

**Ильназ И. Зарипов, Ильнар И. Зарипов, А. В. Мухамадияров,
Ф. С. Сафронов, Р. Р. Мухамедзянов, А. К. Мазитова**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ ДИКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ И ОКСИЭТИЛИРОВАННЫХ СПИРТОВ

Ключевые слова: пластификатор, параметры растворимости Хансена, совместимость, глутарат, адипинат, азелаинат, себацинат, оксиэтилированные спирты, поливинилхлорид, критическая температура растворения, динамический механический анализ (ДМА).

В настоящей работе представлены результаты теоретической оценки пластифицирующего эффекта синтезированных сложноэфирных соединений на основе расчетов параметров растворимости Хансена (HSP, Hansen Solubility Parameters), которая основана на концепции, что совокупная энергия испарения жидкости состоит из трёх основных составляющих: дисперсионных сил между атомами (δ_a), дипольных взаимодействий между молекулами (δ_p) и сил взаимодействия водородных связей (δ_h), которые обусловлены обменом электронами. Расчётные данные показали незначительное расхождение между значениями δ_a , δ_p и δ_h исследуемых сложноэфирных пластификаторов и соответствующими параметрами поливинилхлорида (ПВХ), что свидетельствует о высокой совместимости данных соединений с указанным полимером. Таким образом, степень молекулярного сходства определяет интенсивность межмолекулярного взаимодействия, поскольку вещества с близкими значениями HSP характеризуются высоким сродством. Точность выполненных расчетов параметров растворимости Хансена коррелируется с экспериментальными значениями критической температуры растворения. Доказано, что разработанные сложные эфиры дикарбоновых кислот, содержащие ароматическое ядро лучше растворяют поливинилхлорид, чем аналогичные соединения алифатического ряда. Для сравнения критическая температура растворения дифеноксиптиладипината равна 134 °С, а соответствующего эфира бутоксиэтанола 147 °С. Динамический механический анализ (ДМА) полученных продуктов показал, что для всех сложных эфиров феноксиэтанола наблюдается преобразование в высокоэластичное состояние при температурах выше температуры стеклования. Установлено, что физико-механические свойства ПВХ-композиций значительно зависят от молекулярной структуры исследуемых соединений. Согласно полученным данным ДМА, эфиры оксиэтилированного бутанола по значению модуля упругости сопоставимы с промышленными пластификаторами ДОФ и ДОА. Дополнительно исследовано влияние содержания пластификаторов на твердость композиции по Шору А. Установлено, что структура сложноэфирных молекул оказывает выраженное влияние на данный показатель. Так, для достижения эталонной твердости, соответствующей применению ДОФ (70 усл. ед.), требуемое количество дибутоксиэфиров составляет на 5,1% (ДБЭС), 8,5% (ДБЭАз) и 18,6% (ДБЭГ) меньше, тогда как в случае феноксиэфиров, наоборот, необходимо увеличение их доли в рецептуре от 9% до 22%. Следовательно, дибутоксиэфиры дикарбоновых кислот демонстрируют более высокую эффективность в качестве пластификаторов по сравнению с ароматическими аналогами, хотя последние обладают большей растворяющей способностью.

**Илназ И. Зарипов, Ильнар И. Зарипов, А. В. Мухамадияров,
Ф. С. Сафронов, Р. Р. Мухамедзянов, А. К. Мазитова**

STUDY OF THE PLASTICIZING EFFECT OF DICARBOXYLIC ACIDS AND OXYETHYLATED ALCOHOLS

Keywords: plasticizer, Hansen solubility parameters, compatibility, efficiency, glutarate, adipate, azelaic acid, sebacate, ethoxylated alcohols, polyvinyl chloride, critical solution temperature, dynamic mechanical analysis (DMA).

This paper presents the results of a theoretical evaluation of the plasticizing effect of the synthesized ester compounds based on the calculations of the Hansen solubility parameters (HSP), which is based on the concept that the total energy of liquid evaporation consists of three main components: dispersion forces between atoms (δ_a), dipole interactions between molecules (δ_p) and hydrogen bond interaction forces (δ_h), which are caused by electron exchange. The calculated data showed a slight discrepancy between the δ_a , δ_p and δ_h values of the studied ester plasticizers and the corresponding parameters of polyvinyl chloride (PVC), which indicates a high compatibility of these compounds with this polymer. Thus, the degree of molecular similarity determines the intensity of intermolecular interaction, since substances with close HSP values are characterized by high affinity. The accuracy of the performed calculations of the Hansen solubility parameters correlates with the experimental values of the critical dissolution temperature. It has been proven that the developed esters of dicarboxylic acids containing an aromatic ring dissolve polyvinyl chloride better than similar compounds of the aliphatic series. For comparison, the critical dissolution temperature of diphenoxyethyl adipate is 134 °C, and that of the corresponding butoxyethanol ester is 147 °C. Dynamic mechanical analysis (DMA) of the obtained products showed that all phenoxyethanol esters undergo transformation into a highly elastic state at temperatures above the glass transition temperature. It has been established that the physicochemical properties of PVC compositions significantly depend on the molecular structure of the compounds under study. According to the obtained DMA data, esters of oxyethylated butanol are comparable in elastic modulus to industrial plasticizers DOP and DOA. Additionally, the effect of plasticizer content on the composition hardness according to Shore A was studied. It was found that the structure of ester molecules has a pronounced effect on this indicator. Thus, to achieve the reference hardness corresponding to the use of DOP (70 conventional units), the required amount of dibutoxy esters is 5.1% (DBES), 8.5% (DBEAz) and 18.6% (DBEG) less, whereas in the case of phenoxy esters, on the contrary, it is necessary to increase their

share in the formulation from 9% to 22%. Consequently, dibutoxy esters of dicarboxylic acids demonstrate higher efficiency as plasticizers compared to aromatic analogues, although the latter have greater dissolving capacity.

Введение

Зависимость отечественных предприятий от импортных поставок сырьевых компонентов создает необходимость в разработке новых материалов и технологий, особенно в таких ключевых отраслях, как нефтепереработка и производство полимеров.

Производство пластификаторов для поливинилхлорида (ПВХ) является важным направлением, учитывая его широкое применение в различных отраслях, включая строительство, упаковку и электронику [1]. Основное назначение пластификаторов регулирование термомеханических и реологических свойств композиции для улучшения технологии. Одним из основных требований к добавкам для ПВХ является отсутствие миграции из полимера и постоянство свойств в течение всего периода эксплуатации материала.

Диоктилфталат (ДОФ) долгое время был основным пластификатором для ПВХ благодаря своей эффективности и доступности [2]. Однако его негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека стало причиной поиска альтернативных решений [3-5].

Разработка бесфталатных пластификаторов на основе дикарбоновых кислот представляет собой перспективное направление [6-8]. Такие пластификаторы могут обладать следующими преимуществами:

- экологическая безопасность: бесфталатные пластификаторы менее токсичны и имеют меньший негативный эффект на окружающую среду;
- сравнимая эффективность: при правильном подборе рецептуры они могут обеспечивать аналогичные или даже лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными пластификаторами;
- широкий спектр применения: новые пластификаторы могут быть адаптированы для различных типов полимеров и условий эксплуатации;
- снижение зависимости от импорта: разработка экологически безопасных материалов и развития отечественного производства.

Таким образом, исследования в области создания бесфталатных пластификаторов не только отвечают требованиям современного рынка, но и способствуют устойчивому развитию промышленности.

Методы исследования

Синтез сложных эфиров проводили в круглодонном реакторе, оборудованном обратным холодильником с ловушкой Дина-Старка, термометром и магнитной мешалкой, загружали расчетное количество дикарбоновой кислоты, оксиэтилированного спирта и катализатора. Реакцию проводили при температуре кипения реакционной массы до образования расчетного количества воды в насадке Дина-Старка. По окончании реакции реакционную смесь охлаждали. Выделение целевого

эфира проводили в зависимости от агрегатного состояния полученного пластификатора.

Для вычисления параметров растворимости Хансена применяли метод групповых вкладов согласно следующим уравнениям (1-3):

$$\delta_d = \sqrt{\frac{\sum \Delta v \delta_d^2}{\sum \Delta v}}, (\text{МДж/м}^3)^{1/2} \quad (1)$$

$$\delta_p = \sqrt{\frac{\sum \Delta v \delta_p^2}{\sum \Delta v}}, (\text{МДж/м}^3)^{1/2} \quad (2)$$

$$\delta_h = \sqrt{\frac{\sum \Delta v \delta_h^2}{\sum \Delta v}}, (\text{МДж/м}^3)^{1/2} \quad (3)$$

Согласно Хансену, область растворимости полимера представлена сферой с радиусом R_0 . Для ПВХ этот радиус равен 8.2. Параметр растворимости R_A между двумя материалами, основанный на соответствующих парциальных компонентах параметра растворимости, рассчитывается по уравнению (4):

$$R_A = \sqrt{4 \cdot (\delta_{d_2} - \delta_{d_1})^2 + (\delta_{p_2} - \delta_{p_1})^2 + (\delta_{h_2} - \delta_{h_1})^2} \quad (4)$$

где R_A – расстояние от центра растворимости полимера до координат параметра растворимости пластификаторов; δ_d , δ_p , δ_h – параметры растворимости, соответствующие дисперсионному, полярному взаимодействию и взаимодействию за счет водородных связей, при этом индексы 1 и 2 относятся к полимеру и пластификатору соответственно.

Методом динамического механического анализа (ДМА) исследовали влияние синтезированных пластификаторов, а также ДОФ и ДОО на молекулярную подвижность и температурные переходы пластифицированного ПВХ. Анализ проводили на приборе NETZSCH DMA-242 в режиме растяжения, в интервале температур от минус 80 °С до плюс 100 °С, при частоте 1 Гц в атмосфере азота, подаваемого со скоростью 100 мл/мин, измеряя изменение комплексного модуля упругости на постоянной частоте при повышении температуры полимерного образца.

Экспериментальная часть

Приведены результаты по получению и определению физико-химических характеристик дибутоксиэтил- и дифеноксипропил- глутаратов, адипинатов, азелаинатов и себацатов. Спиртовыми компонентами служили оксиэтилированные бутанол и фенол, модифицированные по цепи с добавлением одной этиленоксигруппы.

На основании выбранных реагентов были синтезированы следующие сложноэфирные соединения (таблица 1).

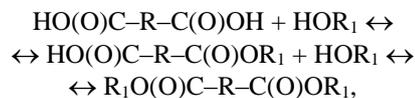
Таблица 1 – Синтезированные сложноэфирные соединения**Table 1 – Synthesized ester compounds**

Наименование	Условное обозначение
Дибутоксиэтилглутарат	ДБЭГ
Дифеноксиэтилглутарат	ДФЭГ
Дибутоксиэтиладипинат	ДБЭА
Дифеноксиэтиладипинат	ДФЭА
Бензилфеноксиэтиладипинат	БФЭА
Дибутоксиэтилазелаинат	ДБЭАз
Дифеноксиэтилазелаинат	ДФЭАз
Дибутоксиэтилсебацинат	ДБЭС
Дифеноксиэтилсебацинат	ДФЭС

Процесс синтеза осуществлялся методом прямой этерификации соответствующих дикарбоновых кислот оксиэтилированными спиртами. Реакции проводились в стеклянном реакторе с обратным

холодильником в атмосфере инертного газа (азота) с использованием п-толуолсульфонокислоты в качестве кислотного катализатора. Для удаления образующейся воды применялся метод азеотропной отгонки с толуолом.

Общая схема синтеза имеет следующий вид (схема 1):



где R = $-(\text{CH}_2)_3-$, $-(\text{CH}_2)_4-$, $-(\text{CH}_2)_7-$, $-(\text{CH}_2)_8-$;
R₁ = C₄H₉OC₂H₄-, C₆H₅OC₂H₄-

**Схема 1
Scheme 1**

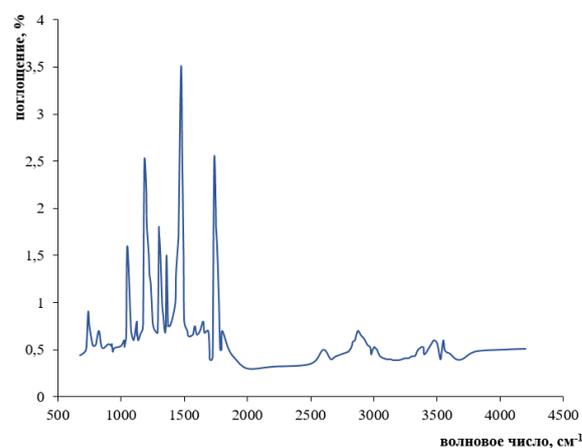
В таблице 2 приведены физико-химические свойства полученных целевых сложных эфиров.

Таблица 2 – Физико-химические свойства полученных целевых сложных эфиров**Table 2 – Physicochemical properties of the obtained target esters**

Показа-тель	ДБЭГ	ДФЭГ	ДБЭА	ДФЭА	БФЭА	ДБЭАз	ДФЭАз	ДБЭС	ДФЭС
Плотность, d_4^{20}	0.989	–	1.000	–	–	0.989	–	0.940	–
Кислотное число, мг КОН / г	0.23	0.25	0.15	0.20	0.17	0.19	0.20	0.19	0.20
Показатель преломления n_D^{20}	1.4328	–	1.4440	–	–	1.4548	–	1.4541	–
Эфирное число, мг КОН / г	307	291	321	289	293	289	296	289	296
Молекулярная масса, вычислено	32.35	402.32	346.00	386.00	337.00	386.35	326.32	386.35	326.32
Массовая доля летучих веществ, %	0.30	0.24	0.70	0.50	0.45	0.21	0.17	0.18	0.14
Выход, %	87.0	85.0	87.5	86.9	88.1	86.0	83.0	84.0	81.0
Время реакции, мин	125	169	130	200	240	146	240	140	250
Максимальная температура реакции, °С	118	125	120	127	120	120	127	120	127

Сложные эфиры дикарбоновых кислот получали по методу «Опыт-точка» с двух- или трехкратным воспроизведением эксперимента. Определены их физико-химические свойства, выход эфиров не менее 81% на очищенный продукт. Строение полученных диэфиров на примере дибутоксипил и дифеноксиэтилглутаратов подтверждена ИК-спектрами (рис. 1,2).

На приведенных ИК-спектрах отсутствуют полосы поглощения в области 1685–1687 см⁻¹, характерные для валентных колебаний карбонильной группы в алифатических карбоновых кислотах, в области 1740-1650 см⁻¹, указывающие на наличие группы С=О карбоновых кислотах. При этом в спектрах присутствуют полосы поглощения 1737 см⁻¹ соответствующие валентным колебаниям карбонильной группы в сложных эфирах, полоса

**Рис. 1 – ИК-спектр дибутоксипилглутарата
Fig. 1 – IR spectrum of dibutoxyethyl glutarate**

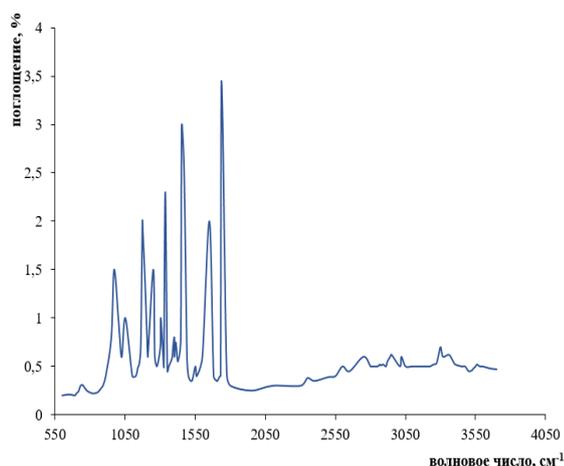


Рис. 2 – ИК-спектр дифеноксиэтилглутарата

Fig. 2 – IR spectrum of diphenoxyethyl glutarate

поглощения 1173 cm^{-1} относящаяся к колебаниям эфирной группы C–O–C, а также две интенсивные полосы 1330 cm^{-1} и 1050 cm^{-1} полосы симметричных и ассиметричных колебаний CO связей групп CO₂.

Наличие ароматического фрагмента в молекуле подтверждается полосами поглощения 1625 cm^{-1} характерных для C=C и 1250 cm^{-1} свидетельствующих о присутствии группы C–H.

Результаты исследований и их обсуждение

Для разработки эффективных пластификаторов для полимерных материалов, в частности для поливинилхлорида (ПВХ), необходимо учитывать совокупность требований, предъявляемых к структуре и физико-химическим характеристикам добавки. Среди них основное значение имеют высокая степень совместимости с полимерной матрицей, низкая летучесть, пониженная температура застывания, отсутствие запаха, высокая гидрофобность, а также минимальное токсикологическое воздействие на человека и окружающую среду [9, 10].

Наиболее критичным фактором, определяющим возможность практического применения того или иного сложноэфирного соединения в качестве пластификатора, является его термодинамическая совместимость с ПВХ. Однако прямое экспериментальное определение данного показателя представляет собой ресурсозатратный и трудоёмкий процесс. В связи с этим особый интерес представляет использование теоретических подходов, в частности – расчетных методов оценки совместимости на основе параметров растворимости Хансена (Hansen Solubility Parameters, HSP).

Концепция HSP основана на предположении, что энергия испарения жидкости состоит из трёх независимых компонентов, каждый из которых отражает определённый тип межмолекулярного взаимодействия [11, 12]. К ним относятся:

– дисперсионные взаимодействия (δ_d), обусловленные флуктуациями электронной плотности;

– диполь-дипольные взаимодействия (δ_p), возникающие между молекулами с постоянными дипольными моментами;

– водородные связи (δ_h), отражающие способность молекул образовывать специфические донорно-акцепторные взаимодействия с участием атомов водорода.

Для достижения высокой совместимости необходимо, чтобы расстояние от центра растворимости пластификаторов (R_A) было меньше области растворимости полимера (R_0). Соотношение R_A/R_0 получило название «красное» число (RED) (5), которое отражает относительную разницу энергий:

$$RED = R_A/R_0 \quad (5)$$

Число RED , равное 0, свидетельствует об отсутствии разницы в энергии, тогда как значение до 1.0 указывает на высокое сродство. Значение RED , равное или близкое к 1.0, считается пограничным условием, и при дальнейшем увеличении этого показателя наблюдается снижение совместимости. Более совместимыми являются дибутоксиэфиры исследуемых кислот.

Подробный расчет параметров растворимости Хансена для эфиров дикарбоновых кислот описан в работах [13, 14].

Следующим этапом нашего исследования стало экспериментальное определение совместимости полученных соединений с ПВХ. Как видно из таблицы 3 критическая температура растворения ($T_{кр}$ или КТР) разработанных пластификаторов лежит ниже температуры разложения полимера (160 °C), а именно от 138 до 148 °C, то есть предложенные продукты отвечают современным требованиям технологии производства полимерных композиций, поэтому возникла необходимость детального изучения совместимости их с поливинилхлоридом. Такие добавки применяются исключительно в качестве первичного пластификатора, которые в настоящее время востребованы при производстве эластичных поливинилхлоридных композиций [15].

Таблица 3 – $T_{кр}$ и параметр A разработанных сложноэфирных соединенийTable 3 – T_{cr} and parameter A of the developed ester compounds

Наименование пластификатора	$T_{кр}$, °C	Параметр A , %
ДБЭГ	148	81,0
ДФЭГ	138	87,0
ДБЭА	138	87,0
ДФЭА	134	89,6
БФЭА	137	87,6
ДБЭАз	141	85,0
ДФЭАз	130	92,0
ДБЭС	147	83,0
ДФЭС	133	90,0

В настоящее время в качестве стандартного пластификатора применяется диоктилфталат (ДОФ), и степень совместимости новых пластификаторов оценивается относительно этого промышленного образца. В работе приведены данные по расчету параметра совместимости (А) по следующей формуле (6):

$$A = \frac{T_{\text{ДОФ}}}{T_{\text{кр}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $T_{\text{ДОФ}}$ – КТР полимера в ДОФ; $T_{\text{кр}}$ – КТР полимера в разработанной добавке.

Следующим шагом при определении практической возможности использования новых сложнэфирных соединений было исследование влияния низких температур на гибкость полимерных компаундов ($T_{\text{см}}$, таблица 4). В таблице 4 представлены температурные показатели (рис. 3-4), характеризующие физико-механические изменения пластика. Все испытания проводили на базовых композициях (контроль – ДОФ и ДОА).

Таблица 4 – Результаты ДМА разработанных пластификаторов

Table 4 – Results of DMA of developed plasticizers

Пласти-фикатор	E, МПа	T_n , °C	$T_{\text{см}}$, °C	T_k , °C	$T_{\text{igd max}}$, °C	$T_k - T_n$
ДБЭГ	3200	-62	-37.1	17.3	23.7	79.3
ДФЭГ	800	-17.1	11.0	26.6	32	43.7
ДБЭА	8400	-57.5	-29.4	18.4	23.8	75.9
ДФЭА	5950	-17.2	7.4	23.2	29.6	40.4
БФЭА	5780	-27.6	3.3	22	29.1	49.6
ДБЭАз	4470	-56.2	-38.3	3.2	24.0	59.4
ДФЭАз	900	-26.1	-14.6	10.5	19.7	36.6
ДБЭС	6250	-77	-39.6	4.9	16.9	81.9
ДФЭС	930	-32.7	-19.9	4.0	15.7	36.7
ДОФ	5800	-29	-26.2	23.2	30	52.6
ДОА	3350	-76.4	-47.7	3.2	24.0	79.6

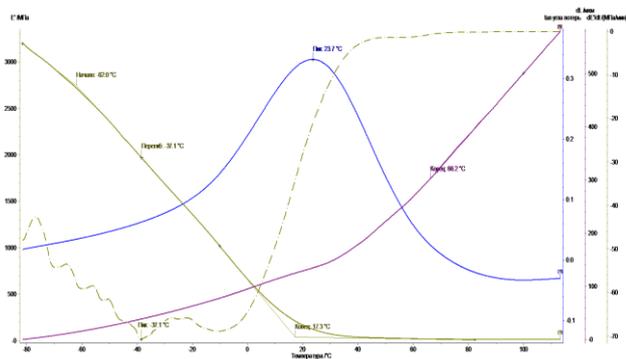


Рис. 3 – Термограмма ДМА для ПВХ, пластифицированного ДБЭГ
Fig. 3 – DMA thermogram for PVC plasticized with DBEG

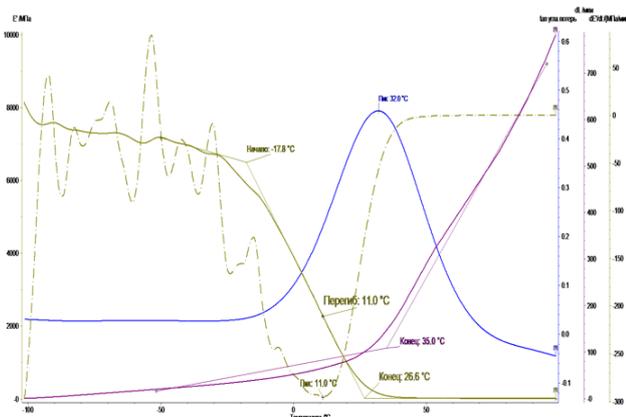


Рис. 4 – Термограмма ДМА для ПВХ, пластифицированного ДФЭГ
Fig. 4 – DMA thermogram for PVC plasticized with DPEG

Динамический механический анализ позволяет выявлять температурные переходы, характерные для каждого исследуемого полимерного образца, при постоянной частоте в широком температурном диапазоне, а также выявить влияние молекулярного строения пластификатора на протекание этих процессов.

Влияние химического строения сложных эфиров на физико-механические свойства ПВХ-пластиков проявляется в значительной степени. Так, разработанные эфиры оксиэтилированного бутанола обеспечивают значения модуля упругости, сопоставимые с показателями традиционно используемых промышленных пластификаторов, таких как ДОФ и ДОА.

Температурный интервал α -релаксации ($\Delta T = T_k - T_n$) для ПВХ-композиций, содержащих дибутоксиэфиры, оказался шире по сравнению с композициями на основе дифеноксиэфиров. В частности, значения ΔT для ДБЭГ, ДБЭА, ДБЭАз и ДБЭС составили 79,3 °C, 75,9 °C, 59,4 °C и 81,9 °C соответственно. В то же время, для дифеноксиэфиров эти значения составили: ДФЭГ – 43,7 °C, ДФЭА – 40,4 °C, ДФЭАз – 36,6 °C, ДФЭС – 36,7 °C. Сужение температурного интервала перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное свидетельствует о более концентрированном температурном диапазоне активизации сегментальной подвижности макромолекул [16].

Структурные особенности молекул сложных эфиров оказывают значительное влияние на поведение ПВХ-пластиков при термонагрузке. Применение линейных алифатических дибутоксиэфиров дикарбоновых кислот способствует

увеличению подвижности макромолекулярных цепей, что улучшает эластичность материала при пониженных температурах. В противоположность этому, использование дифеноксифункционализированных эфиров приводит к снижению сегментальной подвижности, хотя такие соединения демонстрируют более высокую термодинамическую совместимость с полимерной матрицей.

Одним из ключевых показателей эффективности пластификатора является так называемый *фактор замещения*, отражающий количество исследуемого пластификатора, необходимое для достижения твердости материала, сопоставимой с твердостью, обеспечиваемой стандартным промышленным пластификатором ДОФ [17, 18].

Рассматриваемый показатель определяется в соответствии с формулой (7), где в числителе указывается массовая доля разработанного пластификатора, необходимого для достижения заданных эксплуатационных характеристик композиции:

$$\text{Фактор замещения} = \frac{\text{Содержание ПФ, масс.ч.}}{\text{Содержание ДОФ, масс.ч.}} \quad (7)$$

На рис. 5 приведены результаты исследования влияния количества разработанных добавок на твердость по Шору [14].

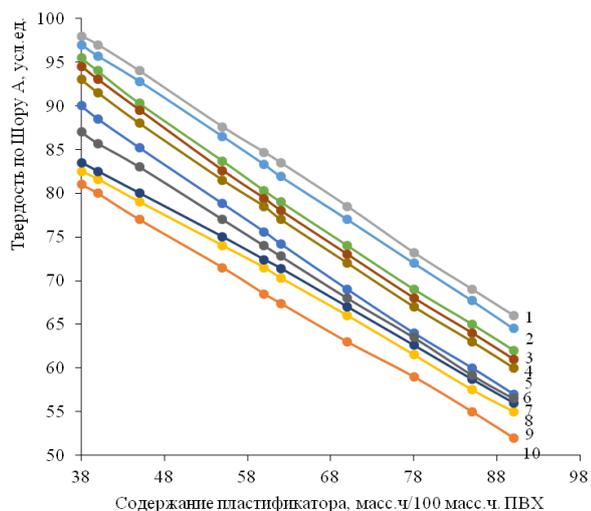


Рис. 5 – Влияние содержания добавок на твердость по Шору: 1-5 – дифеноксипроизводные исследуемых дикарбоновых кислот; 6 – ДОФ; 7-10 – дибутоксиэфиры соответствующих кислот

Fig. 5 – Effect of additive content on Shore hardness: 1-5 – diphenoxyethyl esters of the studied dicarboxylic acids; 6 – DOP; 7-10 – dibutoxyethyl esters of the corresponding acids

Анализ полученных данных свидетельствует о существенном влиянии радикальной структуры молекул сложных эфиров на показатель твердости ПВХ-пластиков по шкале Шора А. В качестве эталонного значения принята твердость материала, пластифицированного промышленным диоктилфталатом (ДОФ), составляющая 70 усл. ед. Для достижения аналогичного уровня твердости требуется на 5,1% меньше ДБЭС, на 8,5% ДБЭАз и

на 18,6 % ДБЭГ, по сравнению с ДОФ. Напротив, при использовании соответствующих эфиров феноксиэтанола наблюдается необходимость увеличения их содержания в рецептуре на 9–22 % для достижения сопоставимых значений твердости. Таким образом, дибутоксиэфиры дикарбоновых кислот проявляют более высокую пластифицирующую эффективность по сравнению с соответствующими эфирами ароматических спиртов, хотя последние характеризуются лучшими растворяющими свойствами по отношению к полимерной матрице.

Заключение

Приведены результаты сравнительной характеристики двух групп эфиров – бутоксиэтил- и феноксиэтилпроизводных с точки зрения их способности растворять ПВХ и эффективно модифицировать его физико-механические свойства.

Результаты экспериментов продемонстрировали, что сложные эфиры феноксиэтанола обладают более высокой растворяющей способностью по отношению к поливинилхлориду по сравнению с соответствующими бутоксиэтилпроизводными тех же кислот. Это преимущество обусловлено большей полярностью и способностью к специфическим взаимодействиям ароматических групп с функциональными участками полимерной цепи. Однако, несмотря на лучшую термодинамическую совместимость, феноксиэфиры показали менее выраженное пластифицирующее действие. В частности, значения модуля упругости и температуры стеклования у композиций с их применением были выше, чем у аналогов на основе бутоксисоединений, что свидетельствует о меньшей способности фенольных эфиров снижать сегментную подвижность макромолекул ПВХ.

Выводы о различиях в эффективности между двумя классами соединений получили подтверждение на основе комплексного анализа, включающего как экспериментальное определение критической температуры растворения, так и расчет значений параметров растворимости по Хансену. Установлена высокая степень корреляции между экспериментальными и расчетными данными, что подтверждает достоверность полученных результатов и обоснованность выбранного подхода к оценке совместимости компонентов в полимерных композициях.

Таким образом, бутоксиэфиры дикарбоновых кислот могут рассматриваться как более перспективные пластификаторы для ПВХ, сочетая удовлетворительную совместимость с матрицей и высокую эффективность в модификации эксплуатационных характеристик материала. Полученные данные могут быть применены при создании новых формуляций пластификаторов с улучшенным экологическим профилем и сбалансированными свойствами.

Литература

1. Патент РФ 2.716.691 (2019).

2. М. Шиллер, *Добавки к ПВХ. Состав, свойства, применение*. Профессия, Санкт-Петербург, 2017. 400 с.
3. А.К. Мазитова, И.Н. Вихарева, Г.К. Аминова, А.А. Тимофеев, Е.А. Буйлова, Р.Ш. Дистанов, *Нанотехнологии в строительстве*. **11**, 4, 437-446 (2019). DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-696-705.
4. И.И. Зарипов, А.Ф. Яковлева, Е.А. Тайлакова, Л.З. Рольник, А.К. Мазитова, *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал*. **4**, 141-155 (2023). DOI: <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2023-4-141-155>.
5. А.К. Мазитова, И.Н. Вихарева, И.И. Зарипов, Е.А. Буйлова, И.Р. Ахметов, *Башкирский химический журнал*. **27**, 1, 44-47 (2020). DOI: 10.17122/bcj-2020-1-44-47.
6. А.К. Mazitova, I.N. Vikhareva, G.K. Aminova, J.N. Savicheva, *Polymers*. **12**, Article 1728 (2020). DOI: 10.3390/polym12081728.
7. Р.С. Барштейн, В.И. Кириллович, Ю.Е. Носовский, *Пластификаторы для полимеров*. Химия, Москва, 1982. 196 с.
8. А.К. Мазитова, Г.К. Аминова, Е.А. Буйлова, И.И. Зарипов, И.Н. Вихарева, *Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал*. **13**, 2, 73-78 (2021). DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-73-78.
9. Патент РФ 2.798.938 (2023).
10. А.К. Мазитова, И.И. Зарипов, Г.К. Аминова, *Башкирский химический журнал*. **31**, 1, 57-61 (2024). DOI: 10.17122/bcj-2024-1-57-61.
11. R.F. Boyer, *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*. **34**, 357-362 (1951).
12. К. Тиниус, *Пластификаторы*. Химия, Москва, 1964. 916 с.
13. А.К. Мазитова, И.И. Зарипов, А.В. Мухамадияров, Г.К. Аминова, *Бутлеровские сообщения*. **77**, 3, 48-51 (2024). – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-77-3-48.
14. И.И. Зарипов. Дисс. канд. хим. наук, УГНТУ, Уфа, 2024. 130 с.
15. E. Stefanis, C. Panayiotou, *Internet journal Thermophysic*. **29**, 568-585 (2008). DOI: 10.1007/s10765-008-0415-z.
16. Б.П. Штаркман, *Пластификация поливинилхлорида*. Химия, Москва, 1975. 248 с.
17. Н.А. Козлов, А.Д. Митрофанов, *Физика полимеров*. Владимирский государственный университет, Владимир, 2001. 345 с.
18. Динь Ингок Хынг. Дисс. канд. техн. наук, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2001. 93 с.
2. M. Schiller, *Additives to PVC. Composition, properties, application*. Profession, St. Petersburg, 2017. 400 p.
3. A.K. Mazitova, I.N. Vikhareva, G.K. Aminova, A.A. Timofeev, E.A. Builova, R.Sh. Distanov, *Nanotechnologies in construction*. **11**, 4, 437-446 (2019). DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-696-705.
4. I.I. Zaripov, A.F. Yakovleva, E.A. Tailakova, L.Z. Rolnik, A.K. Mazitova, *Oil and gas business: electronic scientific journal*. **4**, 141-155 (2023). DOI: <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2023-4-141-155>.
5. A.K. Mazitova, I.N. Vikhareva, I.I. Zaripov, E.A. Builova, I.R. Akhmetov, *Bashkir Chemical Journal*. **27**, 1, 44-47 (2020). DOI: 10.17122/bcj-2020-1-44-47.
6. A.K. Mazitova, I.N. Vikhareva, G.K. Aminova, J.N. Savicheva, *Polymers*. **12**, Article 1728 (2020). DOI: 10.3390/polym12081728.
7. R.S. Barshteyn, V.I. Kirillovich, Yu.E. Nosovsky, *Plasticizers for polymers*. Chemistry, Moscow, 1982. 196 p.
8. A.K. Mazitova, G.K. Aminova, E.A. Builova, I.I. Zaripov, I.N. Vikhareva, *Nanotechnologies in construction: scientific Internet journal*. **13**, 2, 73-78 (2021). DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-2-73-78.
9. Russian Patent 2.798.938 (2023).
10. A.K. Mazitova, I.I. Zaripov, G.K. Aminova, *Bashkir Chemical Journal*. **31**, 1, 57-61 (2024). DOI: 10.17122/bcj-2024-1-57-61.
11. R.F. Boyer, *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*. **34**, 357-362 (1951).
12. K. Tinius, *Plasticizers*. Chemistry, Moscow, 1964. 916 p.
13. A.K. Mazitova, I.I. Zaripov, A.V. Mukhamadiyarov, G.K. Aminova, *Butlerov Communications B*. **77**, 3, 48-51 (2024). – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-77-3-48.
14. I.I. Zaripov. Diss. Cand. of Chemical Sciences, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, 2024. 130 p.
15. E. Stefanis, C. Panayiotou, *Internet journal Thermophysic*. **29**, 568-585 (2008). DOI: 10.1007/s10765-008-0415-z.
16. B.P. Shtarkman, *Plasticization of polyvinyl chloride*. Chemistry, Moscow, 1975. 248 p.
17. N.A. Kozlov, A.D. Mitrofanov, *Physics of Polymers*. Vladimir State University, Vladimir, 2001. 345 p.
18. Dinh Ingoc Hung. Diss. Cand. of Technical Sciences, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 2001. 93 p.

References

1. Russian Patent 2.716.691 (2019).

© **Ильназ И. Зарипов** – канд. хим. наук, доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины» (ПЕНД), Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), Уфа, Россия, ilnaz.zaripov1996@mail.ru; **Ильнар И. Зарипов** – аспирант кафедры «Общая, аналитическая и прикладная химия» (ОАПХ), УГНТУ, ilnar.zaripov.1998@mail.ru; **А. В. Мухамадияров** – аспирант кафедры ОАПХ, УГНТУ, mukhamadav@yandex.ru; **Ф. С. Сафронов** – аспирант кафедры ОАПХ, УГНТУ, safonov.ufa@gmail.com; **Р. Р. Мухамедзянов** – соискатель кафедры «Строительные конструкции», УГНТУ, mukhamedzyanov.radik@mail.ru; **А. К. Мазитова** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой ПЕНД, УГНТУ, elenaasf@yandex.ru.

© **Ilnaz I. Zaripov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Applied and Natural Sciences (ANS), Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russia, ilnaz.zaripov1996@mail.ru; **Ilnar I. Zaripov** – PhD-Student, Department of General, Analytical and Applied Chemistry (GAACH), USPTU, ilnar.zaripov.1998@mail.ru; **A. V. Mukhamadiyarov** – PhD-Student, the GAACH department, USPTU, mukhamadav@yandex.ru; **F. S. Safronov** – PhD-Student, the GAACH department, USPTU, safonov.ufa@gmail.com; **R. R. Mukhamedzyanov** – PhD-student of the Department of Building Structures, USPTU, mukhamedzyanov.radik@mail.ru; **A. K. Mazitova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Head of the ANS department, USPTU, elenaasf@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 18.06.25.