

УДК 691.175.5/8

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.2.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАВОВ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

© В. В. Чернова, А. А. Псянчин*, Е. М. Захарова,
А. С. Шуршина, В. П. Захаров

Уфимский университет науки и технологий
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: artps96@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования физико-механических и теплофизических свойств плавов полиэтилентерефталата. Образцы получали путем измельчения плавов с последующим формованием методом литья под давлением. Характеристики материалов определены методами дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа, а также физико-механическими испытаниями на растяжение, ударную вязкость и водопоглощение.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, физико-механические свойства, вторичная переработка, полимеры, пластмассы.

Введение

В настоящее время наблюдается стремительное увеличение объемов производства и потребления полимерных материалов, среди которых одним из наиболее востребованных является полиэтилентерефталат (ПЭТ), широко применяемый для изготовления бутылок, упаковочной тары и предметов бытового назначения. По данным журнала Полимерные материалы, в 2024 г. объем производства ПЭТ в России составил около 694,8 тыс. тонн [1].

В процессе производства ПЭТ, особенно на этапе наладки и перенастройки оборудования, образуется значительное количество технологических отходов (плавов), различающихся по форме и размерам. Однако их прямое использование в производстве новых изделий невозможно без проведения дополнительных стадий переработки. Возможности применения таких отходов активно исследуются в различных научных коллективах. Существующие методы переработки ПЭТ условно делятся на химические (деполимеризация) и механические, включая создание различных полимерных смесей [2].

В работе Д. А. Панфилова рассматриваются методы аминлиза и гликолиза ПЭТ, а также использование полученных продуктов как в качестве самостоятельных связующих (например, ненасыщенных полиэфирных смол), так и в качестве эффективных модификаторов, улучшающих физико-механические и эксплуатационные свойства композитных материалов [3].

С другой стороны, механическая переработка ПЭТ приобретает особую актуальность благодаря меньшим экономическим затратам по сравнению с химическими методами, а также широким возможностям применения полученного материала в производстве изделий различного назначения [4–8].

Следует отметить, что ПЭТ-плавы, в отличие от вторичного полимерного сырья, не эксплуатировались ранее в виде готовых изделий, и, соответственно, относятся к первичным технологическим отходам. Из-за значительных линейных размеров (от 10 до 50 см в ширину) перед их переработкой требуется предварительное измельчение. В связи с этим целью данной работы является исследование физико-механических и теплофизических свойств полиэтилентерефталата, полученного путем измельчения производственных плавов.

Материалы и методы исследования

Были отобраны несколько категорий плавов первичного и вторичного полиэтилентерефталата 1-й и 2-й категории, полученных на различных установках в процессе переработки (табл. 1).

Образцы были предварительно измельчены до гранул размером 3–5 мм с использованием низкоскоростного гранулятора MO-Di-Tech. Далее гранулы подвергались сушке в сушильном шкафу LOIP при температуре 50 °C в течение 24 ч.

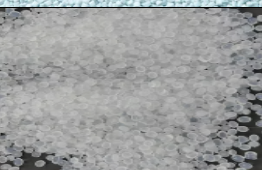
После сушки образцы формовались методом литья под давлением на термопластавтомате BabyPlast.

Для проведения механических испытаний были изготовлены образцы типа 1BA для испытаний на одноосное растяжение в соответствии с ГОСТ 11262-2017. Измерения характеристик проводились при комнатной температуре с использованием испытательной машины AGS-X10kN (Shimadzu, Япония).

Ударную вязкость полимеров оценивали по Изоду на маятниковом копре GT-7045-HMH (Gotech Testing Machines, Тайвань) без надреза (концентратора напряжений) на образцах. Энергия удара составляла 1 Дж, скорость падения маятника – 3,46 м/с.

Таблица 1

Образцы ПЭТ

№	Описание	Внешний вид
Образец № 1	Отходы переработки вторичного ПЭТФ первой категории – партия 1	
Образец № 2	Отходы переработки вторичного ПЭТФ второй категории – партия 1	
Образец № 3	Отходы получения ПЭТФ второй категории – партия 2	
Образец № 4	Отходы получения ПЭТФ второй категории – партия 3	
Образец № 5	Отходы получения ПЭТФ первой категории – партия 2	
Образец № 6	Отходы получения ПЭТФ второй категории – партия 4	
Образец № 7	Отходы получения ПЭТФ первой категории из другой партии – партия 3	
Образец № 8	Отходы получения ПЭТФ первой категории – партия 4	
Образец № 9	Гранулы ПЭТФ марки Вивилен, представляющие собой смесь 25% вторичного сырья и 75% первичного ПЭТФ	
Образец № 10	Гранулы первичного ПЭТФ производства	

Деформационная теплостойкость определялась на приборе HV-3000-P3 (Gotech Testing Machines, Тайвань) в соответствии с ГОСТ 32657-2014 при скорости нагрева 120 °С/ч.

Термогравиметрический анализ проводился на приборе TGA (NETZSCH-Geraetebau GmbH, Германия) в инертной среде, скорость нагрева 5 °C/мин, температурный диапазон 25–1 000 °C.

Для изучения фазовых переходов и термических эффектов плавления использовали дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК) DSC-1 (NETZSCH-Geraetebau GmbH, Германия). Анализ проводился в инертной атмосфере азота при скорости нагрева и охлаждения 10 °C/мин в температурном интервале от – 40 до 200 °C.

Водопоглощение определялось согласно ГОСТ 4650-2014. Сущность метода: испытуемые образцы погружают в дистиллированную воду при температуре (23 ± 2) °C на 24 ч. Массу воды, поглощенную каждым испытуемым образцом, вычисляли по разности между массой образца до и после испытания, выраженной в процентах по отношению к начальной массе.

Результаты и обсуждение

Анализ эндотермических кривых дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) показывает, что температуры плавления всех исследуемых полимерных материалов находятся в диапазоне 236,1–259,3 °C, характерном для полиэтилентерефталата (рис. 1). Смещение температурных максимумов относительно первичного гранулированного полиэтилентерефталата, полученного при соблюдении технологического режима, свидетельствует о наличии посторонних компонентов в структуре полимерных материалов. О наличии возможных примесей или структурных неоднородностей также свидетельствуют отличия значений энтальпии плавления от показателя первичного ПЭТ (72,47 Дж/г), при этом величины варьируются в интервале 40,85–87,13 Дж/г.

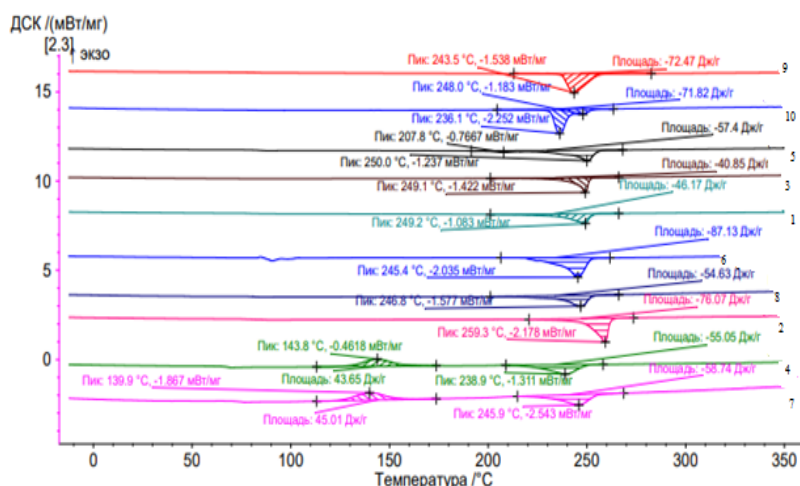


Рис. 1. ДСК кривые. Номера образцов проставлены справа от кривых.

По данным термогравиметрического анализа установлено, что все исследуемые образцы полиэтилентерефталата характеризуются высокой термической стабильностью в области температур до 380–400 °C, в которой существенной потери массы не наблюдается. Незначительные изменения массы в низкотемпературной области могут быть связаны с удалением адсорбированных или летучих компонентов (рис. 2 и 3).

Основной этап термического разложения ПЭТ протекает в интервале 440–460 °C и сопровождается резким снижением массы образцов, что соответствует деструкции полимерной цепи. По кривым ДТГ (рис. 3) данный процесс проявляется одним выраженным пиком, что указывает на одностадийный механизм термического разложения, характерный для полиэтилентерефталата.

Положение максимума скорости разложения, определяемого по минимуму ДТГ-кривых, для всех образцов практически совпадает, что свидетельствует о сходной химической природе и механизме термодеструкции исследуемых материалов. Незначительные различия в глубине и форме пиков ДТГ кривых, а также в величине остаточной массы при высоких температурах, могут быть обусловлены различиями в степени кристалличности и наличием примесных компонентов.

После завершения основного этапа разложения, в диапазоне температур выше 500 °C наблюдается формирование остатка, величина которого постепенно уменьшается при дальнейшем нагреве, что соответствует вторичным процессам деструкции и выгоранию углеродсодержащего остатка.

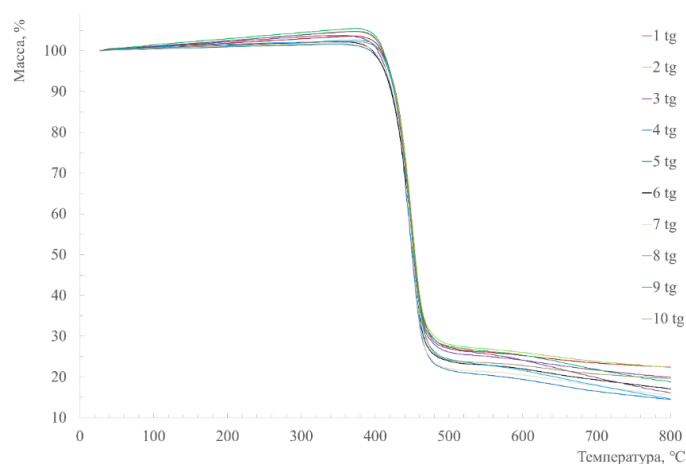


Рис. 2. Термогравиметрическая кривая (ТГ).

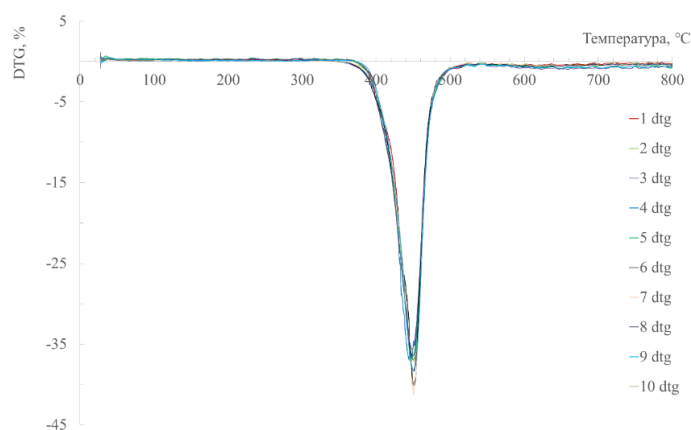


Рис. 3. Дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТГ).

С целью выявления температурных пределов эксплуатации материалов из образцов, было проведено определение деформационной теплостойкости. Экспериментальные данные представлены в *табл. 2*.

Таблица 2

Деформационная теплостойкость полимерных материалов

Образец	Деформационная теплостойкость, °C
1	68,4
2	66,3
3	66,2
4	61,8
5	65,6
6	63,5
7	62,2
8	66,4
9	65,8
10	68,5

Показатели деформационной теплостойкости у всех образцов близки, что позволяет использовать данные материалы при температурах не выше 62 °C, при превышении этого порога полимер теряет жесткость и начинает размягчаться.

Для оценки возможности практического применения исследуемых пластов, наряду с анализом термомеханических характеристик, были определены физико-механические показатели при воздействии статических и динамических нагрузок, а также изучено влияние влаги с целью моделирования реальных условий эксплуатации изделий.

Ударная вязкость характеризует способность материала поглощать энергию при динамических напряжениях. Образцы, полученные методом литья под давлением, демонстрируют значительный разброс величин (*табл. 3*). При этом, за исключением первичного ПЭТ и плава №5, остальные плавы характеризуются пониженными значениями ударной вязкости, что необходимо учитывать при выборе областей применения изделий.

Таблица 3

Результаты испытаний на ударную вязкость по Изоду

Образец	Ударная вязкость по Изоду, Дж/м ²
1	28612,59
2	12388,28
3	10245,23
4	926,85
5	45252,83
6	2666,4
7	2851,27
8	21367,97
9	21431,72
10	46345,12

Известно, что ПЭТ-материалы обладают очень низким водопоглощением. Благодаря этому ПЭТ сохраняет свои механические свойства и размеры в условиях повышенной влажности, что делает его материалом с высокой стабильностью и надежностью.

Как показало проведенное исследование, действительно, водопоглощение у всех образцов находится в диапазоне 0,18–0,47%. Наибольшую склонность к набуханию проявил образец 3 (0,47%), минимальную – первичный ПЭТ (0,18%) (табл. 4).

В виду небольших значений поглощенной влаги значения физико-механических показателей принципиально не изменяются.

Таблица 4

Результаты физико-механических испытаний на разрыв

Образец	Прочность при разрыве, МПа	Прочность при разрыве после водопоглощения, МПа	Водопоглощение, %
1	49,87	46,36	0,29
2	49,94	49,81	0,24
3	49,31	44,52	0,47
4	28,25	22,50	0,20
5	50,05	46,33	0,30
6	13,9	10,34	0,27
7	33,99	24,18	0,38
8	32,48	32,22	0,25
9	41,47	44,75	0,25
10	50,47	48,19	0,18

Заключение

Таким образом, по совокупности проведенных физико-механических испытаний, можно утверждать, что первичный ПЭТ (образец 10), смесь первичного и вторичного ПЭТ (образец 9), отходы первой категории (образцы 1, 5 и 8), а также отходы второй категории (образец 2) обладают наилучшим комплексом физико-механических свойств и могут рассматриваться как сырье для изготовления более ответственных изделий. Их характеристики позволяют использовать материал для получения волокон, близких по качеству к предписанным требованиям, а также в производстве полимерной тары и ПЭТ-бутылок, за исключением случаев, где требуется исключительно первичное сырье (пищевая, фармацевтическая упаковка).

Образцы отходов второй категории (3, 4, 6), а также образец отходов первой категории (7) показали низкую прочность, хрупкое разрушение и низкую ударную вязкость, что исключает их использование в нагруженных конструкциях. Однако они могут применяться в производстве продукции, где требования к механической прочности минимальны, например как сырье для тротуарных плит.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FRRR-2026-0007).

Работа выполнена при поддержке Евразийского научно-образовательного центра мирового уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рынку ПЭТ предсказали рост, но со сложностями // Полимерные материалы. 2025. №5(312). С. 46–51. [PET market is predicted to grow, but with difficulties // Polymer Materials. Products, Equipment, Technology. 2025. No. 5(312). P. 46–51 [webpage]]. URL: <https://polymer-branch.com/articles/rynku-pet-predskazali-rost-no-so-slozhnostyami>.
2. Demir T., Tincer T. Preparation and characterization of poly(ethylene terephthalate) powder-filled high-density polyethylene in the presence of silane coupling agents // Journal of Applied Polymer Science. 2001. Vol. 79. No. 5. P. 827–835. DOI: 10.1002/1097-4628(20010131)79:5<827.

3. Панфилов Д. А. Химический рециклинг полиэтилентерефталата как метод получения эффективных модификаторов полимерных материалов // Пластические массы. 2021. №7–8. С. 25–30. [Panfilov D. A. Chemical recycling of polyethyleneterephthalate as a method for obtaining effective modifiers of polymer materials // Plasticheskie Massy. 2021. No. 7–8. P. 25–30].
4. Frontiers in the science and technology of polymer recycling / ed. by G. Akozali. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. Vol. 351.
5. Traugott T. D., Barlow J. W., Paul D. R. Mechanical compatibilization of high density polyethylene–poly(ethylene terephthalate) blends // Journal of Applied Polymer Science. 1983. Vol. 28. No. 9. P. 2947–2959.
6. Boutevin B., Lusinchi J. M., Pietrasanta Y., Robin J. J. Improving poly(ethylene terephthalate)/high-density polyethylene blends by using graft copolymers // Polymer Engineering & Science. 1996. Vol. 36. No. 6. P. 879–884.
7. Cheung M. K., Chan D. Mechanical and rheological properties of poly(ethylene terephthalate)/polypropylene blends // Polymer International. 1997. Vol. 43. No. 3. P. 281–287.
8. Xanthos M., Young M. W., Biesenberger J. A. Polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends compatibilized through functionalization // Polymer Engineering & Science. 1990. Vol. 30. No. 6. P. 355–365.

Поступила в редакцию 06.02.2026 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.2.5

**STUDY OF THE PHYSICOMECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) MELTS****© V. V. Chernova, A. A. Psyanchin*, E. M. Zakharova,
A. S. Shurshina, V. P. Zakharov***Ufa University of Science and Technology,
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.***Email: artps96@yandex.ru*

The paper presents the results of a study on the physicomachanical and thermophysical properties of poly(ethylene terephthalate) (PET) melts. The samples were obtained by grinding the melts followed by injection molding. The material characteristics were determined using differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis, as well as physicomachanical tests including tensile testing, impact strength, and water absorption measurements.

Keywords: poly(ethylene terephthalate), physicomachanical properties, secondary recycling, polymers, plastics.

*Received 06.02.2026.***Об авторах/ About the authors****ЧЕРНОВА Валентина Витальевна**

К.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений
и общей химической технологии.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: my_life82@mail.ru

CHERNOVA Valentina Vitalyevna

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
of the Department of High-Molecular Compounds
and General Chemical Technology.
Ufa University of Science and Technology.
Email: my_life82@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3443-8911.

ПСЯНЧИН Артур Альбертович

К.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений
и общей химической технологии.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: artps96@yandex.ru

PSYANCHIN Artur Albertovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of High-Molecular Compounds
and General Chemical Technology.
Ufa University of Science and Technology
Email: artps96@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-9420-9125.

ЗАХАРОВА Елена Михайловна

К.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений
и общей химической технологии.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: lena991999@mail.ru

ZAKHAROVA Elena Mikhailovna

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
of the Department of High-Molecular Compounds
and General Chemical Technology.
Ufa University of Science and Technology.
Email: lena991999@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1208-9316.

ШУРШИНА Анжела Саматовна

К.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений
и общей химической технологии.
Уфимский университет науки и технологий.
Email: anzhela_murzagil@mail.ru

SHURSHINA Anzhela Samatovna

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
of the Department of High-Molecular Compounds
and General Chemical Technology.
Ufa University of Science and Technology.
Email: anzhela_murzagil@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6737-7265.

ЗАХАРОВ Вадим Петрович

д.х.н., профессор, член-корреспондент АН РБ,
Ректор
Уфимский университет науки и технологий.
Email: rector@uust.ru

ZAKHAROV Vadim Petrovich

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the Academy of Sciences
of the Republic of Bashkortostan, Rector.
Ufa University of Science and Technology.
Email: rector@uust.ru
ORCID: 0000-0002-5997-1886.