



ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИФИКАЦИИ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА С ГОССИПОЛОВОЙ СМОЛЫ И ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДНЫМИ АЗОФЕНОЛА

Мухиддинов Б.Ф. ¹[0009-0006-2411-2914], **Қаршиев Б.Ф.** ²[0009-0006-2367-0367]
Жураев И.И. ³[0009-0008-6550-2980], **Истамов Х.Й.** ⁴[0009-0008-6550-2980]

¹Доктор химических наук, профессор кафедры «Химическая технология» НГГТУ
E-mail: muhiddinov.bf@gmail.com

²Ассистент кафедры «Химическая технология» НГГТУ
E-mail: gbekzod914@gmail.com

³Доктор химических наук, заведующий кафедрой «Химическая технология» НГГТУ
E-mail: kimyo8585@mail.ru

⁴Phd, старший преподаватель кафедры «Химическая технология» НГГТУ
E-mail: hayot.istamov.job@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования пластификации поливинилхлорида марки SG-5 очищенной госсиполовой смолой — продуктом переработки отходов масложировой промышленности — и термостабилизации полученных композиций пропаргильевыми производными азофенола и азонафтолов. Термомеханическим методом установлено, что увеличение содержания очищенной госсиполовой смолы от 5,0 до 30,0 масс.% приводит к монотонному снижению температуры стеклования ПВХ с 80 до 53 °С и условной температуры перехода в вязкотекучее состояние с 196 до 174 °С, с одновременным расширением интервала высокоэластического состояния. Дериватографическим методом показано, что госсиполовая смола оказывает частично термостабилизирующее действие: температура начала разложения повышается от 165 до 178 °С, а массовые потери при 300 °С снижаются от 20,68% до 16,87%. Реологические испытания подтвердили улучшение перерабатываемости: показатель текучести расплава при 20,0 масс.% госсиполовой смолы составил 17,5 г/10 мин, эффективная вязкость — 1,2892 Н·с/м². Физико-механические испытания выявили экстремальный характер зависимости прочности от концентрации пластификатора с оптимумом при 20,0 масс.%. Исследование термостабилизирующего действия четырех пропаргильевых производных азофенола и азонафтолов позволило установить ряд эффективности: ДПДЭАФ > ДПДЭАФР > п-ДПДЭАФ > ФАНПЭ. Критическая концентрация наиболее эффективного стабилизатора 2,2'-дипропаргильевого диэфира азофенола (ДПДЭАФ) составляет $7,04 \cdot 10^{-2}$ моль/кг (2,0 масс.%), при которой температура начала разложения возрастает с 227 до 293 °С. Данными ИК- и ЭПР-спектроскопии подтверждено ингибирование радикально-цепных процессов термодеструкции и уменьшение числа парамагнитных частиц с $0,91 \cdot 10^{17}$ до $0,18 \cdot 10^{17}$. Полученные результаты позволяют рекомендовать очищенную госсиполовую смолу как полифункциональный пластификатор ПВХ, а пропаргильевые производные азофенола — как перспективные органические термостабилизаторы.

Ключевые слова: поливинилхлорид, госсиполовая смола, пластификация, термостабилизация, азофенол, азонафтол, пропаргильевые производные, дегидрохлорирование, термомеханический анализ, ИК-спектроскопия.

Annotatsiya. Maqolada SG-5 markali polivinilxloridni yog'-moy sanoati chiqindilari qayta ishlash mahsuloti — tozalangan gossipol smolasi bilan plastifikatsiyalash va olingan kompozitsiyalarni azofenol va azonafollarning propargilik hosilalari bilan termostabilizatsiyalash bo'yicha kompleks tadqiqot natijalari taqdim etilgan. Termomexanik usul yordamida tozalangan gossipol smolasi miqdorini 5,0 dan 30,0 mass.% gacha oshirish PVXning shishlanish haroratini 80 dan 53 °C gacha va qovushqoq-oqar holatga o'tish haroratini 196 dan 174 °C gacha monoton pasayishiga olib kelishi aniqlangan. Derivatografik usul bilan gossipol smolasining qisman termostabilizatsiyalovchi ta'sir ko'rsatishi ko'rsatilgan: parchalanish boshlanish harorati 165 dan 178 °C gacha oshgan, 300 °C da massa yo'qotish 20,68% dan 16,87% gacha kamaygan. Reologik sinovlar qayta ishlanuvchanlikning yaxshilanishini tasdiqlagan. To'rt xil propargilik hosilaning termostabilizatsiyalovchi samaradorlik qatori belgilangan: DPDAAF > DPDAFAR > p-DPDAAF > FANPE. Eng samarali stabilizator DPDAAF ning kritik konsentratsiyasi $7,04 \cdot 10^{-2}$ mol/kg (2,0 mass.%) ni



tashkil etadi. IK- va EPR-spektroskopiya ma'lumotlari termodestruksiyaning radikal-zanjirli jarayonlari inhibirlanishini tasdiqlagan.

Kalit so'zlar: polivinilxlorid, gossipol smolasi, plastifikatsiya, termostabilizatsiya, azofenol, azonaftol, propargilik hosilalar, degidroxlorlanish, termomexanik tahlil, IK-spektroskopiya.

Annotation. The paper presents a comprehensive study of the plasticization of polyvinyl chloride grade SG-5 with purified gossypol resin — a product of oil-and-fat industry waste processing — and the thermostabilization of the resulting compositions with propargyl derivatives of azophenol and azonaphthols. Thermomechanical analysis established that increasing the purified gossypol resin content from 5.0 to 30.0 wt.% leads to a monotonic decrease in the glass transition temperature of PVC from 80 to 53 °C and the temperature of transition to viscous flow from 196 to 174 °C. Derivatographic analysis demonstrated a partial thermostabilizing effect of the resin: the onset temperature of decomposition increased from 165 to 178 °C. Rheological tests confirmed improved processability. The thermostabilizing efficiency ranking of four propargyl derivatives was established: DPDAAF > DPDAFAR > p-DPDAAF > FANPE. The critical concentration of the most effective stabilizer, 2,2'-dipropargyl diether of azophenol (DPDAAF), is $7.04 \cdot 10^{-2}$ mol/kg (2.0 wt.%), at which the onset decomposition temperature increases from 227 to 293 °C. IR and EPR spectroscopy data confirmed the inhibition of radical chain processes and a decrease in the number of paramagnetic particles from $0.91 \cdot 10^{17}$ to $0.18 \cdot 10^{17}$.

Keywords: polyvinyl chloride, gossypol resin, plasticization, thermostabilization, azophenol, azonaphthol, propargyl derivatives, dehydrochlorination, thermomechanical analysis, IR spectroscopy

Введение.

Поливинилхлорид (ПВХ) относится к числу наиболее многотоннажных синтетических полимеров и широко применяется в строительстве, электротехнике, транспорте, кабельной промышленности, производстве пленок, профилей, труб, листовых материалов, медицинских и бытовых изделий [1]. Мировое производство пластических масс сохраняется на уровне сотен миллионов тонн в год, а доля ПВХ в структуре полимерного потребления остается значительной [2, 3]. В Республике Узбекистан промышленная база производства ПВХ сформирована на АО «Навоиазот», где реализован комплекс по выпуску поливинилхлорида, каустической соды и метанола [4, 5].

Переработка ПВХ осложняется тем, что температурная область размягчения и формования материала близка к температурной области начала дегидрохлорирования. При нагревании ПВХ в отсутствие эффективных модифицирующих добавок происходит выделение хлористого водорода, образование сопряженных полиеновых фрагментов, изменение окраски, снижение молекулярной массы и ухудшение эксплуатационных свойств [6–9]. Поэтому разработка композиций ПВХ с пластификаторами и термостабилизаторами, обеспечивающими расширение технологического интервала переработки, является актуальной научно-технической задачей.

Особый практический интерес представляет использование доступного местного сырья и отходов масложировой промышленности. Госсиполовая смола содержит фенольные, карбонильные и другие функциональные группы, способные участвовать в межмолекулярном взаимодействии с макромолекулами ПВХ и продуктами термодеструкции [10–12]. Её применение как пластифицирующего и частично стабилизирующего компонента может рассматриваться как технологически и экономически перспективное направление.

Другим направлением повышения термостойкости ПВХ является использование органических соединений с кратными связями, способных связывать HCl и ингибировать радикально-цепные процессы термодеструкции. Пропаргильные производные азофенола и азоафтолов представляют интерес благодаря сочетанию ароматических, азо-, феноксильных и ацетиленовых фрагментов,



потенциально способных к многофакторному взаимодействию с продуктами термического разложения полимера [13, 14].

Целью исследования является разработка термостойких композиций на основе ПВХ с улучшенной перерабатываемостью, содержащих очищенную госсиполовую смолу, а также установление влияния пропаргильных производных азофенола и азофтаолов на термические, термомеханические, реологические и физико-механические свойства материалов.

Объекты и методы исследования.

Характеристика исходных материалов

В качестве полимерной основы использовался поливинилхлорид марки SG-5 производства АО «Навоиазот», полученный суспензионной полимеризацией винилхлоридного мономера, со средней молекулярной массой 450000 [6].

Очищенная госсиполовая смола — отходы производства Каттакуртанского масложиркомбината (СТУ 89-103-61) — применялась в качестве пластифицирующего компонента. Перед введением в ПВХ она подвергалась очистке для уменьшения содержания механических примесей и низкокипящих компонентов.

В качестве термостабилизаторов были использованы четыре пропаргильных производных азофенола и азофтаолов (табл. 1).

Таблица 1.

Физико-химические характеристики соединений, использованных как термостабилизаторы ПВХ

№	Соединение	Брутто-формула	ММ	Тпл, °С	Внешний вид	Растворимость
1	4,4'-дипропаргильный диэфир азофенола (п-ДПДЭАФ)	$C_{18}H_{14}N_2O_2$	290,3 2	135 – 136	зеленый	ацетон, ацетонитрил
2	1,3-дипропаргильный диэфир 4-(фенил-азо)-резорцина (ДПДЭФАР)	$C_{18}H_{14}N_2O_2$	290,3 2	165 – 166	оранжевый	ацетон, ДМСО
3	2,2'-дипропаргильный диэфир азофенола (ДПДЭАФ)	$C_{18}H_{18}N_2O_2$	294	80– 82	–	ацетон, бензол, хлороформ
4	[1-(фенил-азо)-нафтол-2] пропаргильный эфир (ФАНПЭ)	$C_{19}H_{14}N_2O$	286,3 3	124 – 125	светло-коричневый	ацетон, бензол, хлороформ, ацетонитрил



Методика приготовления композиций

Композиции ПВХ с пластификатором готовились растворным и сухим способами. При растворном способе расчетное количество добавки растворялось в соответствующем растворителе, после чего к раствору при перемешивании вводился порошкообразный ПВХ. Полученная смесь выдерживалась до набухания полимера, затем растворитель удалялся сначала при комнатной температуре, а затем в вакуум-сушильном шкафу при 323 К до постоянной массы. Композиции с очищенной госсиполовой смолой готовились с содержанием пластификатора 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 и 30,0 масс. %.

Методы исследования

Термические свойства полимерных композиций определялись на дифференциально-термическом анализаторе DTG-60 Shimadzu в интервале температур 30–700 °С при скорости нагрева 5 °С/мин. Термомеханические испытания проводились на динамометрических весах Каргина в интервале температур от 173 до 523 К при постоянной нагрузке $0,7 \cdot 10^6$ Па. Показатель текучести расплава определялся при 493 К с использованием капилляра диаметром $2,0 \cdot 10^{-3}$ м при нагрузке 10^7 Па. Механические свойства пленочных образцов определялись на испытательной машине Shimadzu AGS-X. ИК-спектры снимались на спектрометре PerkinElmer Frontier™ IR с приставкой ATR. ЭПР-спектры регистрировались для оценки концентрации парамагнитных частиц [15, 16].

Полученные результаты и их обсуждение

Термомеханическое исследование пластификации ПВХ очищенной госсиполовой смолой

Пластификация ПВХ очищенной госсиполовой смолой оценивалась по изменению термомеханических кривых. Для исходного ПВХ температура стеклования составляла 80 °С, а условная температура перехода в вязкотекучее состояние — 196 °С. При увеличении содержания госсиполовой смолы наблюдалось монотонное снижение температуры стеклования (табл. 2).

Таблица 2.

Влияние содержания очищенной госсиполовой смолы на температурные переходы ПВХ

Композиция	Содержание ГС, масс. %	Тс, °С	Тпл, °С	Тпл – Тс, °С
ПВХ	0	80	196	116
ПВХ + ГС	5,0	73	190	117
ПВХ + ГС	10,0	67	185	118
ПВХ + ГС	15,0	62	182	120
ПВХ + ГС	20,0	58	179	121
ПВХ + ГС	30,0	53	174	122

При 30,0 масс. % пластификатора Тс снижалась с 80 до 53 °С, а условная температура перехода в вязкотекучее состояние — с 196 до 174 °С. Расширение



интервала $T_{пл} - T_c$ с 116 до 122 °С имеет технологическое значение, поскольку именно в области высокоэластического состояния материал способен перерабатываться при меньшей вероятности термодеструкции. Пластифицирующий эффект госсиполовой смолы объясняется проникновением её молекулярных фрагментов между макромолекулами ПВХ и частичным экранированием полярных взаимодействий С–Cl-содержащих звеньев.

Дериватографическое исследование

Термическая устойчивость исследовалась дериватографическим методом. Основные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительные данные термогравиметрического анализа композиций ПВХ с очищенной госсиполовой смолой

Образец	T_0 , °С	T_{10} , °С	T_{20} , °С	T_{50} , °С	B_{400} , %	B_{600} , %
ПВХ+5% ГС	165	244	302	404	63,88	90,72
ПВХ+10% ГС	167	258	313	412	62,88	89,92
ПВХ+15% ГС	171	260	316	425	61,55	88,99
ПВХ+20% ГС	174	262	321	429	60,92	87,11
ПВХ+30% ГС	178	266	328	431	59,57	86,88

С повышением концентрации госсиполовой смолы температура начала разложения увеличивалась от 165 °С для состава с 5,0 масс.% ГС до 178 °С для состава с 30,0 масс.% ГС. Температура 10%-ной потери массы повышалась от 244 до 266 °С, а температура 20%-ной потери массы — от 302 до 328 °С. Следовательно, введение очищенной госсиполовой смолы повышает термическую устойчивость ПВХ-композиций. Такой эффект связан с наличием фенольных и карбонильных групп, способных участвовать в процессах связывания активных продуктов термодеструкции и ингибирования радикальных реакций.

Реологические свойства

Увеличение содержания очищенной госсиполовой смолы приводило к повышению показателя текучести расплава и снижению эффективной вязкости. Наиболее выраженное улучшение реологических характеристик наблюдалось при содержании госсиполовой смолы выше 10 масс.%. При 20,0 масс.% ГС показатель текучести расплава составлял 17,5 г/10 мин, а эффективная вязкость — 1,2892 Н·с/м². При 30,0 масс.% ГС показатель текучести расплава возрастал до 38,7 г/10 мин, а эффективная вязкость снижалась до 0,3974 Н·с/м². Полученные результаты согласуются с термомеханическими данными и подтверждают, что очищенная госсиполовая смола способствует снижению сопротивления течению расплава и расширяет возможность переработки ПВХ традиционными методами термопластического формования.

Физико-механические свойства

Результаты механических испытаний представлены в таблице 4.



Таблица 4.

Прочностные показатели композиций ПВХ с различным содержанием очищенной госсиполовой смолы

Композиция	Сила при разрыве, Н	Удлинение, мм	Прочность при растяжении, Н/мм ²	Модуль упругости, Н/мм ²
ПВХ+5% ГС	157,861	0,69	158,963	1059,51
ПВХ+10% ГС	129,790	0,56	129,790	931,196
ПВХ+20% ГС	162,568	0,89	160,981	857,814
ПВХ+30% ГС	168,779	1,53	155,102	503,740

Изменение прочности при растяжении имеет экстремальный характер. При 10,0 масс.% ГС прочность снижалась, тогда как при 20,0 масс.% возрастала до 160,981 Н/мм². При дальнейшем повышении содержания до 30,0 масс.% прочность несколько снижалась, однако удлинение увеличивалось до 1,53 мм. Модуль упругости монотонно снижался от 1059,51 до 503,740 Н/мм², что является характерным проявлением пластификации. Наиболее сбалансированное сочетание прочности и технологичности наблюдалось для композиций с 20,0 масс.% ГС.

Термостабилизация ПВХ производными азофенола и азонафтолов

Термостабилизирующее действие оценивалось по кинетике термоокислительного дегидрохлорирования, температуре начала потери массы, данным дериватографии, ИК- и ЭПР-спектроскопии. Введение стабилизаторов приводило к увеличению индукционного периода до начала интенсивного разложения и к снижению потери массы (табл. 5).

Таблица 5.

Потери массы W композиций ПВХ и константы скорости расходования Kp производных азофенола и азонафтолов при 6 ч нагрева на воздухе

Стабилизатор	c, масс. %	c·10 ² , моль/кг	W46 3, %	W47 3, %	W48 3, %	Kp463·10 ⁴ , с ⁻¹	Kp473·10 ⁴ , с ⁻¹	Kp483·10 ⁴ , с ⁻¹
ПВХ	—	—	4,6	13,0	48,8	—	—	—
ДПДЭАФ	0,5	1,76	3,9	11,2	40,2	1,1	2,2	4,3
ДПДЭАФ	1,0	3,52	3,6	7,5	35,6			
ДПДЭАФ	2,0	7,04	2,5	6,5	29,3			
ДПДЭАФ	3,0	14,08	3,1	8,2	32,1			
ДПДЭФАР	0,5	1,76	4,1	11,6	41,3	1,5	2,9	5,3
ДПДЭФАР	1,0	3,52	3,8	7,9	36,7			
ДПДЭФАР	2,0	7,04	2,7	5,8	30,1			
ДПДЭФАР	3,0	14,08	3,3	7,2	33,8			
п-ДПДЭАФ	0,5	1,76	4,2	11,5	43,1	2,1	3,2	5,7
п-ДПДЭАФ	1,0	3,52	3,9	8,0	37,8			
п-ДПДЭАФ	2,0	7,04	3,2	7,4	31,6			
п-ДПДЭАФ	3,0	14,08	3,5	7,8	34,3			



По эффективности стабилизирующего действия исследованные соединения располагаются в ряд: ДПДЭАФ > ДПДЭАФР > п-ДПДЭАФ > ФАНПЭ. Данный ряд отражает влияние строения молекулы, числа кратных связей и характера сопряжения на способность стабилизатора связывать HCl и подавлять радикальные процессы.

Температура начала разложения исходного ПВХ составляла 227 °С. При введении ДПДЭАФ она возрастала до 270–293 °С в зависимости от концентрации. Максимальное повышение T₀ наблюдалось для композиции с 2,0 масс.% ДПДЭАФ (293 °С), для которой температуры 10 и 20%-ной потери массы составляли 314 и 326 °С соответственно.

Для наиболее эффективного стабилизатора ДПДЭАФ результаты динамического термогравиметрического анализа представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Результаты динамического термогравиметрического анализа ПВХ и композиций с ДПДЭАФ

Образец	T ₀ , °С	T ₁₀ , °С	T ₂₀ , °С	T ₅₀ , °С	B ₄₀₀ , %	B ₆₀₀ , %
ПВХ исходный	227	265	286	382	41,06	59,82
ПВХ+0,5% ДПДЭАФ	270	277	289	319	53,21	78,28
ПВХ+1,0% ДПДЭАФ	278	286	295	332	64,33	79,40
ПВХ+2,0% ДПДЭАФ	293	314	326	339	66,13	82,28
ПВХ+3,0% ДПДЭАФ	286	294	302	365	65,89	80,06

Подтверждение ингибирования термодеструкции методами ИК- и ЭПР-спектроскопии

В ИК-спектрах исходного ПВХ наблюдаются полосы поглощения в областях 3000–2900 см⁻¹ (валентные колебания C–H), 1420 см⁻¹ (деформационные колебания –CH₂–), 825 и 668 см⁻¹ (колебания C–Cl). После термодеструкции появляется полоса около 1320 см⁻¹, связанная с образованием C=C-фрагментов. В стабилизированном образце относительные изменения полос C–Cl и C–H выражены слабее, что свидетельствует о снижении степени деструкции.

Данные ЭПР-спектроскопии (табл. 7) подтвердили ингибирование радикально-цепных процессов.

Таблица 7.

Число парамагнитных частиц в полимерных остатках ПВХ после термодеструкции при 473 К

Образец	Число парамагнитных частиц, N×10 ¹⁷
ПВХ без стабилизатора	0,91
ПВХ + ДПДЭАФ, 1,76·10 ⁻² моль/кг	0,42
ПВХ + ДПДЭАФ, 7,04·10 ⁻² моль/кг	0,18

Число парамагнитных частиц снижалось с 0,91·10¹⁷ для исходного ПВХ до 0,18·10¹⁷ при критической концентрации ДПДЭАФ, что подтверждает подавление радикально-цепных процессов.



Закключение.

1. Разработаны композиции поливинилхлорида с очищенной госсиполовой смолой и пропаргильовыми производными азофенола и азонфтолов.
2. По данным термомеханического анализа установлено, что увеличение содержания очищенной госсиполовой смолы приводит к снижению температуры стеклования ПВХ от 80 до 53 °С и условной температуры перехода в вязкотекучее состояние от 196 до 174 °С.
3. Дериватографическим методом показано, что госсиполовая смола оказывает частично термостабилизирующее действие: температура начала разложения повышается от 165 до 178 °С, а массовые потери при 400 и 600 °С уменьшаются.
4. Реологическими испытаниями установлено, что введение более 10 масс.% ГС заметно повышает показатель текучести расплава и снижает эффективную вязкость, что создает предпосылки для переработки ПВХ из расплава при меньшей вероятности деструкции.
5. Физико-механические испытания показали, что модуль упругости снижается монотонно, а оптимальное сочетание прочности и деформативности наблюдается при 20 масс.% ГС.
6. Установлен ряд эффективности стабилизаторов: ДПДЭАФ > ДПДЭФАР > п-ДПДЭАФ > ФАНПЭ. Критическая концентрация наиболее эффективного стабилизатора ДПДЭАФ составляет $7,04 \cdot 10^{-2}$ моль/кг.
7. ИК- и ЭПР-спектроскопией подтверждено ингибирование радикально-цепных процессов термодеструкции ПВХ в присутствии ДПДЭАФ.

Список использованных литератур

- [1] PlasticsEurope. Plastics – the Fast Facts 2024. Brussels: Plastics Europe, 2024.
- [2] PlasticsEurope. The Circular Economy for Plastics: A European Analysis. Brussels: Plastics Europe, 2024.
- [3] ChemAnalyst. Poly Vinyl Chloride (PVC) Market Analysis: Plant Capacity, Demand and Forecast, 2015–2035. ChemAnalyst, 2026.
- [4] Fund for Reconstruction and Development of the Republic of Uzbekistan. Navoiyazot: construction of polyvinyl chloride, caustic soda and methanol production complex. Tashkent, 2024.
- [5] JSC Navoiyazot. Public information on the PVC, caustic soda and methanol production complex. Navoiy, 2024.
- [6] Saeki Y., Emura T. Technical progresses for PVC production // Progress in Polymer Science. 2002. Vol. 27, No. 10. P. 2055–2131. DOI: 10.1016/S0079-6700(02)00039-4.
- [7] Wilkes C.E., Summers J.W., Daniels C.A., Berard M.T. PVC Handbook. Munich: Hanser Publishers, 2005. 723 p.
- [8] Starnes W.H. Structural and mechanistic aspects of the thermal degradation of poly(vinyl chloride) // Progress in Polymer Science. 2002. Vol. 27, No. 10. P. 2133–2170. DOI: 10.1016/S0079-6700(02)00063-1.
- [9] Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. Thermal degradation of PVC: A review // Waste Management. 2016. Vol. 48. P. 300–314. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041.
- [10] Dowd M.K. Compositional characterization of cottonseed soapstocks // Journal of the American Oil Chemists' Society. 1996. Vol. 73. P. 1287–1295.
- [11] Kenar J.A. Reaction chemistry of gossypol and its derivatives // Journal of the American Oil Chemists' Society. 2006. Vol. 83. P. 269–302.



- [12] Dodou K. Investigations on gossypol: past and present developments // Expert Opinion on Investigational Drugs. 2005. Vol. 14. P. 1419–1434.
- [13] Zollinger H. Azo and Diazo Chemistry: Aliphatic and Aromatic Compounds. New York: Interscience Publishers, 1961. 444 p.
- [14] Smith M.B., March J. March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms, and Structure. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2013. 2080 p.
- [15] Menczel J.D., Prime R.B. Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications. Hoboken: Wiley, 2009. 688 p.
- [16] Socrates G. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2001. 366 p.
- [17] Wypych G. PVC Degradation and Stabilization. 3rd ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2020. 500 p.
- [18] Folarin O.M., Sadiku E.R. Thermal stabilizers for poly(vinyl chloride): a review // International Journal of Physical Sciences. 2011. Vol. 6, No. 18. P. 4323–4330.
- [19] Pospisil J. Chemical and photochemical behaviour of phenolic antioxidants in polymer stabilization // Polymer Degradation and Stability. 1993. Vol. 39. P. 103–115.
- [20] Ingold K.U., Pratt D.A. Advances in radical-trapping antioxidant chemistry in the 21st century // Chemical Reviews. 2014. Vol. 114. P. 9022–9046. DOI: 10.1021/cr500226n.
- [21] Rahman M., Brazel C.S. The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends // Progress in Polymer Science. 2004. Vol. 29. P. 1223–1248.
- [22] Vieira M.G.A., da Silva M.A., dos Santos L.O., Beppu M.M. Natural-based plasticizers and biopolymer films: a review // European Polymer Journal. 2011. Vol. 47. P. 254–263.
- [23] Hosney H., et al. Epoxidized vegetable oils as bio-based plasticizers for PVC: a review // Journal of Applied Polymer Science. 2018. Vol. 135. Art. 46270.
- [24] Lewandowski K., Skorczewska K. A brief review of poly(vinyl chloride) recycling // Polymers. 2022. Vol. 14. Art. 3035. DOI: 10.3390/polym14153035.
- [25] ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Москва: Стандартинформ, 2018.
- [26] ГОСТ 11645-73. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов. Москва: Издательство стандартов, 1973.