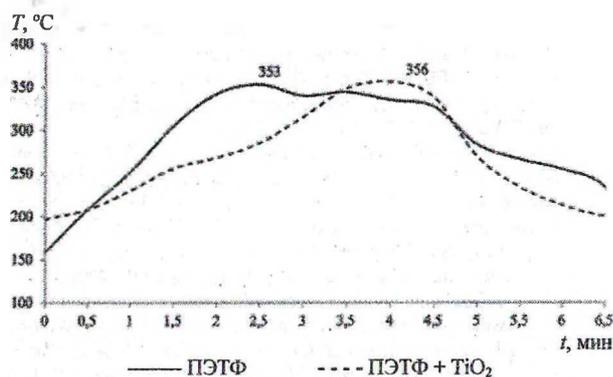


Рисунок 3 — Температурный профиль газообразных продуктов горения

Fig. 3 — Temperature profile of gaseous combustion products

Из анализа рисунка следует, что немодифицированный ПЭТ имеет значение $t_{max} = 353$ °С, которая достигается за время $\tau = 3$ мин. В то же время образец ПЭТ, содержащий 0,015 мас.% TiO_2 , характеризуется значениями $t_{max} = 356$ °С при $\tau = 4,5$ мин. Наблюдается явное замедление горения наночастицами TiO_2 .

Наномодификация ПЭТ переводит его из категории средней воспламеняемости в категорию трудной воспламеняемости согласно ГОСТ 12.1.044.

Установлено также упрочнение ПЭТ мононитей наночастицами TiO_2 . Прочность при разрыве σ_r и модуль упругости E практически симбатно изменяются с параметром E_d (табл. 2).

Полученные данные согласуются с кинетической теорией прочности твердых тел [10]:

$$\sigma = \gamma^{-1} \cdot (E_d - R \cdot T \cdot \ln \tau^* / \tau_0),$$

где γ — структурно-чувствительный коэффициент, постоянный для всех образцов, термовытянутых до одной кратности 4,5; T — температура испытания образцов постоянная, равная 20 °С; τ_0 — константа, равная 10^{-13} с; τ^* , с — долговечность при испытании на разрывной машине, практически постоянная, т. к. время деформирования образцов до разрыва практически одинаково ($\epsilon_p \sim const$). Из формулы видно, что увеличение прочности материала обусловлено ростом энергии активации при прочих равных параметрах, что согласуется с полученными данными.

Влияние молекулярной массы ПЭТ на механические свойства мононитей исключено, т. к. исследовали образцы с практически одинаковой характеристической вязкостью (0,68–0,70).

Таблица 2 — Зависимость механических свойств ПЭТ мононитей от содержания наночастиц TiO_2
Table 2 — Dependence of the mechanical properties PET filaments on TiO_2 nanoparticles quantity

Содержание TiO_2 , мас. %	Характеристическая вязкость $[\eta]^*$, дл/г	Прочность при разрыве σ_r , сН/текс	Модуль упругости при растяжении E , сН/текс	Относительное удлинение при разрыве ϵ_p , %
—	0,69	26	420	30
0,005	0,70	30	480	28
0,010	0,68	33	530	27
0,015	0,69	35	570	28
0,020	0,70	34	560	28

Примечание: * — измерения выполнены в соответствии с заводской методикой ОАО «Могилевхимволокно» № 17-М-2008 «Полиэтилентерефталат. Вязкость удельная и характеристическая»

Эффект упрочнения мононитей максимален при концентрации 0,015 мас.% TiO_2 и равен 35%. Это существенное упрочнение, имеющее практическое значение.

Выводы

Установлено комплексное положительное влияние наночастиц TiO_2 на свойства ПЭТ: замедление горения и упрочнение мононитей. Предложен возможный механизм замедления горения и упрочнения, согласно которому наночастицы TiO_2 , усиливая межмолекулярные взаимодействия в ПЭТ, повышают энергии активации процессов термоокислительной, механодеструкции и горения. Одновременное замедление горения и упрочнение ПЭТ наночастицами TiO_2 , введенными в сверхмалых количествах до 0,015 мас.%, практически важно, т. к. позволяет улучшить важнейшие эксплуатационные свойства ПЭТ нитей без существенного увеличения их стоимости.

Благодарности

Работа выполнена в рамках задания 4.2.8 «Разработка научных основ и технологий наномодификации на различных этапах получения полиэфирных волокнистых материалов с целью улучшения их эксплуатационных свойств» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Многofункциональные и композиционные материалы».

Обозначения

ДСК — дифференциальная сканирующая калориметрия; ПЭТ — полиэтилентерефталат; E , сН/текс — модуль упругости при растяжении; E_d , кДж/моль — энергия активации термоокислительной деградации; t_1 , с — время горения образца после первого приложения пламени к образцу; t_2 , с — время горения после второго приложения пламени к образцу; t , мин — время проведения эксперимента; $t_{с.г.}$, с — суммарное время горения серии из пяти образцов после двукратного приложения пламени; t_{max} , °С — максимальная температура газообразных продуктов горения исследуемого материала; γ — структурно-чувствительный коэффициент; T , °С — температура испытания образцов; ϵ_p , % — относительное удлинение при разрыве; $[\eta]^*$, дл/г — характеристическая вязкость; σ_r , сН/текс — прочность при разрыве; τ , мин — время

достижения t_{max} ; τ_0 — константа, равная 10^{-13} с; τ^* , с — долговечность при испытании на разрывной машине.

Литература

1. Рева О. В., Назарович А. Н., Богданова В. В. Закрепление нетоксичных антипиренов на поверхности полиэфирных волокон // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, 2019, Т. 3, № 2. С. 107–116.
2. Jiyeon Oh, Sam Soo Kim, Jaewoong Lee, Chankyu Kang. Supercritical fluid flame-retardant processing of polyethylene terephthalate (PET) fiber treated with 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO): Changes in physical properties and flame-retardant performance. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, vol. 54. doi: 10.1016/j.jcou.2021.101761
3. Carosio F., Alongi J., Frache A. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology, thermal stability and combustion behavior of PET fabrics // *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, is. 5, pp. 893–902. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009
4. Fang Ding, Shumin Zhang, Xiaoyan Chen, Rong Li, Xuehong Ren. PET fabric treated with environmental-friendly phosphorus-based compounds for enhanced flame retardancy, thermal stability and anti-dripping performance // *Composites Part B: Engineering*, 2022, vol. 235. doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109791
5. Chenxi Zhang, Chao Zhang, Jiewen Hu, Zhiming Jiang, Ping Zhu. Flame-retardant and anti-dripping coating for PET fabric with hydroxyl-containing cyclic phosphoramidate // *Polymer Degradation and Stability*, 2021, vol. 192. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109699
6. Прокопчук Н. Р., Любимов А. Г., Вишневская Т. А., Можейко Ю. М., Крауклис А. В. Упрочнение ПЭТФ нитей многостенными углеродными нанотрубками // Полимерные материалы и технологии, 2020, Т. 6, № 4, С. 30–36. doi: 10.32864/polymmattech-2020-6-4-30-36
7. Серцова А. А., Юртов Е. В. Наночастицы соединений металлов — замедлители горения для полимерных композиционных материалов // Получение и модифицирование синтетических волокон и нитей для инновационных материалов, композитов и изделий: тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции, 2–5 сентября 2015 г., г. Плес Ивановской обл. Иваново: Иваново, 2015. С. 21.
8. Rashid M. M., Simončič B., Tomšič B. Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces // *Surface and Interfaces*, 2021, vol. 22. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100890
9. Прокопчук Н. Р., Ленартович Л. А., Вишневская Т. А., Можейко Ю. М. Наномодификация полиэтилентерефталата // Нефтехимия-2021: материалы IV международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021. Минск: БГТУ, 2021. С. 104–106.
10. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- netoksichnykh antipirenov na poverkhnosti poliefirnykh volokon [Fixation of nontoxic antipirens on the surface of polyester fibers]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi* [Journal of Civil Protection], 2019, vol. 3, no. 2, pp. 107–116.
2. Jiyeon Oh, Sam Soo Kim, Jaewoong Lee, Chankyu Kang. Supercritical fluid flame-retardant processing of polyethylene terephthalate (PET) fiber treated with 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO): Changes in physical properties and flame-retardant performance. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, vol. 54. doi: 10.1016/j.jcou.2021.101761
3. Carosio F., Alongi J., Frache A. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology, thermal stability and combustion behavior of PET fabrics. *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, is. 5, pp. 893–902. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009
4. Fang Ding, Shumin Zhang, Xiaoyan Chen, Rong Li, Xuehong Ren. PET fabric treated with environmental-friendly phosphorus-based compounds for enhanced flame re-tardancy, thermal stability and anti-dripping performance. *Composites Part B: Engineering*, 2022, vol. 235. doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109791
5. Chenxi Zhang, Chao Zhang, Jiewen Hu, Zhiming Jiang, Ping Zhu. Flame-retardant and anti-dripping coating for PET fabric with hydroxyl-containing cyclic phosphoramidate. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, vol. 192. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109699
6. Prokopchuk N. R., Lyubimov A. G., Vishnevskaya T. A., Mozheyko Yu. M., Krauklis A. V. Uprochnenie PETF nitey mnogostennymi uglerodnymi nanotrubkami [Strengthening PET filaments with multi-walled carbon nanotubes]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2020, vol. 6, no. 4, pp. 30–36. doi: 10.32864/polymmattech-2020-6-4-30-36
7. Sertsova A. A., Yurtov E. V. Nanochastitsy soedineniy metallov — zamedliteli gorenija dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Nanoparticles of metal compounds — flame retardants for polymer composite materials]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii «Poluchenie i modifitsirovanie sinteticheskikh volokon i nitey dlya innovatsionnykh materialov, kompozitov i izdelij»* [Abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Obtaining and modified synthetic fibers and threads for innovative materials, composites and products”]. Ivanovo: Ivanovo Publ., 2015, pp. 21.
8. Rashid M. M., Simončič B., Tomšič B. Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces. *Sur-face and Interfaces*, 2021, vol. 22. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100890
9. Prokopchuk N. R., Lenartovich L. A., Vishnevskaya T. A., Mozheyko Yu. M. Nanomodifikatsiya polietilenterefalata [Nanomodification of polyethylene terephthalate]. *Materialy IV mezhduнародnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke «Neftekhiya-2021»* [Materials of the IV International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing “Petrochemistry-2021”]. Minsk: BG TU Publ., 2021, pp. 104–106.
10. Regel' V. R., Slutsker A. I., Tomashevskiy E. E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of the strength of solids]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 560 p.

References

1. Reva O. V., Nazarovich A. N., Bogdanova V. V. Zakreplenie

Поступила в редакцию 12.10.2022

© Н. Р. Прокопчук, Л. А. Ленартович, Т. А. Вишневская, Ю. М. Можейко, 2022