

СИНЕРГИЗМ БИНАРНЫХ СИСТЕМ ПЛАСТИФИКАТОРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИГРАЦИОННО-СТОЙКИХ КОМПОЗИЦИЙ ПВХ

И.Н. Вихарева[✉]

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

[✉] vikharevain@susu.ru

Аннотация. Проблема миграции пластификаторов из поливинилхлорида (ПВХ) является ключевой при разработке устойчивых полимерных композиций. Одним из перспективных подходов является использование бинарных систем пластификаторов. В данной работе исследована совместимость с ПВХ бинарных смесей диоктилфталата (ДОФ) с эфирами адипиновой кислоты и феноксиэтанола. Методами определения критической температуры растворения и расчета параметров растворимости Хансена (HSP) впервые показан синергетический эффект для таких систем. Установлено повышение совместимости для исследуемых систем по сравнению с индивидуальными эфирами, что выражается в снижении критической температуры растворения. Наибольший синергетический эффект ($\Delta A \approx 21\%$) зафиксирован для смеси ДОФ с децилфеноксиэтиладипинатом. Расчет параметров HSP подтвердил термодинамическую предсказуемость синергизма: значение критерия RED для всех смесей составило менее 1 (0,55–0,73). Предложен механизм синергизма, основанный на комплементарном действии компонентов. Результаты работы открывают путь к созданию миграционно-стойких композиций ПВХ.

Ключевые слова: адипинат, миграция, параметр растворимости, пластификатор, поливинилхлорид, синергизм, совместимость, феноксиэтанол

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

Для цитирования: Вихарева И.Н. Синергизм бинарных систем пластификаторов для создания миграционно-стойких композиций ПВХ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 1. С. 177–184. DOI: 10.14529/chem260115

Original article
DOI: 10.14529/chem260115

SYNERGY OF BINARY PLASTICIZER SYSTEMS FOR CREATING MIGRATION-RESISTANT PVC COMPOSITIONS

I.N. Vikhareva[✉]

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] vikharevain@susu.ru

Abstract. The problem of plasticizer migration from polyvinyl chloride (PVC) is a crucial one in the development of stable polymer compositions. A promising approach is the use of binary plasticizer systems. In the present paper the PVC compatibility has been investigated for binary mixtures of dioctyl phthalate (DOP) with esters of adipic acid and phenoxyethanol. For the first time, a synergistic effect for such systems has been demonstrated by way of determining the critical dissolution temperature and calculating the Hansen solubility parameters (HSP). An increase in compatibility for the studied systems has been established in comparison with individual esters, which is reflected in a decrease in the critical dissolution temperature. The greatest synergistic effect ($\Delta A \approx 21\%$) has been recorded for the mixture of DOP and decylphenoxyethyladipate. Calculation of the HSP parameters has confirmed the thermodynamic predictability of synergy: the RED criterion value for all mixtures has been less than 1 (0.55–0.73). A synergy mechanism based on complementary action of the components has been proposed. The results of the work open the way to creation of migration-resistant PVC compositions.

© Вихарева И.Н., 2026.

Keywords: adipate, migration, solubility parameter, plasticizer, polyvinyl chloride, synergy, compatibility, phenoxyethanol

Acknowledgments: This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Order of the Government of the Russian Federation FENU-2024-0005).

For citation: Vikhareva I.N. Synergy of binary plasticizer systems for creating migration-resistant PVC compositions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(1):177–184. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260115

Введение

Широкое использование пластифицированных композиций на основе поливинилхлорида (ПВХ) сталкивается с серьезной экологической проблемой – миграцией пластификаторов, в особенности фталатов, таких как диоктилфталат (ДОФ) [1–3]. Миграция пластификаторов из ПВХ-изделий приводит не только к ухудшению эксплуатационных характеристик материалов (потеря гибкости, растрескивание, снижение долговечности), но и к негативному воздействию на окружающую среду и здоровье человека, поскольку многие традиционные фталатные пластификаторы проявляют токсичность и канцерогенность [4–6].

В связи с ужесточением экологических норм и требований безопасности, актуальной задачей является разработка эффективных подходов к снижению миграции пластификаторов при сохранении высоких характеристик пластифицированных материалов. Одним из перспективных направлений является использование смесей пластификаторов (бинарных систем), позволяющих комбинировать преимущества индивидуальных компонентов и нивелировать их недостатки [7, 8]. В таких системах первичные пластификаторы (например, ДОФ) обладают высокой растворяющей способностью и эффективно снижают температуру стеклования полимера, но склонны к миграции и экссудации. Вторичные пластификаторы (например, полиэфирные, алифатические эфиры дикарбоновых кислот) часто обладают лучшими экологическими показателями и миграционной стойкостью, но их совместимость с ПВХ и эффективность пластификации ограничены. Однако оптимизация состава таких смесей представляет собой сложную задачу, поскольку совместимость компонентов в бинарных системах может существенно отличаться от их поведения в тройных. В случаях значительного различия полярностей полимера и пластификатора совместимость может быть улучшена введением второго пластификатора [9, 10].

Свойства пластифицированных композиций, такие как температура стеклования, критическая температура растворения и летучесть, часто подчиняются закону аддитивности. Например, увеличение доли вторичного пластификатора в смеси приводит к росту критической температуры растворения.

Таким образом, научно обоснованный подбор компонентов и их соотношения позволяет не только компенсировать недостатки индивидуальных пластификаторов, но и достичь синергетического эффекта за счёт их взаимного влияния – улучшения совокупности свойств сверх аддитивного уровня.

В связи с этим актуальной задачей является исследование возможности парциальной замены пластификатора ДОФ в ПВХ-композициях с целью снижения экологического действия при использовании ПВХ-материалов и определение механизма пластифицирующего действия бинарных систем пластификаторов.

Экспериментальная часть

Материалы и методы

Материалы

В качестве матрицы были использованы промышленные образцы суспензионного поливинилхлорида, поставленного ОАО «Башкирская содовая компания «Каустик» (Стерлитамак, Россия). Пластификатор диоктилфталат (ДОФ) был поставлен ОАО «Камтекс-Химпром» (Пермь, Россия). Его основными характеристиками являются кислотное число (мг КОН/г) $\leq 0,07$, степень омыления (мг КОН/г) ≤ 289 , массовая доля летучих веществ (%), не более) 0,1, температура вспышки ($^{\circ}\text{C}$) ≥ 205 . Стабилизатор трехосновный сульфат свинца (TBLS) производится компани-

ей Baerlocher GmbH (Ingolstadt, Германия). Внешний вид: порошок, содержание свинца (%) – 89; рН –7,0–7,5; зольность (%) – не менее 95. Адипиновая кислота представляет собой белое кристаллическое соединение. Массовая доля основного вещества (% , не менее) – 99,8; температура плавления - 152,3 °С. Феноксизтанол представляет собой бесцветную полупрозрачную жидкость. Массовая доля основного вещества (% , не менее) 99,5; плотность при 20°С (г/см³, в пределах) 1,105–1,110; массовая доля воды (% , не более) 0,1; массовая доля кислоты (в пересчете на уксусную кислоту, %, не более 0,005. Бутанол представляет собой бесцветную жидкость с характерным запахом сивушного масла, плотность при 20°С составляет 0,809–0,811 г/см³, массовая доля бутилового спирта не менее 99,4 %, массовая доля кислоты в пересчете на уксусную кислоту не более 0,003 %, массовая доля содержание карбонильных соединений в пересчете на масляный альдегид составляет не более 0,06 %, массовая доля нелетучего остатка – не более 0,0025 %, массовая доля воды – не более 0,1 %. Деканол представляет собой жидкое органическое вещество плотностью 0,8297 г/см³, температурой плавления 7 °С, кипения 231 °С, температурой вспышки 82 °С, нерастворимое в воде, хорошо растворимое в этаноле.

Синтез алкилфеноксизтиладипинатов

Первоначально в химический реактор с подключенным обратным холодильником, термометром и ловушкой Дина-Старка вводят определенное количество алифатической дикарбоновой кислоты, необходимое количество спирта и рассчитанное количество катализатора *n*-толуолсульфокислоты, растворитель толуол. Реакция проводится при температуре кипения смеси реагентов. Контроль осуществляется путем отбора расчетного количества воды в ловушку Дина-Старка. После выделения расчетного количества воды в колбу с моноэфиром постепенно вводят расчетное количество другого спирта с помощью разделительной воронки. Синтез проводят до тех пор, пока в насадку не поступит необходимое количество воды, затем реакционный сосуд охлаждают. Этерификацию последовательно промывают 5%-ным раствором щелочи, водой и насыщенным раствором хлорида натрия. Затем продукт высушивают приготовленным высушенным сульфатом натрия. Фильтруют. Растворитель удаляют.

Характеризация эфиров

Кислотное и эфирное числа пластификаторов определяли титрованием спиртового раствора эфира раствором гидроксида калия в присутствии фенолфталеина согласно ГОСТ 30143-94.

Показатель преломления сложных эфиров измеряли на рефрактометре согласно ГОСТ 18995.2-2022.

Плотность сложных эфиров определяли с помощью пикнометра согласно ГОСТ 18329-2014.

Получение эфиров подтверждали методом ИК спектроскопии. Инфракрасные (IR) спектры получали с использованием Фурье-спектрометра Shimadzu FTIR-8400S. Для этого готовили таблетки бромида калия (KBr) с эфирами в соответствии с установленными протоколами. Спектры поглощения были получены в диапазоне длин волн от 450 до 3700 см⁻¹ при температуре окружающей среды. Измерения проводились с разрешением 4 см⁻¹ и для каждого образца было выполнено в общей сложности 20 сканирования.

Приготовление образцов

В качестве объекта исследования использовали бинарные смеси промышленного пластификатора диоктилфталата (ДОФ) и синтезированных алкилфеноксизтиладипинатов. Соотношение компонентов в смеси составляло 5 масс. ч. ДОФ на 1 масс. ч. эфира.

Методы

Совместимость оценивали путем определения критической температуры растворения (Т_{кр}). Для этого 0,05 г ПВХ (с константой Фикентчера К = 70) растворяли в 5 мл пластификатора (или его смеси) при непрерывном нагревании и визуальном фиксировании температуры полного растворения [11, 12]. Показатель совместимости (А, %) рассчитывали относительно Т_{кр} чистого ДОФ по формуле

$$A = \frac{T_{\text{доф}}}{T_{\text{кр}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Т_{доф} – критическая температура растворения ПВХ смолы в пластификаторе ДОФ, °С; Т_{кр} – критическая температура растворения ПВХ смолы в исследуемом пластификаторе (или в его смеси с ДОФ), °С; А – показатель совместимости для пластификатора, %.

Для оценки термодинамической совместимости пластификаторов с ПВХ рассчитывали параметры растворимости Хансена (δ_D , δ_P , δ_H), R_A по формуле [13–15]:

$$R_A = \sqrt{4 \cdot (\delta_{D2} - \delta_{D1})^2 + (\delta_{P2} - \delta_{P1})^2 + (\delta_{H2} - \delta_{H1})^2}, \quad (2)$$

где δ_D – энергия дисперсионных сил, δ_P – энергия дипольных межмолекулярных сил, δ_H – энергия водородных связей; R_A – расстояние от центра растворимости полимера до координат параметра растворимости пластификаторов.

Значения групповых вкладов (инкрементов), необходимые для расчета параметров по методу Хансена, описаны в литературе [15]. Полученное расстояние R_A сравнивается с радиусом взаимодействия (R_0) полимера. Для поливинилхлорида (ПВХ) этот радиус равен 8,2 [(МДж/м³)^{1/2}].

$$RED = R_A / R_0$$

$RED < 1,0$ – хорошая совместимость; $RED \approx 1,0$ – пограничная совместимость; $RED > 1,0$ – плохая совместимость.

Для оценки термодинамической совместимости бинарных систем пластификаторов рассчитывали параметры растворимости Хансена (δ_D , δ_P , δ_H) по правилу аддитивности (формулы 3, 4) с использованием мольных долей компонентов [13–15].

$$\delta_{см} = \frac{(x_1 V_1 \delta_1 + x_2 V_2 \delta_2 + \dots + x_i V_i \delta_i)}{(x_1 V_1 + x_2 V_2 + \dots + x_i V_i)}, \quad (3)$$

где x_i – мольные (или молярные) доли компонентов; V_i – мольные объемы компонентов; δ_i – параметры растворимости компонентов.

$$x_i = \frac{c_i / M_i}{c_1 / M_1 + c_2 / M_2 + \dots + c_i / M_i}, \quad (4)$$

где c_i – концентрация компонента, масс. %.

Результаты и обсуждение

В более ранних работах описано получение и исследование характеристик несимметричных адипинатов оксиэтилированных спиртов [16–18]. Вкратце, путем этерификации адипиновой кислоты в присутствии катализатора *n*-толуолсульфонокислоты получены бутилфеноксиэтиладипинат (БФЭА), гексилфеноксиэтиладипинат (ГФЭА), октилфеноксиэтиладипинат (ОФЭА), децилфеноксиэтиладипинат (ДФЭА). Выход диэфиров превышает 86 %. Целевые соединения представляют собой твердые сыпучие продукты бледно-желтого оттенка. Синтезированные соединения характеризуются критически важными для ПВХ показателями: низким кислотным числом, препятствующим термической деградации полимера, и минимальной летучестью, предотвращающей миграцию и выпотевание пластификатора. Низкий уровень данных параметров повышает термостабильность и эксплуатационный ресурс материалов, соответствуя современным направлениям в создании высокостабильных полимерных композитов.

Совместимость пластификаторов с ПВХ-смолой представляет собой ключевой фактор при разработке рецептур пластифицированных материалов. Уровень взаимодействия между пластификатором и полимерной матрицей напрямую определяет величину миграции пластификатора: чем ниже предел совместимости, тем выше склонность к миграции [19–21].

Выбор пластификаторов основывается на комплексной оценке их влияния на свойства полимера и определения пределов совместимости в условиях эксплуатации. Совместимость возрастает с температурой, и выше критической температуры ($T_{кр}$) для данной пары вещества становятся полностью совместимыми при любых соотношениях. Это создает практическую проблему, поскольку при температуре переработки может быть достигнута гомогенная композиция с содержанием пластификатора, превышающим предел совместимости при температурах эксплуатации, что приводит к выпотеванию пластификатора и ухудшению физико-механических свойств материала.

Для оценки пластифицирующего эффекта синтезированных пластификаторов в отношении ПВХ выполнен расчет параметров растворимости Хансена (HSP – Hansen Solubility Parameters), который опирается на термодинамические критерии совместимости материалов [13–15]. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры растворимости и числа RED для алкилфеноксиэтиладипинатов

Пластификатор	№	δ_D , (МДж/м ³) ^{1/2}	δ_P , (МДж/м ³) ^{1/2}	δ_H , (МДж/м ³) ^{1/2}	V, см ³ /моль	R _A	RED
ДОФ (стандарт)	–	16,21	7,03	3,39	368,20	7,08	0,86
Бутилфеноксиэтил- адипинат	1	16,69	8,37	4,59	289,6	5,15	0,63
Гексилфеноксиэтил- адипинат	2	16,77	7,94	4,36	321,8	5,07	0,62
Октилфеноксиэтил- адипинат	3	16,84	7,57	4,15	354,0	5,05	0,62
Децилфеноксиэтил- адипинат	4	16,90	7,25	3,98	386,2	5,06	0,62
ПВХ	–	18,40	6,60	8,00			

Область растворимости полимера в пространстве Хансена представляется в виде сферы с радиусом R_0 .

Для обеспечения высокой степени совместимости значение R_A должно быть меньше, чем R_0 . Показатель RED (relative energy difference) характеризует относительную разницу энергий: $RED = R_A/R_0$.

Анализ рассчитанных параметров Хансена для алкилфеноксиэтиладипинатов показал, что синтезированные эфиры (1-4) демонстрируют высокие показатели термодинамической совместимости с поливинилхлоридом. Значение параметра $RED < 1$ (в диапазоне 0,62–0,63) указывает на высокое сродство к полимерной матрице. Важно отметить, что совместимость эфиров превосходит промышленный стандарт ДОФ ($RED = 0,86$).

Наблюдается четкая тенденция в изменении параметров растворимости при удлинении алифатической цепи (от бутила к децилу): дисперсионная составляющая (δ_D) незначительно, но закономерно увеличивается (с 16,69 до 16,90 (МДж/м³)^{1/2}) по мере роста молярного объема и усиления ван-дер-ваальсовых взаимодействий.

Полярная (δ_P) и водородная (δ_H) составляющие, напротив, снижаются с 8,37 до 7,25 и с 4,59 до 3,98 (МДж/м³)^{1/2} соответственно, что связано с уменьшением относительной доли полярных эфирных и ароматических групп в общей массе молекулы.

Несмотря на структурные изменения, расстояние R_A и критерий RED остаются практически постоянными для всей гомологической серии, что свидетельствует о сохранении баланса между тремя типами межмолекулярных взаимодействий. При этом совместимость с ПВХ не ухудшается при увеличении длины цепи.

Параметры синтезированных эфиров $\delta_D \approx 16,7$ – $16,9$, $\delta_P \approx 7,3$ – $8,4$, $\delta_H \approx 4,0$ – $4,6$ находятся вблизи центра сферы растворимости ПВХ $\delta_D = 18,40$, $\delta_P = 6,60$, $\delta_H = 8,00$, особенно по дисперсионной и полярной компонентам.

Наибольшее отклонение наблюдается по параметру δ_H , характеризующему водородные связи, однако его компенсирует идеальное совпадение по δ_P (полярность) и хорошее – по δ_D .

Преимущество синтезированных эфиров над ДОФ заключается в значительно более низком значении $R_A \sim 5,1$ против 7,1, что означает большее сродство к ПВХ, и, как следствие, в более низкое значение RED.

Таким образом, согласно рассчитанным значениям параметров термодинамической совместимости серия алкилфеноксиэтиладипинатов представляет собой перспективные пластификаторы с высокой и стабильной совместимостью с ПВХ, не зависящей от длины алифатической цепи в исследованном диапазоне (C4–C10). Их термодинамические характеристики превосходят традиционный фталатный пластификатор ДОФ, что позволяет прогнозировать их уменьшенную склонность к миграции и экссудации из полимерной матрицы, а, следовательно, и более длительный срок службы готовых изделий.

На практике для оценки совместимости широко используются полуэмпирические параметры, связанные с термодинамическими функциями [11]. Критическая температура растворения полимера в пластификаторе служит важным практическим показателем, сочетающим термодинамические и кинетические аспекты взаимодействия. Для экспериментальной проверки теоретических

прогнозов, полученных методом Хансена, была определена критическая температура растворения ПВХ в эфирах. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2
Критическая температура растворения и показатели совместимости

Пластификатор	№	Т _{кр} , °С	А, %
ДОФ (стандарт)	–	120	–
Бутилфеноксиэтиладипинат	1	124	97
Гексилфеноксиэтиладипинат	2	137	87,6
Октилфеноксиэтиладипинат	3	150	80
Децилфеноксиэтиладипинат	4	162	74

Согласно представленным в табл. 2 данным наблюдается резкое ухудшение практической совместимости. Критическая температура растворения ПВХ в эфирах увеличивается от 124 °С для бутильного производного до 162 °С для децильного, показатель А, соответственно, снижается с 97 до 74 %.

Критическая температура растворения – это кинетический параметр, определяющий температуру, при которой молекула пластификатора приобретает достаточную энергию и подвижность, чтобы диффундировать между цепями ПВХ и создать гомогенный раствор. Бутилфеноксиэтиладипинат (№ 1) имеет компактную и подвижную молекулу, которая легко проникает в полимерную матрицу даже при невысоких температурах – Т_{кр} = 124 °С, что близко к ДОФ. Децилфеноксиэтиладипинат (№ 4) имеет в структуре длинную и гибкую алифатическую цепь, что создает стерические затруднения. Чтобы такая крупная молекула проникла между цепями ПВХ, требуется значительно больше энергии, то есть необходима более высокая температура – Т_{кр} = 162 °С.

Параметры Хансена описывают термодинамическую совместимость смеси в равновесии. Поэтому удлинение алифатической цепи в несимметричных эфирах практически не влияет на термодинамическое сродство к ПВХ. Таким образом, оба метода анализа не противоречат, а дополняют друг друга, давая полную картину: теория Хансена предсказывает итоговую стабильность системы, а измерение Т_{кр} показывает, насколько легко эту систему получить на практике.

Учитывая полученные результаты, для технологического применения наиболее предпочтительным является бутилфеноксиэтиладипинат (№ 1). Он сочетает в себе отличное термодинамическое сродство к ПВХ (RED = 0,63) с хорошей кинетической доступностью (Т_{кр} = 124 °С, А = 97 %). Его свойства максимально близки к промышленному стандарту ДОФ.

Эфиры с более длинными цепями (особенно октил- и децил-) потребуют более высоких температур переработки, что может быть не всегда технологически и экономически целесообразно, а также повышает риск термической деградации ПВХ.

Использование твердых соединений в качестве пластификаторов усложняет технологический процесс производства полимерных материалов, поэтому целесообразно предварительное растворение эфиров в хорошо совмещаемом жидком пластификаторе. Для исследования возможности использования смесевых пластификаторов проведена комплексная оценка совместимости с ПВХ. Выбрано следующее соотношение компонентов: ДОФ – 5 масс. ч., эфир – 1 масс. ч.

Результаты расчетов термодинамических критериев совместимости смесевых пластификаторов приведены в табл. 3.

Таблица 3
Параметры растворимости и числа RED для бинарных систем

Пластификатор	№	$\delta D, (МДж/м^3)^{1/2}$	$\delta P, (МДж/м^3)^{1/2}$	$\delta H, (МДж/м^3)^{1/2}$	$\delta_{см}$	R _{А см}	RED _{см}
ДОФ (стандарт)	–	16,21	7,03	3,39	–	7,08	0,86
Бутилфеноксиэтиладипинат + ДОФ	1	16,44	7,69	3,98	18,58	5,71	0,70
Гексилфеноксиэтиладипинат + ДОФ	2	16,50	7,50	3,89	18,53	5,67	0,69
Октилфеноксиэтиладипинат + ДОФ	3	16,55	7,32	3,80	18,49	5,65	0,69
Децилфеноксиэтиладипинат + ДОФ	4	16,59	7,15	3,71	18,44	5,64	0,69
ПВХ	–	18,40	6,60	8,00	–	–	–

Рассчитанные значения $RED_{см}$ для смесевых пластификаторов меньше 1 (диапазон 0,55–0,73), что указывает на их термодинамическую совместимость с ПВХ.

Результаты определения параметра $T_{кр}$ и расчета показателей совместимости $A_{см}$ для смесей с ДОФ представлены в табл. 4.

Таблица 4

Критическая температура растворения и показатели совместимости для смесевых пластификаторов

Пластификатор	Номер	$T_{кр}$, °C	$A_{см}$, %	A , %
ДОФ (стандарт)	–	120	–	–
Бутилфеноксипропиолат	1	108	111	97
Гексилфеноксипропиолат	2	117	103	87,6
Октилфеноксипропиолат	3	124	97	80
Децилфеноксипропиолат	4	126	95	74

Показано, что показатель совместимости для бинарных систем превышает показатели для индивидуальных эфиров, причем совместимость смеси выше ожидаемого среднего значения совместимостей ее компонентов. Таким образом, определено доказательство синергетического эффекта пластифицирующего действия смесей ДОФ с алкилфеноксипропиолами. Наибольшее увеличение совместимости $\Delta A = +21$ % наблюдается для децилфеноксипропиола (№ 4), который в чистом виде обладает минимальной совместимостью с ПВХ среди исследуемых эфиров – $A = 74$ %.

Наблюдаемый синергетический эффект объясняется комплементарным механизмом действия компонентов пластифицирующей смеси. ДОФ выступает как проводник, его относительно небольшие и высокоподвижные молекулы эффективно внедряются между макромолекулами ПВХ, разрыхляя полимерную матрицу, увеличивая свободный объем и снижая энергию активации для внедрения более крупных молекул. Феноксифир выступает как стабилизатор, его объемные, содержащие ароматические фрагменты молекулы, внедряются в предварительно разрыхленную ДОФ структуру ПВХ. Феноксифиры эффективно экранируют остаточные полярные взаимодействия между цепями полимера, предотвращая их повторное сближение и стабилизируя пластифицированное состояние на надмолекулярном уровне.

В результате кооперативного взаимодействия достигается более полное и устойчивое разделение цепей ПВХ, что на макроуровне проявляется в снижении $T_{кр}$ для смеси по сравнению с теоретическими ожиданиями.

Полученные результаты имеют важное практическое значение. Показана возможность частичной замены ДОФ до 17 % по массе в системе пластификаторов на новые, потенциально более экологичные и термостабильные алкилфеноксипропиолаты с улучшением совместимости системы в целом. Использование жидкого ДОФ в качестве основы для твердых пластификаторов феноксипропиолатов адипиновой кислоты кардинально упрощает технологический процесс дозирования, смешения и переработки ПВХ-композиций, устраняя проблемы, связанные с сыпучими материалами. Снижение $T_{кр}$ бинарных систем способствует физической стабильности и термодинамической совместимости на молекулярном уровне. Таким образом, результаты работы открывают путь к созданию миграционно-стойких ПВХ-композиций.

Выводы

1. Экспериментально доказан синергетический эффект пластифицирующего действия бинарных систем пластификаторов на основе ДОФ и феноксипропиолатов.
2. Установлено, что все исследованные смеси являются полностью совместимыми с ПВХ ($RED_{см} < 1$), при этом их совместимость превышает аддитивную оценку. Наибольший синергизм наблюдается для смеси ДОФ с децилфеноксипропиолатом ($\Delta A = +21$ %).
3. Предложен механизм синергизма, основанный на последовательном комплементарном действии компонентов: разрыхление полимерной матрицы пластификатором ДОФ с последующей стабилизацией феноксифиром.

Список источников

1. Дедов А.В., Назаров В.Г. // Высокомолекулярные соединения. 2002. №4. С. 729.
2. Chen Y. et al. // Journal of Leather Science and Engineering. 2022. V. 4, No. 1. P. 8. DOI: 10.1186/s42825-022-00081-8
3. Лирова Б.И., Лютикова Е.А., Мельник А.И. и др. // Высокомолекулярные соединения. 2002. №2. С. 363.
4. Лирова Б.И., Лютикова Е.А., Сафронов А.П. и др. // Прикладная химия. 2006. №6. С. 1018. EDW: HTTSNN
5. Szogala J., Pankalla E., Turczyn R. // Materials. 2021. V. 14, No. 4. P. 844. DOI: 10.3390/ma14040844
6. Мазина Л.А., Ахметханов Р.М., Захаров В.П. и др. // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22, №4. С. 991. EDN: ZXKGZZ
7. Coltro L. et al. // Food Control. 2014. V. 44. P. 118. EDN: ZXKGZZ
8. Van Oosterhout J.T., Gilbert M. // Polymer. 2003. V. 44, No. 26. P. 8081. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.09.065
9. Brouillet S., Fugit J.L. // Polymer bulletin. 2009. V. 62, No. 6. P. 843. DOI: 10.1007/s00289-009-0055-5
10. González N., Fernández-Berridi M.J. // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 107, No. 2. P. 1294. DOI: 10.1002/app.27530
11. Гроссман Ф. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ. М.: Научные основы и технологии, 2009. 550 с.
12. Баритейн Р.С., Кириллович В.И., Носовский Ю.Е. Пластификаторы для полимеров. М.: Химия, 1982. 196 с.
13. Daniels P.H. // J. Vinyl. Addit. Technol. 2009. V.15, No. 4. P. 219. DOI: 10.1002/vnl.20211
14. Hansen C.M., Beerbower A. *Solubility parameters* // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Supplement Volume. 2nd ed. New York: Interscience, 1971. P. 889.
15. Hansen C.M. Hansen solubility parameter. A User's Handbook. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. 520 p.
16. Vikhareva I.N., Aminova G.K., Mazitova A.K. // Molecules. 2021. V. 26, No. 16. P. 4833. DOI: 10.3390/molecules26164833
17. Vikhareva I.N., Aminova G.K., Mazitova A.K. // ChemEngineering. 2021. V. 5. P. 85. DOI: 10.3390/chemengineering5040085
18. Vikhareva I.N., Aminova G.K., Mazitova A.K. // Polymers. 2022. V. 14, No. 9. P. 1888. DOI: 10.3390/polym14091888
19. Кербер М.Л., Виноградов В.Л., Головкин Г.С., Горбаткина О.А., Крыжановский В.К., Курперман А.М., Симонов-Емельянов И.Д., Халиулин В.И., Бунаков В.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2008. 506 с.
20. Matthews G. Institute of Materials London, 1996. V. 587. 379 p.
21. Козлов Н.А., Митрофанов А.Д. Физика полимеров. Владимир: Владим. гос. ун-т, 2001. 345 с.

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

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2025.

The article was submitted 10 September 2025.