

УЛУЧШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПВХ КОМПЛЕКСОМ ЭКОЛОГИЧНЫХ ДОБАВОК

П.А. Кручинина[✉], И.Н. Вихарева

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

[✉] asp2025kpa6@susu.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние количества дифеноксиэтиладипината (ДФЭА) на термические характеристики пластифицированного поливинилхлорида (ПВХ), модифицированного микроструктурированным фосфатом титана с морфологией микросфер в качестве термостабилизатора. Выбор морфологии фосфата титана основан на оптимальных структурных характеристиках, элементному соотношению $Ti:P = 0,86$ и эффективному диспергированию в полимерной матрице. Серия ПВХ-композиций с различным количеством ДФЭА исследована методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в окислительной атмосфере. Установлено, что образец с соотношением $ДФ/ДФЭА = 5/3$ продемонстрировал наилучшие показатели термостабильности: температура начала термодеструкции – $173\text{ }^{\circ}\text{C}$, минимальная потеря массы при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,52\text{ }\%$ и повышенный коксовый остаток при $581\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $5,16\text{ }\%$. Присутствие ароматических фрагментов в молекуле ДФЭА способствует повышению термостабильности за счет формирования более стабильной полимерной системы. Результаты показывают перспективность использования смешанных пластификаторов в сочетании с микроструктурированным фосфатом титана для создания экологически безопасных ПВХ-композиций с улучшенными термическими характеристиками.

Ключевые слова: поливинилхлорид, пластификатор, фосфат титана, иерархическая структура, экологичность, термостабильность, адипинат, стабилизатор

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (распоряжение Правительства Российской Федерации FENU-2024-0005).

Для цитирования: Кручинина П.А., Вихарева И.Н. Улучшение термических характеристик пластифицированного ПВХ комплексом экологичных добавок // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 3. С. 170–176. DOI: 10.14529/chem260307

Original article
DOI: 10.14529/chem260307

IMPROVING THE THERMAL PERFORMANCE OF PLASTICIZED PVC WITH A SET OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ADDITIVES

P.A. Kruchinina[✉], I.N. Vikhareva

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] asp2025kpa6@susu.ru

Abstract. This study investigates the effect of the amount of diphenoxyethyl adipate (DPEA) on the thermal characteristics of plasticized polyvinyl chloride (PVC) modified with microstructured titanium phosphate having a microsphere morphology as a heat stabilizer. The choice of morphology is based on optimal structural characteristics, an elemental ratio of $Ti:P = 0.86$, and effective dispersion within the polymer matrix. A series of PVC compositions with varying amounts of DPEA were studied using thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) in an oxidizing atmosphere. It was found that the sample with a $DOP/DPEA$ ratio of $5/3$ demonstrated the best thermal stability indicators: an initial thermal degradation temperature of 173°C , a minimum mass loss of 0.52% at 200°C , and an increased char residue of 5.16% at 581°C . The presence of aromatic fragments in the DPEA molecule contri-

butes to enhanced thermal stability by forming a more stable polymer system. The results demonstrate the potential of using mixed plasticizers in combination with microstructured titanium phosphates to create environmentally friendly PVC compositions with improved thermal characteristics.

Keywords: polyvinyl chloride, plasticizer, titanium phosphate, hierarchical structure, eco-friendliness, heat stability, adipate, stabilizer

Acknowledgments: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government order FENU-2024-0005).

For citation: Kruchinina P.A., Vikhareva I.N. Improving the thermal performance of plasticized PVC with a set of environmentally friendly additives. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(3):170–176. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260307

Введение

Поливинилхлорид (ПВХ) является одним из наиболее широко используемых термопластов благодаря своей универсальности, долговечности и экономической эффективности. Однако его практическое применение часто ограничивается относительно низкой термической стабильностью, особенно в пластифицированных композициях. Процесс дегидрохлорирования при повышенных температурах приводит к деструкции полимерной цепи, ухудшению механических свойств и изменению цвета материала [1, 2]. Традиционно для повышения термостабильности используются свинецсодержащие стабилизаторы, однако их токсичность диктует необходимость поиска экологически безопасных альтернатив, соответствующих принципам «зеленой» химии [3, 4].

Значительные усилия исследователей направлены на создание эффективных и нетоксичных термостабилизаторов. Среди перспективных направлений выделяется использование неорганических соединений, способных связывать выделяющийся хлороводород и замедлять процесс деструкции. В частности, фосфаты металлов и слоистые двойные гидроксиды демонстрируют высокую эффективность благодаря своей способности к ионному обмену и формированию барьерных слоев [4–6]. Фосфаты титана с иерархической структурой вызывают особый интерес, так как их морфология (микросферы, стержни) может существенно влиять на диспергирование в полимерной матрице и, как следствие, на стабилизирующий эффект [7, 8]. Исследования показывают, что упорядоченные структуры, такие как микросферы, могут обеспечивать более эффективное ингибирование дегидрохлорирования по сравнению с аморфными аналогами за счет барьерного механизма и взаимодействия с продуктами разложения [9].

Важным направлением в модификации ПВХ является не только подбор эффективных стабилизаторов, но и оптимизация состава пластифицирующей системы [10–12]. В качестве эталонного пластификатора часто выступает диоктилфталат, однако его возможности по улучшению термических характеристик ограничены [13]. Кроме того, растущие экологические требования стимулируют поиск био-основанных и менее токсичных альтернатив [13–15]. Перспективным подходом является использование смешанных пластификаторов, где классический эфир фталевой кислоты частично замещается более термостабильными соединениями, что позволяет достичь синергетического эффекта [13–15]. Например, введение пластификаторов с ароматическими фрагментами может повышать жесткость и термостабильность полимерной системы [16–18].

В данной работе исследован комплексный подход, сочетающий применение микроструктурированного фосфата титана (TiPMS2) в качестве стабилизатора и смешанного пластификатора на основе ДОФ и синтезированного дифеноксипиридина. Выбор ДФЭА обусловлен наличием в его структуре ароматических колец, которые, как предполагается, способны повышать термостабильность композиции за счет образования более стабильной системы, а также потенциалом таких эфиров как экологичных пластификаторов [15, 19, 20].

Целью настоящей работы являлось изучение влияния состава смешанного пластификатора ДОФ/ДФЭА на термические характеристики пластифицированного ПВХ, модифицированного фосфатом титана. Для определения состава с наилучшими свойствами были приготовлены и исследованы образцы с различным соотношением ДФЭА и ДОФ. Оценка термического поведения модифицированных ПВХ-композиций проводилась методами комплексного термического анализа ТГА и ДСК в окислительной среде.

Экспериментальная часть

Материалы и методы

Материалы

В качестве матрицы использовались промышленные образцы суспензионного поливинилхлорида марка С-7059М, предоставленные АО «БСК, Каустик» (Стерлитамак, Россия). В качестве пластификатора применялся диоктилфталат (ДОФ) производства АО «Камтекс-Химпром» (Пермь, Россия). Основные характеристики ДОФ: кислотное число (мг КОН/г) $\leq 0,07$, число омыления (мг КОН/г) ≤ 289 , массовая доля летучих веществ (%), не более 0,1, температура вспышки ($^{\circ}\text{C}$) ≥ 205 . Стабилизатор трехосновной сульфат свинца (ТОСС) произведен компанией Baerlocher GmbH (Ингольштадт, Германия). Внешний вид – порошок, содержание свинца (%) – 89 ± 2 , pH – 7,0–7,5, зольность (%) – не менее 95. Стабилизатор стеарат кальция (CaSt) произведен компанией «ХИМСТАБ» (Мытищи, Россия). Основные характеристики: кислотное число (мг КОН/г) – не более 2, содержание кальция (%) – в диапазоне 6,4–7,5, содержание оксида кальция (%) – в диапазоне 9,0–10,5. Миндальную кислоту (100 %, Bingospa), гидроксид аммония NH_4OH (25 %, НеваРеактив), пероксид водорода H_2O_2 (40 %, БиохимРеагент), порошок титана ПТМ-1 и ортофосфорную кислоту H_3PO_4 (98 %, Вектон) использовали без предварительной очистки.

Методы синтеза

Синтез комплекса титана с миндальной кислотой (TiP). В соответствии с ранее опубликованной методикой [19]: в колбу Эрленмейера на 100 мл помещают 0,41 г (8,5 ммоль) титана, 40 мл 40%-ного раствора H_2O_2 и 5 мл раствора NH_4OH . Реакционную смесь перемешивают на магнитной мешалке до полного растворения титана (от 1 до 1,5 часов), поддерживая температуру смеси в диапазоне от 5 до 10 $^{\circ}\text{C}$. Затем светло-желтый раствор пероксокомплекса титана фильтруют и к нему добавляют раствор органической кислоты (17 ммоль) в 2–3 мл воды. После добавления кислоты температуру реакционной смеси выдерживают в интервале 15–20 $^{\circ}\text{C}$ еще в течение 2–3 часов. Выделение комплексов титана с гидроксикислотами из водных растворов проводят путем упаривания при пониженном давлении на ротационном испарителе при 30–40 $^{\circ}\text{C}$.

Получение микроструктурированного фосфата титана (TiP) гидротермальным методом. Растворимый в воде комплекс титана с миндальной кислотой (1,66 ммоль), растворенный в 5 мл воды, помещали в автоклав с тефлоновым покрытием, после чего к комплексу добавляли соответствующее количество фосфорной кислоты. Полученный мутно-белый раствор разбавляли водой до 20 мл. Приготовленные растворы герметизировали и нагревали. После охлаждения автоклава твердые частицы отделяли от растворов путем промывки и центрифугирования.

Получение дифеноксиэтиладипината (ДФЭА). В трехгорлую колбу объемом 500 мл, оснащенную механической мешалкой, термометром и насадкой Дина – Старка с обратным холодильником, загружают 0,5 моль адипиновой кислоты, 1,1 моль феноксиэтанола, *p*-толуолсульфокислоты в качестве катализатора и азеотропный растворитель толуол 250 мл. Реакционную смесь нагревают до температуры кипения (110–120 $^{\circ}\text{C}$) при постоянном перемешивании. Реакцию продолжают до прекращения выделения воды. После завершения реакции смесь охлаждают и нейтрализуют 5% раствором гидрокарбоната натрия, промывают последовательно дистиллированной водой и насыщенным раствором NaCl , фильтруют и растворитель отгоняют.

Методы анализа

Характеристика микроструктурированного TiP. Регистрация ИК-спектров пропускания проведена на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRAffinity S1 в диапазоне от 400 до 4000 cm^{-1} с разрешением 4 cm^{-1} и количеством повторов 40. Элементный анализ и морфология образцов изучены с использованием электронного микроскопа Jeol JSM 7001F, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-max 80. Ускоряющее напряжение электронной пушки установлено на 20 кВ, что необходимо для проведения количественного РФА-анализа. Микрофотографии ПЭМ TiP получены на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100 с рабочим напряжением 200 кВ. Фазовый состав и структура образцов исследованы на порошковом дифрактометре Rigaku Optima IV. Съемка проводилась в диапазоне углов 2θ от 5 до 90 $^{\circ}$ со скоростью сканирования 5 $^{\circ}$ /мин. В исследовании использовалось излучение медной трубки $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) при ускоряющем напряжении 40 кВ. Удельная поверхность и пористость были измерены методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе ASAP Micromeritics 2020. Этапу измерений предшествовала дегазация, проводившаяся при температуре 200 $^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов. Удельная поверхность была определена на основе метода многослойной адсорбции БЭТ.

Объем мезопор и их распределение по размерам рассчитаны на основе модели Барретта-Джойнера-Халенды (БДХ).

Элементный состав и морфология образца были изучены методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Jeol JSM 7001F с энергодисперсионным анализатором Oxford INCA X-max 80 при ускоряющем напряжении 20 кВ. Полученные данные подтверждают химическую чистоту и однородность синтезированного продукта.

Характеристика ДФЭА. ДФЭА был проанализирован методом ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRAffinity S1 в диапазоне волновых чисел от 400 до 4000 см^{-1} с разрешением 4 см^{-1} и количеством сканирований 20. Спектральный анализ подтвердил характерные полосы поглощения сложных эфиров: интенсивную полосу при 1736 см^{-1} , соответствующую валентным колебаниям карбонильной группы в сложном эфире, и полосу при 1173 см^{-1} , отвечающую колебаниям С–О–С связей эфирного фрагмента.

Молекулярная структура и чистота продукта были исследованы методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе LC-10 Shimadzu в обращенно-фазовом режиме. Разделение компонентов проводилось на колонке 150×4,6 мм с сорбентом Separon-C18 (размер частиц 5 мкм) в системе элюентов ацетонитрил-вода в объемном соотношении 67:33. Скорость потока элюента составляла 0,5 мл/мин при объеме вводимой пробы 10 мкл.

Определение термической стабильности ПВХ методом ТГ. Анализ проведен с использованием прибора термического анализа Netzsch STA 449 F1 Jupiter, который представляет совмещенный прибор термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии.

Диапазон температур прибора составляет 25–1650 °С. Максимальная скорость нагрева образца составляет 50 К/мин, охлаждения прибора – 20 К/мин. Погрешность измерения $\pm 0,3$ К. Термоанализ образцов осуществляли в интервале температур от 25 до 600 °С в среде аргона или воздуха. Измерения были проведены в динамическом режиме при постоянной скорости нагрева, составляющей 10 град/мин. Масса образца, взятого для измерений, составляла 5–15 мг. Для исследования использовали тигли из Pt. Обработка результатов осуществлялась с помощью компьютера. При проведении измерений на термоанализаторе STA на получаемой термограмме исследуемого образца фиксируются кривые, которые использовались для оценки термостабильности образцов: термогравиметрическая кривая (ТГ) показывает изменение массы анализируемого образца в процессе нагрева (график зависимости массы от температуры); дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТГ) показывает скорость изменения массы анализируемого образца в процессе нагрева; кривая ДСК описывает тепловые эффекты, происходящие в образце в процессе нагрева. По полученным кривым для оценки термостабильности образцов определяли следующие характеристики:

T_n , °С – температура начала снижения массы образца при нагреве;

Δm_{200} °С, % – снижение массы образца при нагреве до температуры 200 °С;

Δm_5 %, °С – температура, соответствующая потере массы образца в количестве 5 %;

Δm_{10} %, °С – температура, соответствующая потере массы образца в количестве 10 %;

$T_{\max}$ ДТГ, °С – температура, соответствующая максимуму на дифференциальной термогравиметрической кривой, т. е. максимальной скорости разложения продукта (пик на кривой ДТГ);

$T_{\max}$ ДСК, °С – температура максимума эндотермического пика, соответствующего основной стадии дегидрохлорирования, на кривой ДСК.

Подготовка прототипов, содержащих микроструктуру TiP

Образцы ПВХ смолы перемешивали с необходимым количеством термостабилизатора в течение 7–10 минут круговыми движениями. Затем добавляли пластификатор. При этом смесь нагревали на водяной бане до 60–70 °С для улучшения диспергирования. ПВХ композицию помещали в вакуумный шкаф и выдерживали при –0,8 бар, 70 °С в течение 15 мин для удаления воздуха. Затем смесь помещали в контейнер и выдерживали в течение 24 ч при 25 °С для полной гомогенизации системы.

Обсуждение результатов

В более ранних работах описано получение и исследование возможных применений иерархически структурированных фосфатов титана [21–23]. Основные характеристики исследованных фосфатов титана приведены в табл. 1.

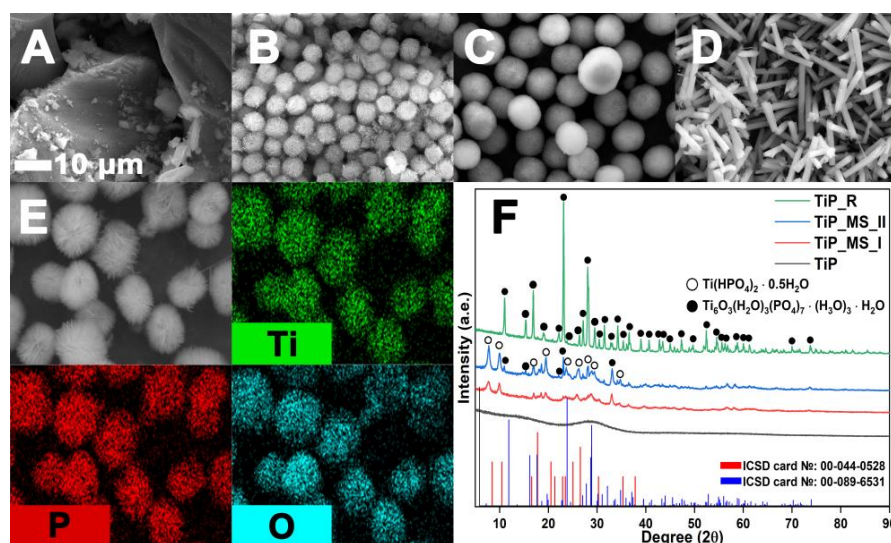
Таблица 1

Основные характеристики модифицированных фосфатов титана

Наименование	T, °C	τ, ч	Начальное соотношение Ti:P	Соотношение Ti:P в осадке
TiP	120	4	1/5	0,85
TiPMS1	180	4	1/8	0,82
TiPMS2	140	24	1/5	0,86
TiPR	120	72	1/4	0,86

Примечание. T, °C – температура гидротермального синтеза; τ, ч – время гидротермального синтеза.

Вкратце, продукты гидротермального синтеза демонстрируют три типа морфологии: аморфный осадок (TiP), микросферы (TiPMS1, TiPMS2) и гексагональные микроотверстия (TiPR) (см. рисунок).



СЭМ-изображения образцов TiP (A), микросферы TiPMS1 (B), TiPMS2 (C) и гексагональные микроотверстия TiPR (D); EDS-анализ (E); рентгенофазовый анализ (F)

Для дальнейших исследований термической стабильности ПВХ-композиций был выбран образец TiPMS2 из-за его оптимальных структурных характеристик. Данный фосфат титана, полученный при температуре 140 °C в течение 24 часов с исходным соотношением Ti:P = 1:5, демонстрирует стабильную микросферическую морфологию и элементное соотношение Ti:P = 0,86 в осадке. Именно сферически упорядоченные агрегаты микрочешуек TiPMS2 обеспечивают наибольшую удельную поверхность и эффективное диспергирование в полимерной матрице, что создает оптимальные условия для термостабилизации ПВХ за счет барьерного эффекта и взаимодействия с продуктами разложения. Ранее было показано, что такая морфология способствует лучшему ингибированию процесса дегидрохлорирования по сравнению с аморфными и стержневыми структурами [9].

С целью повышения термостабильности ПВХ исследовано влияние количества ДФЭА в ПВХ-композиции следующего состава, масс. ч: ПВХ С-7059М – 100; пластификатор – 100; трехосновной сульфат свинца – 4; стеарат кальция – 1; фосфат титана – 1.

В качестве базовой ПВХ-композиции исследован состав без фосфата титана с содержанием диоктилфталата № 1. В качестве образца сравнения использовали аналогичную композицию, содержащую фосфат титана № 2. Композиции 3–5 содержат в составе комплексного стабилизатора фосфат титана, в качестве пластификатора – смесь ДОФ/ДФЭА в различном соотношении 5/1 – 5/5 (табл. 2).

Анализ экспериментальных данных по термической стабильности ПВХ-композиций, представленных в табл. 2, позволяет сделать выводы о влиянии комплекса добавок на поведение материала при термоокислительной деструкции. Ключевым индикатором эффективности модифицирующей системы является температура начала деструкции. Наибольшее значение этого параметра зафиксировано у образца № 5, который демонстрирует результат 173 °C, что на 24 °C вы-

ше, чем у базового состава № 1, и значительно превосходит показатели композиций с меньшим содержанием ДФЭА (№ 3 и № 4). Столь высокое значение T_n для образца № 5 свидетельствует о синергетическом эффекте, возникающем при оптимальном сочетании микроструктурированного фосфата титана TiPMS2 и смешанной пластифицирующей системы с данным соотношением компонентов.

Таблица 2

Данные термического анализа образцов

№	Образец	T_n , °C	Δm_{200} , %	Δm_5 , °C	Δm_{10} , °C	Остаток (581 °C), %	T_{max} ДТГ, °C	T_{max} ДСК, °C
1	ПВХ-к	149	0,60	239	255	1,50	300,0	444,5
2	ПВХ-к + TiPMS2	154	0,50	246	262	2,54	307,3	446,2
3	ПВХ-к 5/1	145	1,80	230	252	2,78	313,2	487,8
4	ПВХ-к 5/2	140	5,00	200	214	2,05	311,5	500,2
5	ПВХ-к 5/3	173	0,52	239	245	5,16	305,8	495,6
6	ПВХ-к 5/4	165	0,63	238	255	5,61	305,4	489,9
7	ПВХ-к 5/5	148	0,42	254	270	2,59	318,5	507,7

Важным аспектом является оценка стабильности композиций в низкотемпературной области, характерной для процессов переработки. Здесь также выделяется образец № 5, показавший незначительное снижение массы при 200 °C, составляющее всего 0,52 %. Это свидетельствует о значительном подавлении летучести пластификатора и начальных стадий деструкции полимерной цепи. Параллельно с этим, высокий коксовый остаток данного образца (5,16 %) при 581 °C подтверждает способность разработанной рецептуры стимулировать образование стабильного углеродного каркаса, который выполняет функцию защитного барьера, затрудняющего доступ кислорода и выход летучих продуктов разложения.

Анализ кинетики процесса термодеструкции по данным ДТГ и ДСК выявляет общую тенденцию к смещению основных стадий разложения в область более высоких температур. В частности, для образца № 7 наблюдается значительное увеличение температур, при которых потери массы составляют 5 и 10 %. Наиболее же показательным является рост температур максимумов эндотермических пиков на кривых ДСК для стабилизированных образцов до 507,7 °C против 444,5 °C у базового образца № 1, что является прямым доказательством ингибирующего действия комплекса добавок на процесс дегидрохлорирования – основную реакцию, запускающую деструкцию ПВХ.

Таким образом, комплексный термический анализ методами ТГ и ДСК показал, что соотношение ДОФ/ДФЭА = 5/3 обеспечивает наилучший сбалансированный набор термических характеристик, что сочетает высокую начальную термостабильность, низкие потери массы на этапе переработки, способность к образованию защитного коксового слоя и эффективное торможение основной стадии дегидрохлорирования. Данный состав можно считать оптимальным, так как он обеспечивает выраженный синергизм между неорганическим стабилизатором и органической пластифицирующей системой, открывая перспективу для создания экологичных и высокотемпературных композиций на основе пластифицированного ПВХ.

Заключение

Исследовано влияние количества дифеноксиэтиладипината на термические характеристики пластифицированного ПВХ, модифицированного микроструктурированным фосфатом титана. Методами ТГА и ДСК установлено, что оптимальным является соотношение ДОФ/ДФЭА = 5/3. Данное соотношение обеспечивает максимальную температуру начала деструкции 173 °C, минимальную потерю массы при 200 °C – 0,52 % и повышенный коксовый остаток при 581 °C – 5,16 %, что свидетельствует о формировании защитного барьерного слоя.

Достигнутый эффект обусловлен синергизмом между неорганическим стабилизатором микроструктурированным фосфатом титана, обладающим развитой микросферической морфологией, и наличием ароматических фрагментов в структуре дифеноксиэтиладипината, повышающих стабильность полимерной матрицы. Полученные результаты подтверждают перспективность использования комбинации микросферического фосфата титана и смесового пластификатора для создания экологически безопасных термостойких ПВХ-композиций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. // Waste Manag. 2016. V. 48. P. 300. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041
2. Troitskaya M.V., Kryuchkov M.S., Maltseva E.E. // Polym. Sci. Ser. C. 2017. V. 59(1). P. 82. DOI: 10.1134/S1811238217010075
3. Marceneiro S., Hu G.H., Lagarde F., Pizzi A. // JKPS. 2022. V. 80(5). P. 387. DOI: 10.1007/s40042-022-00412-8
4. Zhang C., Huang J., Liu S., Zhao J. // Polymers. 2023. V. 15(4). P. 1043. DOI: 10.3390/polym15041043
5. Bao C.L., Song L., Xing W.Y., et al. // Polym. Degrad. Stab. 2011. V. 96(7). P. 1380. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.03.014
6. Rao Z., Chen M., Liu X., et al. // Polymers. 2023. V. 15(23). P. 5229. DOI: 10.3390/polym15235229
7. Pattnaik A.K., Behera G.C., Parida K. // RSC Sustainability. 2025. V. 3. P. 2472. DOI: 10.1039/D5SU00100A
8. Uryupina O.Ya., Serebryakova N.V., Roldugin V.I. // Adv. Colloid Interface Sci. 2003. V. 104. P. 227. DOI: 10.1016/S0001-8686(03)00044-8
9. Vikhareva I.N., Abramian A., Manojlović D., Bol'shakov O. // Polymers. 2025. V. 17(15). P. 2140. DOI: 10.3390/polym17152140
10. Czogala J., Pankalla E., Turczyn R. // Molecules. 2021. V. 26(4). P. 844. DOI: 10.3390/molecules26040844
11. Vikhareva I.N., Kruchinina P.A., Manojlović D. // Polymers. 2024. V. 16(23). P. 3372. DOI: 10.3390/polym16233372
12. Vikhareva I.N., Manojlović D. // Applied Sciences. 2024. V. 14(23). P. 10953. DOI: 10.3390/app142310953
13. Shi Y., Zhang J., Wang J., et al. // Polymers. 2022. V. 14(21). P. 4533. DOI: 10.3390/polym14214533
14. Najafi V., Lorenzetti C., Frache, A., et al. // Eur. Polym. J. 2020. V. 128. P. 109606. DOI: 10.3390/polym14214533
15. Vikhareva I.N., Aminova G.K., Mazitova A.K. // Polymers. 2022. V. 14(9). P. 1888. DOI: 10.3390/polym14091888
16. Deng T., Li J., Zhang L., et al. // ACS Omega. 2022. V. 7(39). P. 35093. DOI: 10.1021/acsomega.2c04106
17. Nguyen T.K.L., Soares B.G., Duchet-Rumeau J., et al. // CST. 2017. V. 140. P. 30. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.12.021.
18. Verma C., Olasunkanmi L.O., Akpan E.D., et al. // React. Funct. Polym. 2020. V. 156. P. 104741. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741
19. Ahmed D.S., El-Hiti G.A., Yousif E., et al. // MTodayP. 2021. V. 42. P. 1432. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.101
20. Costes L., Cantarel A., Bounor-Legaré V. // Polym. Degrad. Stab. 2015. V. 120. P. 121. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.007
21. Heintz N.S., Vorobiev D.V., Korina E.A., Morozov R.S., Avdin V.V., Belozerova A.A., Bolshakov O.I. // Bull. S. Ural State Univ. Ser. Chem. 2021. V. 13. P. 79. EDN: XWQZVT
22. Mikhailov M.S., Knyazeva E.A., Abramyan A.A., Korina E.A., Morozov R.S., Avdin V.V., Bol'shakov O.I. // Bull. S. Ural State Univ. Ser. Chem. 2023. V. 15. P. 100. EDN: YJKLMP
23. Korina E., Abramyan A., Bol'shakov O., Avdin V.V., Savić S., Manojlović D., Stanković V., Stanković D.M. // SJ. 2023. V. 23. P. 933. DOI: 10.3390/s23020933

Кручинина Полина Александровна – аспирант кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: asp2025kpa6@susu.ru

Вихарева Ирина Николаевна – кандидат химических наук, заместитель директора Научно-образовательного центра «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vikharevain@susu.ru

*Статья поступила в редакцию 24 марта 2026 г.
The article was submitted 24 March 2026.*