

Получение и свойства ПВХ-композиций, содержащих люминофоры Preparation and properties of PVC compositions containing phosphors

А.Б. ГЛАЗЫРИН, А.Ю. БЕЛОВА

A.B. GLAZYRIN, A.YU. BELOVA

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РБ, Россия

Ufa University of Science and Technology, Ufa, RB, Russia

glaab@inbox.ru

Рассмотрено получение люминофорных полимерных материалов на основе промышленного суспензионного ПВХ путем введения в его состав люминофоров различного спектра свечения на основе алюмината стронция. Определена термическая устойчивость различных видов люминофоров методом термогравиметрии. Проведена оценка влияния люминофоров на время термостабильности ПВХ и термическую устойчивость полимера при совместном использовании со стабилизирующими добавками. Изучены реологические свойства пластифицированных ПВХ композиций, содержащих люминофоры, при различных температурах и их стабильность при переработке в вязко-текучем состоянии. Определены физико-механические характеристики образцов люминофорных ПВХ-материалов при испытаниях на растяжение.

Ключевые слова: поливинилхлорид, люминофоры, термическая стабильность, полимерные люминофорные композиции

The production of phosphorescent polymer materials based on industrial suspension PVC by introducing strontium aluminate-based phosphors with various emission spectra has been considered. The thermal stability of different types of phosphors was determined using thermogravimetry. The effect of phosphors on the thermal stability of PVC and the thermal stability of the polymer when used together with stabilizing additives was evaluated. The rheological properties of plasticized PVC compositions containing phosphors at various temperatures and their stability during processing in a viscous-flow state have been studied. The physical and mechanical characteristics of samples of phosphorescent PVC materials were determined in tensile tests.

Keywords: polyvinylchloride, phosphors, thermal stability, polymer phosphor compositions

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-03-33-36

Одним из основных направлений современного полимерного материаловедения является создание новых функциональных полимерных материалов с практически ценными свойствами. К числу таких материалов, представляющих практический интерес, относятся полимерные люминофорные материалы, обладающие способностью преобразовывать УФ-излучение в узкополосное люминесцентное пост-свечение [1–4].

Введение люминофоров в полимерную матрицу позволяет получать композиционные материалы с уникальными свойствами, которые могут быть востребованы в различных областях техники [3–8]. Важной особенностью таких материалов является возможность сочетания высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик полимерных материалов со способностью входящих в их состав фотолюминофоров преобразовывать УФ-излучение (в условиях естественного освещения или при УФ-экспозиции) в последующее люминесцентное свечение (пост-свечение). Изменяя состав полимерной матрицы и тип вводимого люминофора, можно целенаправленно изменять свойства получаемого люминофорного композита в зависимости от предъявляемых требований, что открывает новые возможности для создания функциональных и эстетически привлекательных материалов и изделий.

Особый интерес представляют материалы, устойчивые к внешним атмосферным воздействиям, способные работать в широком температурном интервале (от минус 40°C до плюс 50°C). Такие материалы могут быть востребованы в дорожном строительстве (разметка, информация об опасных участках), в сфере промышленной безопасности (предупреждающие знаки), в городской инфраструктуре, в индустрии туризма, в логистических центрах и т.д. [9–10].

Поэтому разработка люминофорных материалов с продолжительным пост-свечением, способных сохранять свои эксплуатационные характеристики в атмосферных условиях в течение длительного времени, представляет собой актуальную практическую задачу.

Одним из основных вопросов при разработке люминофорных композитов является выбор полимерной матрицы, определяющей

эксплуатационные характеристики материала. Наряду с требуемыми показателями механических свойств важным условием является также возможность получения на основе выбранного полимера прозрачных материалов и покрытий, устойчивых к УФ-излучению, что необходимо для реализации люминофорных свойств материала.

К числу полимеров, обладающих высокой атмосферостойкостью, относится ПВХ. На его основе могут быть получены прозрачные и долговечные материалы, устойчивые к УФ-излучению, с широким спектром физико-механических свойств: от жестких и прочных до мягких и эластичных [11]. Однако в литературе имеются достаточно ограниченные сведения о получении и использовании люминофорных материалов на основе ПВХ [5, 12].

При разработке состава люминофорных ПВХ-композиций следует учитывать ряд факторов, влияющих на свойства получаемого материала: термическую устойчивость люминофора, его взаимодействие с другими компонентами полимерной композиции, характер влияния люминофора на реологические свойства и термостабильность полимера в условиях переработки и др.

Целью настоящей работы являлось получение ПВХ-композиций, содержащих фотолюминофоры на основе алюмината стронция, и изучение влияния люминофоров на их свойства.

Экспериментальная часть

При приготовлении ПВХ-композиций использовали следующие реагенты: суспензионный ПВХ марки С-6359-М, (ГОСТ 14332-78, АО «БСК», г. Стерлитамак); пластификатор ди(2-этилгексил)октилфталат (ДОФ) (ГОСТ 8728-88); нейтральный стеарат свинца (НСС) (CAS 7428-48-0); бария-кадмия стеарат марки «С» ТУ 6-09-17-318-96 (Ставропольский завод химических реактивов).

В составе ПВХ-композиций использовали фотолюминофоры с различным спектром свечения на основе алюмината стронция, содержащие добавки лантаноидов Eu и Dy ($\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu, Dy}$). следующих марок: ФВ-626Д, ФВ-530Д, ФВ-490Д, (ЗАО НПФ «Люминофор», Россия); МТВ-100, МТУ-100, МТУ-2Д, МНВ-3Д, МНОН-5Д

(VESTA PRO, Россия). Основные характеристики люминофоров приведены в [13, 14].

Приготовление сухих ПВХ-смесей проводили в стальном лабораторном смесителе при комнатной температуре в течение 10 мин при скорости вращения мешалки 440 мин⁻¹.

Термические характеристики образцов люминофоров и полимерных композиций определяли на приборе термического анализа TGA-DSC (METTLER TOLEDO, Швейцария) в интервале температур от 25°C до 500°C при скорости нагрева 5 град/мин в атмосфере воздуха.

Влияние люминофоров на время термостабильности ПВХ-композиций оценивали методом «конго-красный» (ГОСТ 14041-91) при температуре 175°C. Показатель текучести расплава (ПТР) полимерных композиций определяли с помощью экструзионного пластометра ИИРТ-АМ (НПО «Химвтоматика», Россия) согласно ГОСТ 11645–2021 (ISO 1133) при нагрузке 49 Н (капилляр диаметром 2,095 мм).

Смешение ПВХ-композиций в вязко-текучем состоянии проводили в лабораторном смесителе Plastograph EC Brabender (Brabender, Германия) при температуре от 170°C до 180°C в течение 10–15 мин. Образцы для механических испытаний получали на гидравлическом прессе Auto MN-NE (Carver, США) при температуре от 170°C до 190°C и давлении 1200 кг/см². Физико-механические свойства полимерных материалов при растяжении определяли по ГОСТ 11262–2017 на испытательной машине AGS-10kNX (Shimadzu, Япония). Оценку люминофорных свойств ПВХ-материалов производили визуально согласно [9].

Обсуждение результатов

Получение и последующая переработка ПВХ-композиций, содержащих люминофоры, предполагает использование повышенных температур от 170°C до 200°C. Поэтому важными являются вопросы термической стабильности люминофоров и характера их взаимодействия с другими компонентами ПВХ-композиций. В этой связи были изучены термические характеристики люминофоров, а также их влияние на термическую устойчивость получаемых ПВХ-композиций, содержащих различные стабилизирующие добавки и пластификатор.

Изучение термических свойств люминофоров проводили методом термогравиметрии при нагреве образцов до температуры 500°C. Для оценки термической стабильности люминофоров использовали следующие показатели:

T_n – температура, соответствующая началу снижения массы продукта при нагревании;

Δm_{180} – изменение массы образца при нагреве до температуры 180°C, соответствующей температуре переработки ПВХ-композиций;

R – остаток после нагрева образца до температуры 500°C.

Результаты экспериментов показали, что изученные люминофоры, представляющие продукты на основе алюмината стронция с добавками лантаноидов, обладают высокой термостабильностью: величина остатка R после нагрева образца до 500°C составляет более 98% (табл. 1). При этом снижение массы образцов при нагреве до 180°C (Δm_{180}) не превышает 0,55%, что может свидетельствовать о термической устойчивости люминофоров при условиях, соответствующих переработке полимерных композиций.

Таблица 1. Результаты термогравиметрического анализа люминофоров.

Марка люминофора	T_n , °C	Δm_{180} , %	R , %
MTY-2D	180	0	98,2
MTB-100	171	-0,53	98,3
MTY-100	169	-0,51	98,1
MHON-5D	144	-0,32	98,5
MNB-3D	165	-0,11	98,5
ФВ-626Д	350	+0,77	99,8
ФВ-530Д	–	+0,54	100,4
ФВ-490Д	–	+0,61	100,2

Вместе с тем, значения параметра T_n для изученных люминофоров марок МТ и МН находятся в области относительно невысоких температур от 144°C до 180°C (табл. 1). Наблюдаемое снижение массы образцов при указанных температурах может быть связа-

но с присутствием в их составе летучих примесей или термически нестабильных продуктов, например, органических соединений.

Особенностью термического поведения люминофоров марки ФВ при нагревании является, напротив, некоторое увеличение (на 0,5–0,8 %) массы образца, которое наблюдается уже при относительно невысоких температурах (выше 60°C). По-видимому, это может быть обусловлено частичной адсорбцией люминофором кислорода воздуха и протеканием при нагревании окислительного процесса, что и приводит к указанному увеличению массы образца. Снижения массы продукта в процессе дальнейшего нагрева вплоть до температуры 500°C практически не происходит, а величина остатка (R) после нагрева в некоторых случаях оказалась выше, чем масса исходного образца (табл. 1).

Таким образом, термическое поведение изученных марок люминофоров отличается: для продуктов марок МТ и МВ при нагреве наблюдается некоторое снижение массы образцов, тогда как для люминофоров марки ФВ, напротив, ее увеличение.

Известно, что ПВХ относится к термически нестабильным полимерам.

При повышенных температурах наблюдается процесс дегидрохлорирования полимера, что приводит к существенному ухудшению его свойств [11, 14]. Это обуславливает необходимость использования в составе ПВХ-композиций термостабилизаторов, к числу которых относятся карбоксилаты металлов, соединения свинца, олова и др. [11]. Добавка лантаноидов может оказать заметное влияние как на термостабильность ПВХ, так и на эффективность действия применяемых стабилизаторов и, как следствие, на люминофорные свойства получаемого полимерного материала.

В этой связи рассмотрено влияние изучаемых люминофоров на термостабильность ПВХ с использованием метода «Конго-красный», основанном на определении времени термостабильности (τ) от начала нагрева образца ПВХ-смола (при температуре 175°C) до изменения цвета индикаторной бумаги «конго-красный», вызванного выделением HCl вследствие дегидрохлорирования полимера.

Установлено, что введение в состав ПВХ изучаемых люминофоров, независимо от их марки, приводит к заметному повышению времени термостабильности полимера. Так, при использовании люминофоров МТВ-100 и MHON-5D (10 масс. ч./100 масс.ч. ПВХ) параметр τ увеличивается по сравнению со значением для исходного ПВХ (2,5 мин.) в 2,6 и 1,8 раза, соответственно (табл. 2). При увеличении содержания добавки люминофора в составе ПВХ от 5 до 10 масс.ч. время термостабильности полимера возрастает.

Таким образом, использование люминофоров на основе $SrAl_2O_4$ с добавками лантаноидов способствует некоторому повышению термической устойчивости ПВХ, по крайней мере, при температурах до 175°C. То есть, люминофоры проявляют определенное стабилизирующее действие, способствуя замедлению процесса дегидрохлорирования ПВХ.

Изучена термостабильность ПВХ-композиций при совместном использовании в их составе стабилизирующих добавок и люминофоров.

Для получения прозрачных ПВХ-композиций, что необходимо для реализации люминофорных свойств материалов, использовали нейтральный стеарат свинца (НСС) и смесь стеаратов Ва и Cd.

Установлено, что введение в состав ПВХ Ва-Cd стабилизатора в количестве 2 масс.ч. обеспечивает существенное (до 38,2 мин) увеличение времени термостабильности полимера. Вместе с тем, при совместном использовании стеарата Ва-Cd и изучаемых люминофоров (10 масс.ч.) наблюдалось некоторое уменьшение параметра τ до 23–30 мин, что может свидетельствовать о снижении стабилизирующего эффекта (табл. 2).

Иная картина наблюдалась при использовании люминофоров в сочетании со свинцовым стабилизатором НСС: в этом случае снижения времени термостабильности ПВХ по сравнению с композицией, не содержащей люминофора, не происходило. Значение параметра τ , полученное при совместном использовании НСС и люминофора MHON-5D (45,8 мин), оказалось почти в 1,9 раза больше по сравнению с композицией аналогичного состава, содержащей Ва-Cd стабилизатор (табл. 2).

Таким образом, использование изученных люминофоров в сочетании со стабилизатором НСС обеспечивает более высокий стаби-

лизирующий эффект, при этом снижения термостабильности полимера в присутствии люминофора, как это наблюдалось в случае Ва-Сд стабилизатора, не происходит.

Таблица 2. Результаты определения времени термостабильности ПВХ-композиций методом «Конго-красный» (175°C).

№ п/п	Содержание компонентов, масс. ч./100 масс.ч. ПВХ		Среднее время термостабильности, τ, мин.
	стабилизатор	люминофор	
1	–	–	2,5
		ФВ-626 – 5	3,6
		ФВ-530 – 5	3,7
2	–	МТУ-2D – 10	5,2
3	–	МТУ-100 – 10	4,6
4	–	МНОН-5D – 10	4,5
5	–	МТВ-100 – 10	6,6
6	–	ФВ-626 – 10	5,2
7	–	ФВ-530 – 10	5,3
8	–	ФВ-490 – 10	5,0
9	Ва-Сд стеарат – 2	–	38,2
10	Ва-Сд стеарат – 2	МТУ-2D – 10	29,5
11	Ва-Сд стеарат – 2	МНОН-5D – 10	24,5
12	Ва-Сд стеарат – 2	МТВ-100 – 10	23,1
13	НСС – 2	–	42,0
14	НСС – 2	МНОН-5D – 10	45,8
15	НСС – 2	МТУ-2D – 10	43,1

Методом термогравиметрии изучена термическая устойчивость пластифицированных ПВХ-композиций, содержащих, наряду с добавками стабилизатора и люминофора, пластификатор ДОФ (табл. 3). Результаты ТГА пластифицированных ПВХ-композиций показали, что они достаточно стабильны при температурных условиях, соответствующих их переработке: потеря массы при нагреве до 180°C составляет не более 1,0% (табл. 3). При повышении содержания ДОФ в композиции от 40 до 60 масс.ч. наблюдается некоторое увеличение значения Δm_{180} . Наблюдаемое снижение массы образца следует связывать, по-видимому, с частичным испарением пластификатора при данных условиях. Введение люминофора в состав пластифицированного ПВХ, согласно результатам ТГА, не приводит к заметному изменению его термических характеристик (табл. 3).

Таблица 3. Результаты термогравиметрического анализа пластифицированных ПВХ-композиций. Состав композиций, масс.ч./100масс.ч. ПВХ: НСС – 2; люминофор – 10.

Композиция	Содержание ДОФ, масс. ч.	Люминофор	Δm_{180} , %
1	40	–	0,75
2	40	ФВ-490Д	0,77
3	40	МТУ-2D	0,68
4	60	МТУ-100	1,00

При выборе условий переработки ПВХ-композиций важным является оценка их реологических показателей, а также термической устойчивости при действии механических нагрузок.

Эксперименты по определению текучести полимерных расплавов проводили на экструзионном пластометре ИИРТ-АМ при нагрузке 49 Н в интервале температур от 170°C до 190°C. В качестве характеристики реологических свойств использовали показатель текучести расплава (ПТР). Кроме того, оценивали термическую стабильность ПВХ-композиций под нагрузкой при переработке в экструзионной камере пластометра и люминофорные свойства получаемых полимерных образцов.

Установлено, что пластифицированные ПВХ-композиции (1–4, табл. 3) проявляют текучесть уже при температуре 170°C (рис. 1). При повышении температуры от 170 до 190°C значение ПТР полимерных композиций закономерно увеличивается от 0,3–0,5 до 5,6–9,2 г/10 мин (в зависимости от состава). Текучесть полимерного расплава возрастает с увеличением содержания ДОФ в ком-

позиции (кривые 3 и 4, рис. 1). При этом ПВХ-композиции (2, 3), содержащие люминофоры, характеризуются более низкой текучестью по сравнению с композицией (1) аналогичного состава без люминофора (рис. 1).

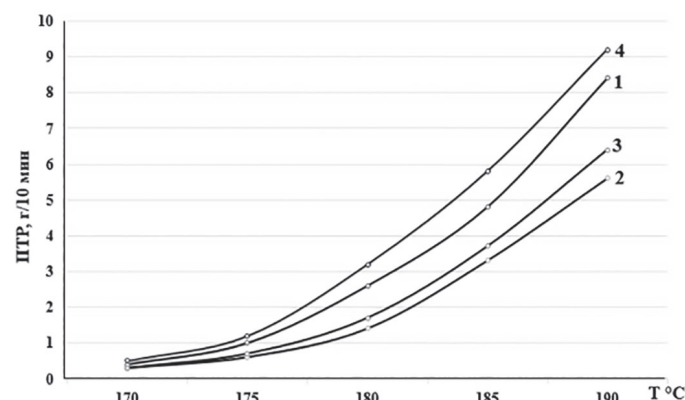


Рис. 1. Влияние температуры на ПТР пластифицированных ПВХ-композиций: 1 – ПВХ-1; 2 – ПВХ-2; 3 – ПВХ-3; 4 – ПВХ-4.

Следует отметить, что при проведении испытаний изменений окраски полимерных образцов, выходящих из экструзионной камеры пластометра после выдержки при заданной температуре (что могло указывать на протекание процесса их деструкции), не наблюдалось.

Таким образом, полученные пластифицированные ПВХ-композиции, содержащие люминофоры (2–4), обладают хорошими технологическими свойствами и стабильностью при температурах до 190°C, что показывает возможность их переработки с использованием различных методов, применяемых для переработки термопластов.

Стабильность ПВХ-композиций в изученном интервале температур подтверждена также при их переработке в смесителе Брабендера и при последующем прессовании образцов для проведения механических испытаний.

Определены физико-механические характеристики образцов люминофорных ПВХ-материалов при испытаниях на растяжение: модуль упругости (E), прочность при разрыве (σ_p), относительное удлинение при разрыве (ϵ_p) (табл. 4). Результаты испытаний показали, что образцы, полученные на основе ПВХ-композиций (2) и (4) (табл. 3), представляют материалы с хорошей деформативностью (ϵ_p до 225%) и прочностью при разрыве до 13 МПа. Введение люминофора (10 масс.ч.) в состав ПВХ-композиции приводит к снижению прочности и деформационных свойств полимерного материала (табл. 4), что обычно наблюдается при использовании инертных дисперсных наполнителей [16].

Таблица 4. Физико-механические свойства ПВХ-композиций.

Композиция	E , МПа	σ_p , МПа	ϵ_p , %
1	41,0 ± 0,1	18,1 ± 0,2	178 ± 2
2	47,2 ± 0,1	13,2 ± 0,2	115 ± 2
4	6,0 ± 0,1	8,9 ± 0,2	225 ± 2

Из экспериментальных результатов следует, что, изменяя состав ПВХ-композиции и тип применяемого люминофора, можно получать материалы с различным комплексом физико-механических свойств и характеристиками пост-свечения в зависимости от требований.

Важно отметить, что полученные образцы люминофорных ПВХ-материалов проявляют (после предварительной экспозиции при дневном освещении) характерное пост-свечение, соответствующее области спектра исходного люминофора и близкое по интенсивности свечения. Проведенная оценка показала, что полученные материалы соответствуют требованиям [9], предъявляемым к фотолюминесцентным материалам для изготовления знаков безопасности и эвакуационных указателей.

Разработанные люминофорные материалы на основе пластифицированного ПВХ, сочетающие хорошие эксплуатационные свойства полимера и пост-свечение, характерное для исходного люминофора, могут найти практическое применение в различных областях техники, для изготовления декоративных материалов и т.д.

Выводы

Методом ТГА показано, что изученные промышленные люминофоры термически стабильны при температурах до 180°C, соответствующих переработке ПВХ-композиций: снижение массы для люминофоров марок МТ, МН не превышает 0,55%. Увеличение массы на 0,5–0,8%, наблюдаемое при нагреве люминофоров марки ФБ, по-видимому, следует связывать с протеканием окислительного процесса.

Введение люминофоров в ПВХ приводит к увеличению времени термостабильности полимера (при 175°C), что указывает на их стабилизирующее действие, связанное с замедлением нежелательного процесса дегидрохлорирования полимера.

Термостабильность ПВХ-композиции зависит от природы стабилизатора, используемого в сочетании с люминофором: в случае стеарата Ва-Сд наблюдается снижение его стабилизирующего действия в присутствии люминофора, тогда как при использовании нейтрального стеарата свинца уменьшения времени термостабильности ПВХ не происходит.

Разработанные пластифицированные ПВХ-композиции, содержащие люминофоры, технологичны при переработке и стабильны при температурах до 190°C. Полученные образцы ПВХ-композиций проявляют характерное пост-свечение, соответствующее спектру введенных люминофоров, и близкое к ним по интенсивности свечение.

Изменяя состав ПВХ-композиции и тип применяемого люминофора, можно получать материалы с заданным уровнем физико-механических свойств и характеристиками пост-свечения в зависимости от требований.

Литература

1. Yang Li, Mindaugas Gecevicius, Jianrong Qiu. Long persistent phosphors – from fundamentals to applications // Chem. Soc. Rev. 2016. V. 45. P. 2090–2136. DOI: 10.1002/chin.201622267.
2. Meharea M.D., Mehareb Chaitali M., Swart H.C., Dhoble S.J.. Recent development in color tunable phosphors: A review // Progress in Materials Science V. 133. March 2023. p.101067. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.101067.
3. Патент № 2581094 С2, Российская Федерация. МПК C08J5/18. Флуоресцирующая полимерная пленка. 20.02.2014: RU2014106323/05A: заявл. 20.02.2014: опубл. 10.04.2016 / Крикушенко В.В.; заявитель ООО «Некс_Т».
4. Патент № 2561455, Российская Федерация. МПК C09K 11/77; C08K 3/10; C08K 5/103. Полимерная композиция для получения светотрансформирующего пленочного материала: заявл. 28. 10. 2013: опубл. 27.08.2015 / Минич А. С., Иваницкий А.Е.; заявитель ФГБОУ ВПО «Томский государственный педагогический университет» (ТГПУ).
5. Патент № 2153519С2, Российская Федерация., МПК: A01N 37/00; A01N43/00; A01N 59/00; C08K 5/00; C09K 11/00. Светопретворяющая полимерная композиция: заявл.: 05.10.1998: опубл. 27.07.2000 / Анисимов В.М., Анисимова О.М., Зайченко Н.Л., Мардадешвили И.Р., Маревцев В.С., Островский М.А., Шиенок А.И.; заявитель; Институт химической физики РАН им. Н.Н. Семенова.
6. Патент № 2243985С2 Российская Федерация. МПК: C09K11/56; C09K11/80. Светонакопительный полимерный слой: заявл. 7.07.2002: опубл. 17.07.2002 / Артамонова Э.В., Комиссаров А.Б., Леонов А.Ф., Сошин Н.П., Федоровский П.Ю., Чебышев С.Б.; заявитель: ФГУП «Научно-инженерный центр «СНИИП», АОЗТ «СНИИП-Конвел».
7. Патент № 2319728, Российская Федерация. МПК C08K13; C09K11; C09K11/77; Материал для преобразования света и композиция для его получения: заявлен: 13.06.2006: опубл. 20.03.2008 / Власьянц Г.Р., Воробьев В.А., Каргин Н.И., Синельников Б.М.; заявитель: ФГБОУ «Северо-Кавказский государственный технический университет» и ООО НПФ «СВЕТ».
8. Патент № 2091421, Российская Федерация. МПК: B44C 5/08, C09K 11/08. Светосостав для люминесцентного покрытия: заявлен: 10.05.1994: опубликован 27.09.1997 / Бердников С.Л., Бобкова И.С., Зеликин Я.М.; заявитель Санкт-Петербургский государственный университет.
9. ГОСТ Р 12.2.143–2009. Система стандартов безопасности труда. Системы фотолюминесцентные эвакуационные. Требования и методы контроля.
10. Лазарева Т.К., Андреева Т.И., Осипчик В.С., Кравченко Т.П. Разработка полимерных композиционных материалов светотехнического назначения // Пластические массы. 2010. №10. С. 58–62. EDN: MWCDUP.
11. Поливинилхлорид / Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниэлс Ч. Пер. с англ. под ред. Г. Е. Заикова. СПб: Профессия. 2007. 728 с. ISBN 978-5-93913-153-7.
12. Белова А.Ю., Глазырин А.Б. Физико-механические свойства полимерных люминофорных материалов на основе ПВХ / Материалы XII Международной молодежной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современного материаловедения». Уфа: РИЦ УУНТ, 2025. С. 15.
13. Фотолюминофоры. [Электронный ресурс]. <https://luminophor.ru/catalog/lyuminoformy/fotolyuminoformy/lyuminoformy-s-dlitelnym-poslesvecheniem/?ysclid=ml97hnh3h113092484> [дата ознакомления 27.02.2026].
14. Люминофоры. [Электронный ресурс]. <https://vestapro.ru/pigm/lum> [дата ознакомления 2.03.2026].
15. Минскер К.С., Федосеева Г.Т. Деструкция и стабилизация поливинилхлорида. М.: Химия. 1979. 271с.
16. Полимерные композитные материалы: структура свойства, технология: учеб. пособие /под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия. 2009. 560 с. ISBN: 978-5-93913-130-8.