ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

ПОДГОТОВКА ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПОЛИСТИРОЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СТРУКТУРНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

УДК: [указать]
Дата поступления: [заполняется редакцией]
Дата доработки: [заполняется редакцией]
Дата принятия к публикации: [заполняется редакцией]

Азиз Ибрагимов
Сомостаятелная соискатель, кафедра Химии, Навоийский государственный университет
г. Навои, Республика Узбекистан
Наргиза Шоназарова
Сомостаятелная соискатель, кафедра Химии, Навоийский государственный университет
г. Навои, Республика Узбекистан
Феруз Садуллоевич Тухтаев
Профессор кафедры химии, доктор химических наук (DSc)
Навоийский государственный университет
г. Навои, Республика Узбекистан
ORCID: 0009-0004-5105-8437

Аннотация: В статье представлены результаты подготовки вторичного сырья из отходов вспененного полистирола (EPS) и сравнительного исследования его структурных и термических характеристик. Отходы сортировали, очищали, измельчали и перерабатывали методом растворения в этилацетате с последующим осаждением этиловым спиртом. Для оценки сохранности структуры и свойств исходный образец PS-0 и повторно полученный полистирол PS-2 исследовали методами ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR), дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) и термогравиметрического анализа (TGA). Из 10,0 г сухого EPS получали 9,3–9,5 г сухого полистирола; выход продукта составлял 93–95 %. В спектрах обоих образцов выявлены характерные полосы ароматических и алифатических связей C–H, колебаний ароматического кольца C=C и внеплоскостной деформации связей ароматического C–H. Температура стеклования составила 100,4 °C для PS-0 и 101,2 °C для PS-2. Температуры потери 5 и 10 % массы и максимальной скорости разложения у PS-2 были выше, чем у PS-0. Совокупность результатов свидетельствует о сохранении основных структурных признаков полистирола и близких термических характеристик после растворительно-осадительной переработки. Полученный материал может рассматриваться как вторичное сырьё для дальнейшего получения полимерных композиций.

Ключевые слова: отходы полистирола, вспененный полистирол, вторичное сырьё, растворительно-осадительная переработка, FTIR, термические свойства.

INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY AND ACADEMIC RESEARCH

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

PREPARATION OF SECONDARY RAW MATERIAL FOR POLYMER COMPOSITIONS BASED ON POLYSTYRENE WASTE AND INVESTIGATION OF ITS STRUCTURAL AND THERMAL PROPERTIES

Aziz Ibragimov
Independent Researcher, Department of Chemistry, Navoi State University
Navoi, Republic of Uzbekistan
Nargiza Shonazarova
Independent Researcher, Department of Chemistry, Navoi State University
Navoi, Republic of Uzbekistan
Feruz Tukhtaev
Professor, Department of Chemistry; Doctor of Chemical Sciences (DSc)
Navoi State University
Navoi, Republic of Uzbekistan
ORCID: 0009-0004-5105-8437
doi:https://doi.org/10.5281/zenodo.23163233

Abstract: This article reports the preparation of secondary raw material from expanded polystyrene (EPS) waste and a comparative assessment of its structural and thermal characteristics. The waste was sorted, cleaned, shredded, and processed by dissolution in ethyl acetate followed by precipitation with ethanol. The original PS-0 sample and the recovered polystyrene PS-2 were examined using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), and thermogravimetric analysis (TGA). Processing 10.0 g of dry EPS yielded 9.3–9.5 g of dry polystyrene, corresponding to a product yield of 93–95%. Both samples showed characteristic absorption bands associated with aromatic and aliphatic C–H bonds, aromatic-ring C=C vibrations, and out-of-plane deformation of aromatic C–H bonds. The glass-transition temperatures were 100.4 °C for PS-0 and 101.2 °C for PS-2. The temperatures corresponding to 5% and 10% mass loss and the maximum decomposition rate were higher for PS-2 than for PS-0. Taken together, the results indicate that the principal structural features of polystyrene and similar thermal characteristics were retained after dissolution–precipitation processing. The recovered material can therefore be considered as a secondary feedstock for further development of polymer compositions.

Keywords: polystyrene waste, expanded polystyrene, secondary raw material, dissolution–precipitation, FTIR, thermal properties.

I. Введение

По мере роста производства и потребления полимерных материалов переработка полимерных отходов и их использование в качестве вторичного сырья становятся важной научной и практической задачей [1–3]. Полистирол широко применяется в упаковке, теплоизоляции и других областях. Низкая плотность и большой объём его вспененной разновидности — EPS — усложняют сбор, транспортировку и переработку отходов [4, 5, 12]. Поэтому особое значение приобретают методы переработки EPS с сохранением полимерной цепи.

При переработке с применением растворителя пористая структура EPS разрушается, полимер переходит в раствор, а фильтрование и осаждение позволяют отделить часть посторонних компонентов [6, 7]. В частности, растворение в этилацетате с последующим осаждением этиловым спиртом исследовалось как способ получения вторичного

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

полистирола [7]. Однако возможность применения восстановленного материала в составе полимерной композиции нельзя оценить только по степени его извлечения. Окисление в процессе эксплуатации, а также воздействия при повторной подготовке могут отражаться на структуре и термических свойствах полимера [9–11].

В этой связи сопоставление исходного и повторно подготовленного полистирола методом FTIR позволяет оценить сохранность характерных функциональных групп, тогда как DSC и TGA применяются для определения температуры стеклования и показателей термического разложения [6, 7]. В исследованиях полимерных композиций показано влияние состава компонентов и наполнителей на свойства материала [13–15]. Исходя из этого подхода, в настоящей работе пригодность вторичного полистирола, полученного из отходов EPS, в качестве исходного сырья для композиций оценивается посредством сравнительного исследования его структурных и термических свойств.

II. Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали белый EPS, выделенный из бытовых и упаковочных отходов. Из образцов удаляли бумагу, остатки клея и другие механические примеси, после чего EPS измельчали до частиц размером 20–30 мм. Материал дважды промывали дистиллированной водой при температуре 40 ± 2 °C в течение 15 мин и сушили при 60 ± 2 °C в течение 6 ч.

Для получения вторичного полистирола применяли метод растворения–осаждения. Навеску 10,0 г высушенного EPS растворяли в 100 мл этилацетата при температуре 25 ± 2 °C и скорости перемешивания 500 об/мин в течение 30 мин. Раствор фильтровали для удаления нерастворимых примесей. К фильтрату при перемешивании со скоростью 300 об/мин постепенно добавляли 300 мл 96%-ного этилового спирта. Образовавшийся осадок полистирола отделяли вакуум-фильтрованием, дважды промывали 50 мл этилового спирта и сушили в вакууме при 50 ± 2 °C в течение 8 ч. Исходный EPS обозначали PS-0, повторно подготовленный полистирол — PS-2.

Для сравнительной оценки молекулярной структуры образцов анализировали FTIR-спектры в диапазоне 4000–400 $см^{-1}$. Особое внимание уделяли полосам поглощения связей ароматического и алифатического C–H, колебаниям ароматического кольца и области карбонильных групп. Для определения термических свойств DSC-анализ проводили в атмосфере азота в диапазоне 25–200 °C, а TGA-анализ — в диапазоне 30–600 °C; скорость нагрева в обоих случаях составляла 10 °C/мин. В качестве критериев сравнения использовали температуру стеклования, температуры, соответствующие потере 5 и 10 % массы, а также температуру максимальной скорости разложения.

III. Результаты

Результаты повторной подготовки отходов EPS методом растворения–осаждения оценивали по выходу продукта, молекулярной структуре и термическим свойствам. Для переработки использовали 10,0 г сухого полистирольного материала. По завершении процесса получали 9,3–9,5 г сухого вторичного полистирола (PS). Выход продукта, рассчитанный относительно исходной массы сухого EPS, составлял 93–95 %.

FTIR-спектры образцов PS-0 и PS-2 характеризуются полосами, типичными для полистирола: 3080–3025 $см^{-1}$ — ароматические связи C–H; 2920 и 2850 $см^{-1}$ — алифатические связи C–H; 1600 и 1492 $см^{-1}$ — колебания C=C ароматического кольца; 760 и 700 $см^{-1}$ — полосы, характерные для монозамещённого бензольного кольца. Положение полос в спектрах PS-0 и PS-2 использовали для оценки сохранения или изменения основной структуры полимера после повторной подготовки.

Полосы поглощения в области 3080–3025 $см^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

связей C–H ароматического кольца, а полосы при 2920 и 2850 см⁻¹ — алифатическим связям C–H. В областях 1600 и 1492 см⁻¹ проявляются скелетные колебания ароматического кольца, тогда как полосы при 760 и 700 см⁻¹ связаны с внеплоскостными деформационными колебаниями связей C–H в монозамещённом бензольном кольце. Сохранение этих характерных полос в образцах PS-0 и PS-2 соответствует основной химической структуре полистирола.

Температуру стеклования образцов определяли по DSC-термограммам; результаты представлены на рисунке 1.

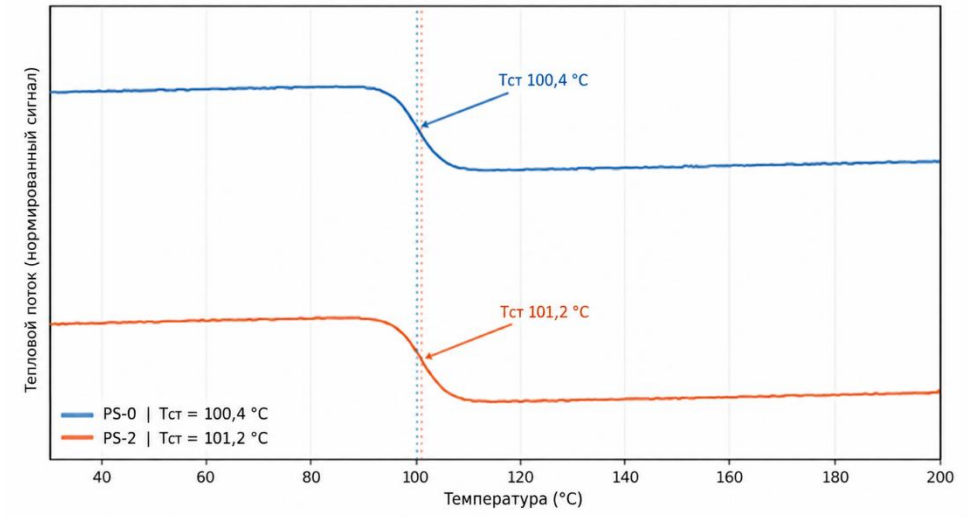
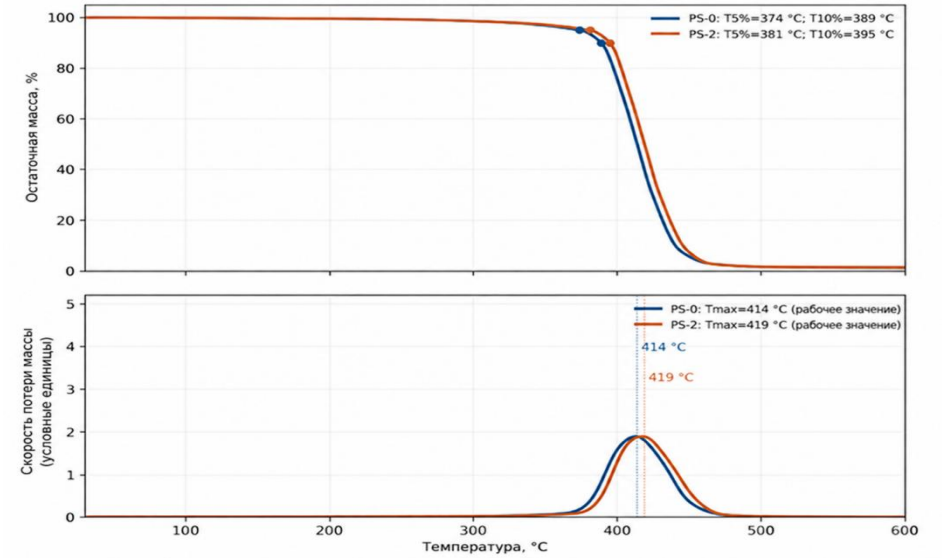


Рисунок 1. DSC-термограммы образцов PS-0 и PS-2

Термическую стабильность оценивали по кривым TGA и DTG. Определяли температуры, соответствующие потере 5 и 10 % массы, а также температуру максимальной скорости разложения. Различия этих показателей между PS-0 и PS-2 служат основанием для оценки влияния повторной подготовки на термические свойства. Поскольку значения TGA в разных исследованиях зависят от атмосферы и скорости нагрева, в таблицу 1 включены результаты, полученные для обоих образцов в одинаковых условиях.



ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Рисунок 2. Кривые TGA и DTG образцов PS-0 и PS-2

В исследовании переработки отходов EPS, растворённых в этилацетате и осаждённых этиловым спиртом, температура стеклования повторно полученного полистирола составляла приблизительно 101 °C [7]. Сопоставление этого значения с результатом для образца PS-2, полученным в настоящем исследовании, показывает близость показателей исходного и повторно подготовленного полистирола. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Термические свойства образцов PS-0 и PS-2

Образец	Температура стеклования, °C	Температура потери 5 % массы, °C	Температура потери 10 % массы, °C	Температура максимальной скорости разложения, °C
PS-0	100,4	374	389	414
PS-2	101,2	381	395	419

IV. Обсуждение

Результаты повторной подготовки отходов полистирола методом растворения–осаждения оценивали по выходу продукта, химической структуре и термическим свойствам. Эти показатели характеризуют как эффективность извлечения полимера, так и степень сохранения его основных свойств после переработки.

Из 10,0 г сухого образца EPS получено 9,3–9,5 г вторичного полистирола. Расчётный выход продукта составлял 93–95 %. Это свидетельствует о том, что при растворении–осаждении удалось повторно извлечь большую часть исходного полимера. Потеря оставшейся массы может быть связана с неполным осаждением полистирола из раствора, его удерживанием фильтром, потерями на стадии промывки или остатками на поверхностях лабораторной посуды и фильтрационного оборудования. Поскольку точное значение выхода зависит от масс сухого исходного образца и конечного продукта, при расчёте важно полностью завершить сушку и минимизировать влияние влаги во время взвешивания.

В FTIR-спектре образца PS-0 наблюдались полосы поглощения в областях 3080–3025 $см^{-1}$, соответствующие ароматическим связям C–H; 2920 и 2850 $см^{-1}$ — алифатическим связям C–H; 1600 и 1492 $см^{-1}$ — скелетным колебаниям C=C ароматического кольца; около 1450 $см^{-1}$ — деформационным колебаниям C–H; 760 и 700 $см^{-1}$ — внеплоскостной деформации связей C–H бензольного кольца. Эти характерные полосы сохранялись и в образце PS-2. Результат указывает на сохранение свойственных полистиролу ароматического кольца и основного углеводородного скелета в процессе повторной подготовки. Отсутствие новых интенсивных полос функциональных групп согласуется с отсутствием заметных изменений химического каркаса полимера.

Сохранение полос в FTIR-спектрах позволяет качественно оценить структурную стабильность, однако само по себе не доказывает неизменность степени окисления или молекулярной массы. Для более подробной оценки окисления необходимо количественно проанализировать поглощение в карбонильной области 1800–1650 $см^{-1}$, рассчитать карбонильный индекс и сопоставить спектры PS-0 и PS-2 при одинаковых условиях коррекции базовой линии и нормирования. Такой анализ позволит точнее установить, образовались ли в полимерных цепях окисленные группы в процессе переработки.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

По данным DSC, температура стеклования PS-0 составляла 100,4 °C, а PS-2 — 101,2 °C. Разница между значениями равна 0,8 °C, что указывает на близость термических характеристик исходного и повторно подготовленного полистирола в области стеклования. Небольшой сдвиг у PS-2 согласуется с отсутствием резкого изменения сегментальной подвижности полимерных цепей после растворения–осаждения. Вместе с тем на температуру стеклования могут влиять остаточный растворитель или другие низкомолекулярные компоненты образца. Поэтому при интерпретации результатов DSC следует учитывать режим сушки, массу образца, скорость нагрева и способ определения T_g по термограмме. Отсутствие выраженных пиков кристаллизации или плавления соответствует преимущественно аморфной структуре полистирола.

Согласно результатам TGA, для PS-0 температура потери 5 % массы составляла 374 °C, температура потери 10 % массы — 389 °C, а температура максимальной скорости разложения — 414 °C. Для PS-2 соответствующие значения составляли 381, 395 и 419 °C. Таким образом, у повторно подготовленного образца показатели T_5% и T_{10}% были выше на 7 и 6 °C соответственно, а T_{max} — на 5 °C. Этот сдвиг показывает, что потеря массы и основное разложение PS-2 протекали при несколько более высоких температурах.

Более высокие показатели термического разложения PS-2 могут быть связаны с удалением части летучих, низкомолекулярных или посторонних компонентов на стадиях растворения, фильтрования и осаждения. Снижение содержания таких компонентов потенциально влияет на начальную потерю массы образца. Для проверки этого объяснения необходим дополнительный анализ состава образцов и повторение TGA-измерений при одинаковых атмосфере и скорости нагрева. Близость температур основного разложения PS-0 и PS-2 показывает, что повторная подготовка не изменила принципиально общий характер термического разложения полистирола.

Совокупный анализ FTIR, DSC и TGA показывает, что в образце PS-2, полученном методом растворения–осаждения, сохранились основные химические структурные признаки полистирола и близкие термические характеристики; при этом отдельные термические показатели сместились в сторону более высоких температур. Эти результаты обосновывают дальнейшую проверку вторичного полистирола в качестве исходного сырья для полимерных композиций. Для оценки его практической пригодности необходимо на следующем этапе смешать его с полимерными компонентами и наполнителями, подобрать оптимальный состав и определить механические, реологические и термические свойства композиции.

V. Заключение

Вторичное полимерное сырьё получено из отходов EPS методом растворения–осаждения. Из 10,0 г сухого образца EPS выделено 9,3–9,5 г полистирола; выход продукта составил 93–95 %.

FTIR-анализ показал, что в образце PS-2 сохранились характерные полосы поглощения, соответствующие ароматическим и алифатическим связям C–H и колебаниям C=C ароматического кольца. Это свидетельствует о сохранении основной химической структуры полимера после повторной подготовки.

Температуры стеклования образцов PS-0 и PS-2 составили соответственно 100,4 и 101,2 °C. По данным TGA температуры потери 5 и 10 % массы, а также температура максимальной скорости разложения у PS-2 были выше, чем у PS-0. Следовательно, после повторной подготовки основные структурные и термические свойства полистирола сохранились, а отдельные термические показатели повысились.

Полученные результаты показывают возможность применения вторичного

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

полистирола в качестве сырья для получения полимерных композиций. Определение состава и свойств композиционных материалов является задачей дальнейших исследований.

Список литературы

1. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. 2017; 3(7): e1700782.
2. Vollmer I., Jenks M.J.F., Roelands M.C.P., White R.J., van Harmelen T., de Wild P., van der Laan G.P., Meirer F., Keurentjes J.T.F., Weckhuysen B.M. Beyond mechanical recycling: giving new life to plastic waste. Angewandte Chemie International Edition. 2020; 59(36): 15402–15423. DOI: 10.1002/anie.201915651.
3. Schyns Z.O.G., Shaver M.P. Mechanical recycling of packaging plastics: a review. Macromolecular Rapid Communications. 2021; 42(3): 2000415.
4. Maharana T., Negi Y.S., Mohanty B. Recycling of polystyrene. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2007; 46(7): 729–736.
5. Uttaravalli A.N., Dinda S., Gidla B.R. Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer waste expanded polystyrene: a review. Process Safety and Environmental Protection. 2020; 137: 140–148.
6. Cella R.F., Mumbach G.D., Andrade K.L., Oliveira P., Marangoni C., Bolzan A., Bernard S., Machado R.A.F. Polystyrene recycling processes by dissolution in ethyl acetate. Journal of Applied Polymer Science. 2018; 135(18): 46208. DOI: 10.1002/app.46208.
7. Cunha R.S., Mumbach G.D., Machado R.A.F., Bolzan A. A comprehensive investigation of waste expanded polystyrene recycling by dissolution technique combined with nanoprecipitation. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2021; 16: 100470.
8. Rahimi A., García J.M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. Nature Reviews Chemistry. 2017; 1: 0046.
9. Yousif E., Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. SpringerPlus. 2013; 2: 398.
10. Coates G.W., Getzler Y.D.Y.L. Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy. Nature Reviews Materials. 2020; 5: 501–516.
11. Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste: a review. Waste Management. 2009; 29(10): 2625–2643.
12. Xu Z., Sun D., Xu J., Yang R., Russell J.D., Liu G. Progress and challenges in polystyrene recycling and upcycling. ChemSusChem. 2024; 17(17): e202400474.
13. To‘xtayev F.S., Hikmatov A., Shonazarova N., Djalilova I. To‘ldiruvchili sorbentning (PANI–PKA) fizik-kimyoviy xususiyatlari [Физико-химические свойства наполненного сорбента (PANI–PKA)]. International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. 2021; 2(1): 39–41. DOI: 10.24412/2181-144X-2021-1-39-41.
14. Tukhtaev F.S., Karimova D.A., Kamalova D.I. Research of kinetic sorption of Pb^{2+} ions in $Pb(NO_3)_2$ solution by composite polymeric sorbents under various conditions. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2020; 7(6): 14036–14043.
15. Tukhtaev F.S., Karimova D.A., Malikova A., Kamalova D.I. Research of kinetic sorption of Cu^{2+} ions in $CuSO_4$ solution by composite polymeric sorbents under various conditions. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020; 12(Special Issue 6): 505–511. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP6/SP20201058.