

Влияние добавки цианурата меламина на горючесть и физико-механические свойства ПА-6

Effect of melamine cyanurate additive on flammability and physical and mechanical properties of PA-6

Т.А. БОРУКАЕВ¹, А.Х. САЛАМОВ²

Т.А. BORUKAEV¹, А.Х. SALAMOV²

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Кабардино-Балкарская республика, Россия

² Ингушский государственный университет, Магас, Республика Ингушетия, Россия

¹ Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

² Ingush State University, Magas, Republic of Ingushetia, Russia

boruk-chemical@mail.ru

Введением цианурата меламина в полиамид-6 получены полимерные композитные материалы. Изучены горючесть и физико-механические свойства полученных композитов. Обнаружено, что введение цианурата меламина в полиамид-6 приводит к снижению его горючести. Показано, что при определенном содержании цианурата меламина физико-механические свойства композитов остаются на уровне исходного полимера.

Ключевые слова: цианурат меламина, полиамид-6, композиты, горючесть, физико-механические свойства

Polymer composite materials were obtained by introducing melamine cyanurate into polyamide-6. The flammability and physical and mechanical properties of the obtained composites were studied. It was found that the introduction of melamine cyanurate into polyamide-6 leads to a decrease in its flammability. It has been shown that at a certain content of melamine cyanurate, the physical and mechanical properties of the composites remain at the level of the initial polymer.

Keywords: melamine cyanurate, polyamide-6, composites, flammability, physical and mechanical properties

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-37-40

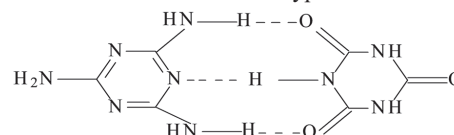
Введение

Одной из интенсивно развивающихся отраслей промышленности является производство полимерных материалов [1]. Полимерные материалы используются для изготовления различных изделий, эффективно заменяющих детали, изготовленные на основе традиционных материалов [2]. Это стало возможным благодаря созданию широкого спектра полимерных композиционных материалов, которые обладают комплексом ценных физико-химических, термических, механических, электрических и эксплуатационных характеристик [3]. При этом, в зависимости от требований современной техники, на основе полимеров целенаправленно можно создавать материалы, которые будут обладать специальными, зачастую уникальными свойствами [4]. Наблюдается постоянное увеличение объемов производства и расширение сферы применения полимерных материалов, однако есть проблема: в случае возникновения чрезвычайных ситуаций (пожаров) данные материалы не только обладают повышенной горючестью, но и сами являются источниками образования значительного количества токсичных веществ [5]. Эффективным решением данной проблемы является использование различных антипиренов, введение которых в полимеры приводит к повышению их огнестойкости [6]. В частности, в полимерной промышленности в качестве антипиренов широко используют галоген-, фосфор-, азотосодержащие соединения, гидроксиды металлов, оксид сурьмы и др. [7]. Однако некоторые из перечисленных антипиренов в условиях пожара сами становятся источниками образования токсичных соединений [8]. В связи с этим существует проблема поиска перспективных и достаточно эффективных антипиренов для полимерных материалов, которые не только снижали бы горючесть материала, но и не образовывали бы при высоких температурах вредные продукты [9].

Настоящая работа посвящена исследованию пожаростойкости композитных материалов, полученных на основе полиамида-6 и цианурата меламина, а также исследованию их основных физико-механических свойств.

Экспериментальная часть

Для повышения пожаростойкости полиамида-6 (ПА-6) в работе в качестве добавки использовали цианурат меламина (ЦМ):



Цианурат меламина получали следующим образом. В трехгорлую колбу, снабженную мешалкой, термометром и обратным холодильником, при температуре 40–50 °С в воде растворяли циануровую кислоту. Затем в раствор добавляли меламин. Соотношение исходных веществ (меламин : циануровая кислота) составляло 1:1 (в молях). Температуру смеси постепенно поднимали до 75 °С, и при этой температуре смесь перемешивали 5 ч. Для создания реакционной среды с pH = 9,5 использовали раствор аммиака. После завершения процесса реакционную массу охлаждали, выпавший осадок отфильтровывали, промывали водой до нейтральной реакции. Затем продукт сушили в вакуумном шкафу при 75–90 °С и остаточном давлении 10⁻¹ МПа до постоянной массы. После сушки продукт представлял собой порошок белого цвета с размером частиц 2–2,5 мкм, определенным с использованием лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 (Fritsch, Германия).

В качестве исходного полимера использовали полиамид-6 (ПА-6) промышленного производства марки ПА-6 210/310 (ОСТ 6-06-С9-93, НП ООО «АНИД», г. Екатеринбург). Данный ПА-6, согласно паспорту, имеет следующие характеристики: плотность – 1,13–1,14 г/см³, температура плавления – 215 °С, модуль упругости при изгибе – 1,9–2,0 ГПа, разрушающее напряжение при изгибе – 60–70 МПа (ГОСТ 4648–2014), прочность при растяжении – 50 МПа, прочность при разрыве – 56–65 МПа и относительное удлинение при разрыве – 70–110% (по ГОСТ 11262–2017), ударная вязкость по Изоду с надрезом – 5 кДж/м² (ГОСТ 19109–2017), кислородный индекс – 24–25 % (ГОСТ 12.1.044–2018).

В работе ЦМ вводили в предварительно высушенный ПА-6 (остаточная влажность 0,15%) диспергированием добавки на стадии компаундирования с использованием одношнекового экструдера фирмы Betol (Великобритания) с диаметром шнека 20 мм и $L/D = 20$. Экструдирование смесей ПА-6 + ЦМ проводили при температуре от 180°C до 225°C, скорость вращения шнека 60 об/мин, грануляцию стренговая. Расчетное количество ЦМ в композитах составляло от 2 до 20 масс.%. Полученные экструдаты гранулировали, затем из гранул были изготовлены соответствующие литьевые образцы для оценки горючести и физико-механических показателей. Перед литьем под давлением композиты сушили в вакуумном шкафу при температуре 100°C и остаточном давлении 10^{-1} МПа в течение 10 ч (остаточная влажность композитов составляла менее 0,16%). Литье образцов проводили на шнековом ТПА при температуре расплава материала 240°C и температуре формы 80°C.

Для оценки горючести композитов использовали следующие показатели (ГОСТ 12.1.044–2018): продолжительность самостоятельного горения образца, скорость распространения пламени, кислородный индекс и коксовый остаток. Продолжительность самостоятельного горения композитов и скорость распространения пламени определяли по соответствующей методике [10].

Кислородный индекс (КИ, %) композитов определяли на установке фирмы Noselab ast. Fire testing, модель Oxugen Index (Италия). Для определения КИ использовали бруски размером 100×10×4 мм. За результат испытания принимали среднеарифметическое значение КИ, полученное на трех образцах одного материала.

Коксовый остаток (КО, %) композитов ПА-6 + ЦМ определяли, используя данные термогравиметрического анализа (ТГА). ТГА композитов проводили на приборе TGA 400 фирмы PerkinElmer (США) в воздушной среде при динамическом режиме нагревания. Для этого использовали керамические тигли, температурный интервал нагревания составлял от 20°C до 800°C, скорость подъема температуры – 10 град/мин. Масса навесок образцов составляла 10±1 мг. За результат испытания принимали среднеарифметическое значение КО, полученного на трех образцах одного материала.

Показатель текучести расплава (ПТР) исходного ПА-6 и композитов ПА-6 + ЦМ определяли по методу А на капиллярном вискозиметре марки ИИРТ-М (Россия) с использованием капилляра с внутренним диаметром 2 мм (согласно ГОСТ 11645–2021), при температуре 230°C и нагрузке 2,16 кг.

Плотность исходного полимера и композитов ПА-6 + ЦМ определяли гидростатическим методом по ГОСТ 15139-69 в дистиллированной воде. Для испытаний использовали литьевые образцы размером 20×10×4 мм. За результат испытания принимали среднеарифметическое трех параллельных измерений.

Твердость композитов ПА-6 + ЦМ по Шору (шкала D) измеряли с применением твердомера модели OS-2 фирмы Hildebrand на образцах, которые представляли собой полученные литьем под давлением диски диаметром 40 мм и толщиной 3 мм по приведенной в работе [10] методике.

Для оценки механических свойств композитов ПА-6 + ЦМ использовали следующие технологии:

Ударную вязкость по Изоду определяли с использованием маятникового копра марки Gotech Testing Machines, Inc. GT-7016-A3 (Тайвань) по ГОСТ 19109–2017 (ИСО 180:2000). Образцы (не менее 10 для каждого материала) для испытаний представляли собой бруски (без надреза) с размерами 80×10×4 мм, которые были изготовлены в соответствии с ГОСТ 19109–2017. Деформационно-прочностные свойства определяли на разрывной машине Gotech Testing Machines, Inc. GT- TCS-200 (Тайвань). Модуль упругости при изгибе определяли согласно ГОСТ 4648–2014, а модуль упругости при растяжении оценивали по ГОСТ 11262–2017. Прочность и относительное удлинение при разрыве определяли согласно ГОСТ 11262–2017. Испытания на растяжение проводили на литьевых образцах в виде лопаток типа 1А (не менее 10 лопаток каждого композита) при температуре 20°C и скорости подвижного захвата машины 10 мм/мин. Образцы для испытаний на изгиб представляли собой бруски размером 80×10×4 мм (не менее 10 брусков каждого композита), изготовленные литьем под давлением.

Результаты и их обсуждение

Исследование композитов ПА-6 + ЦМ на горючесть показало, что добавка ЦМ в полимер приводит к снижению его пожарной

опасности (табл. 1). При этом чем больше содержание ЦМ в композитах, тем ниже горючесть полимера. Так, сравнение скорости распространения пламени при горении образцов на основе исходного полимера и композитов ПА-6 + ЦМ показало, что все образцы при удалении источника пламени практически гаснут (табл. 1). Такое поведение исходного полимера и композитов не позволяет оценить антипиреирующее действие ЦМ.

Для оценки горючести исходного полимера и композитов ПА-6 + ЦМ были определены значения коксового остатка (КО) и КИ образцов (табл. 1). В частности, термогравиметрический анализ исходного полимера и композитов ПА-6 + ЦМ показал, что КО композитов в разы больше, чем у ПА-6 (табл. 1). Причем КО композитов увеличивается с увеличением содержания ЦМ. Высокие значения КО композитов обусловлены возможным ингибированием процесса выхода и поступления горючих газов из материала в пламенную зону. Препятствием для поступления горючих газов в пламенную зону выступают карбонизованные структуры, которые сформировались на поверхности материала при разложении и активном участии основных составляющих ЦМ. Во-первых, процесс разложения меламина происходит с поглощением до 40% выделяющейся при сгорании углеводородов теплоты. Во-вторых, меламина активно участвует в процессах, приводящих к образованию на поверхности полимера значительного количества сажеподобных продуктов [11]. Другая составляющая соли – циануровая кислота – способна активизировать процессы, приводящие к коксованию исходного полимера.

Таблица 1. Показатели горючести композитов ПА-6 + МЦК.

Образцы	КИ, %	КО, %	Длина обуглившейся части образца, мм
ПА-6 210/310	24,4	2,0	65
ПА-6 + 2 масс.% ЦМ	28,8	3,0	61
ПА-6 + 5 масс.% ЦМ	29,6	5,0	55
ПА-6 + 7 масс.% ЦМ	30,0	6,0	45
ПА-6 + 10 масс.% ЦМ	32,0	7,0	32
ПА-6 + 15 масс.% ЦМ	33,0	9,0	39
ПА-6 + 20 масс.% ЦМ	35,2	10,5	41

Примечание: все образцы при выносе из пламени горелки затухали.

Заметное снижение горючести ПА-6 при введении соли ЦМ подтверждают и результаты оценки КИ композитов ПА-6 + ЦМ (табл. 1). Так, полученные результаты оценки КИ композитов ПА-6 + ЦМ показывают, что данные значения выше, чем у исходного полимера. При этом КИ композитов ПА-6 + ЦМ, содержащих ЦМ в количестве 2–5 масс.%, на 5% выше, чем у исходного полимера. Введение ЦМ в ПА-6 выше 5 масс.% приводит к еще более заметному снижению горючести полимера, т.е. значения КИ композитов ПА-6 + ЦМ, содержащих ЦМ в количестве 15–20 масс.%, на 10% выше, чем у исходного полимера. Очевидно, такая разница значений КИ композитов и исходного полимера обусловлена влиянием ЦМ на процесс горения образцов. В частности, меламина при высоких температурах разлагается с образованием газообразных веществ, которые успешно разбавляют кислород и топливные газы, присутствующие в точке сгорания [12]. Кроме того, меламина и циануровая кислота активно участвуют в формировании коксовой корки на поверхности материала [13]. Результатом таких процессов, происходящих с участием ЦМ, будет не только увеличение КО и КИ, но изменение характера горения материала [14], т.е. снижение скорости распространения пламени.

Следует отметить, что композиты при нахождении в пламенной зоне горят с более низким дымообразованием, чем исходный полимер. Это существенное преимущество композитов, т.к. появляется возможность сократить количество вредных выбросов, которые могут поступать в окружающую среду в процессе горения полимерных материалов.

Таким образом, результаты оценки горючести композитов ПА-6 + ЦМ (скорость распространения пламени, КИ и КО) показывают, что полученную соль на основе меламина и циануровой кислоты можно использовать в качестве эффективного антипирена для снижения горючести ПА-6.

Обычно введение различных добавок в полимерные материалы приводит к изменению основных физико-механических и эксп-

луатационных характеристик исходного полимера [15]. Это обусловлено свойствами добавки, которая в силу природы происхождения по сравнению с полимерной матрицей обладает большей жесткостью и прочностью. В свою очередь, такие свойства добавок в конечном итоге влияют на определение оптимального содержания их в композитах для сохранения исходных свойств материала на достаточном уровне. В связи с этим в работе было исследовано влияние соли ЦМ на показатель текучести расплава и физико-механические свойства ПА-6. Такие исследования проводили для определения оптимального состава композитов, которые по своим характеристикам не уступали бы исходному полимеру. В частности, были определены следующие характеристики: показатель текучести расплава, плотность, твердость и деформационно-прочностные показатели.

Результаты исследований влияния ЦМ на текучесть расплава исходного полимера показали, что композиты по значениям ПТР находятся на уровне исходного полимера (табл. 2). Однако значения ПТР композитов ПА-6 + ЦМ с содержанием ЦМ от 2,0 до 15,0 масс.% незначительно выше, чем значение ПТР исходного полимера. Дальнейшее увеличение содержания ЦМ в композитах до 20 масс.% приводит к увеличению текучести расплава полимера (значение ПТР композита ПА-6 + 20% ЦМ выше, чем у исходного полимера и остальных композитов, табл. 2). Очевидно, такой ход зависимости значений ПТР ПА-6 от содержания ЦМ обусловлен тем, что частицы добавки не оказывают значительного влияния на молекулярную подвижность ПА-6, т.е. она остается на уровне исходного полимера.

Таблица 2. ПТР, плотность и твердость исходного полимера и композитов ПА-6 + ЦМ.

Состав композита	ПТР, г/10 мин	ρ , г/см ³	Твердость по Шору, шкала Д	
			1 с	15 с
ПА-6–210/310	6,5	1,101	55	53
ПА-6 + 2 масс. % ЦМ	6,2	0,963	57	54
ПА-6 + 5 масс. % ЦМ	6,0	0,964	60	56
ПА-6 + 7 масс. % ЦМ	6,0	0,962	57	54
ПА-6 + 10 масс. % ЦМ	6,1	0,964	57	54
ПА-6 + 15 масс. % ЦМ	6,2	0,942	51	47
ПА-6 + 20 масс. % ЦМ	6,8	0,941	50	45

В частности, при получении композитов ПА-6 + ЦМ с содержанием добавки от 2 до 15 масс.%, возможно, частицы соли диспергируются в полимерной матрице неравномерно. Такое неравномерное распределение частиц добавки, очевидно, приводит к образованию неоднородной надмолекулярной структуры. В свою очередь, сформированная фазовая неоднородность будет оказывать влияние на молекулярную подвижность полимера. Это изменение подвижности макромолекул будет отражаться на значениях ПТР, что мы и видим (табл. 2). В случае композитов ПА-6 + 20 масс.% ЦМ значение ПТР несколько возрастает и становится выше, чем у исходного полимера и других композитов. Очевидно, такое поведение данного композита обусловлено незначительным увеличением подвижности макромолекул полимера вследствие ослабления межмолекулярных взаимодействий за счет более равномерного распределения ЦМ в матрице. Последнее обстоятельство может иметь определенное значение в процессе переработки композитов.

Структурные изменения в полимерной матрице, происходящие при введении ЦМ, косвенно подтверждаются результатами измерений плотности композитов ПА-6 + ЦМ. Так, введение ЦМ в ПА-6 приводит к снижению плотности композита (табл. 2), причем снижение плотности композитов возрастает с увеличением содержания ЦМ. Возможно, снижение плотности исходного полимера при введении ЦМ обусловлено тем, что частицы добавки препятствуют формированию сетки зацеплений макромолекул полимера, создавая менее плотную и дефектную надмолекулярную структуру.

О формировании менее плотной надмолекулярной структуры говорят и результаты определения твердости композитов ПА-6 + ЦМ (табл. 2). Как видно из таблицы, композиты ПА-6 + ЦМ – менее твердые материалы, чем исходный полимер. Причем наблюдается

снижение твердости композитов с увеличением содержания ЦМ от 2 до 20 масс. %. Очевидно, введение добавки в ПА-6 приводит к увеличению доли свободного объема в полимерной матрице, который влияет на степень упаковки макромолекул и формирующуюся структуру матрицы. Эти обстоятельства приводят к снижению плотности и твердости материала, которые в конечном итоге будут отражаться и на эксплуатационном поведении композитов.

Для оценки влияния ЦМ на механические свойства ПА-6 для образцов на основе исходного полимера и композитов были определены ударная вязкость по Изоду a_p (кДж/м²), модуль упругости при изгибе E_n (МПа) и растяжении E_p (МПа), прочность при разрыве σ_p (МПа) и относительное удлинение при разрыве ε_p (%).

Значения полученных показателей подвергли статистической обработке с надежностью $\alpha = 0,95$. Абсолютная ошибка не превышала 3,9%. Величины достоверности аппроксимации (R^2) не менее 89%.

Как показали испытания по определению ударной вязкости, введение ЦМ в ПА-6 приводит к снижению ударной вязкости исходного полимера (рис. 1).

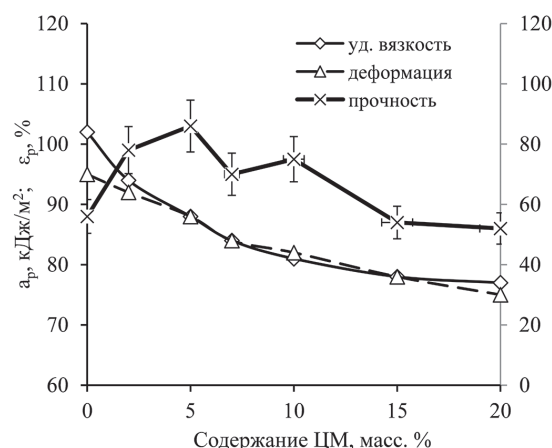


Рис. 1. Концентрационные зависимости ударной вязкости по Изоду, прочности и относительного удлинения при разрыве композита ПА-6 + ЦМ.

Снижение ударной вязкости ПА-6 при введении ЦМ можно объяснить образованием неоднородных гетерофазных структур в композитах, которые являются следствием введения добавки. В свою очередь, такие образования можно отнести к дефектным и напряженным структурам, способным определять диссипативные возможности матричного полимера.

В работе были определены модули упругости композитов ПА-6 + ЦМ при растяжении (E_p) и изгибе (E_n). Исследования показали, что значения E_n и E_p композитов ПА-6 + ЦМ выше аналогичных величин исходного полимера (рис. 2).

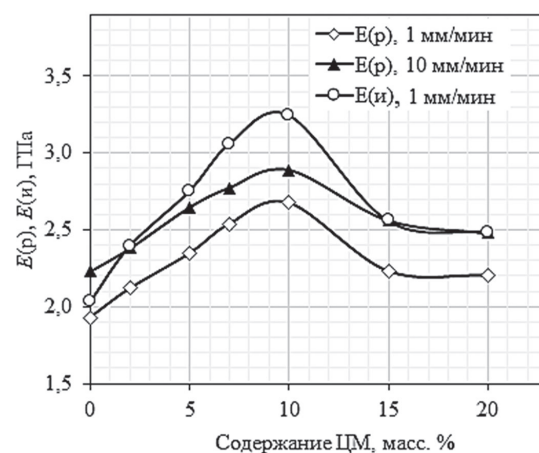


Рис. 2. Концентрационные зависимости модулей упругости при растяжении и изгибе композитов ПА-6 + ЦМ.

При этом увеличение значений модулей происходит при содержании ЦМ в композитах от 2 до 10 масс.%. Дальнейшее увеличение содержания ЦМ в композитах приводит к снижению значений модулей, которые, однако, остаются выше исходных значений. Такая же картина наблюдается и при оценке разрушающего напряжения (рис. 1). В частности, с увеличением содержания ЦМ

в композитах происходит повышение значений разрушающего напряжения, которое изменяется экстремально. Видимо, такое поведение композитов ПА-6 + ЦМ обусловлено изменением протяженности полимерной матрицы вокруг частиц добавки, которая оказывает заметное влияние на формирующуюся надмолекулярную структуру и ориентацию макромолекул полимера.

Иная картина имеет место при определении относительного удлинения при разрыве композитов ПА-6 + ЦМ. Так, испытания показали, что композиты по данному показателю уступают исходному полимеру. Очевидно, полученные композиты ПА-6 + ЦМ менее подвержены пластической деформации вследствие изменения надмолекулярной структуры исходного полимера при введении добавки. В частности, композиты по сравнению с исходным полимером являются более жесткими и менее монолитными, что отражается на величине их модулей (рис. 2).

Заключение

Таким образом, при использовании цианурата меламина в качестве антипиреющей добавки для ПА-6 обнаружено значительное снижение горючести исходного полимера во всем интервале содержания соли. При этом установлено, что композиты ПА-6 + ЦМ, содержащие ЦМ в количестве до 10 масс.%, превосходят ПА-6 и композиты на его основе по жесткости и прочности.

Литература

1. Матвеев К.А. Полимерные перспективы // Полимерные материалы. 2025. №1. (308). С. 34–38.
2. Солдатов Г.Ю. Развитие полимерного рынка: новые грани инноваций // Полимерные материалы. 2024. №9. (304). С. 4–15.
3. Дусанов Р.Х., Тожиев П.Ж., Тураев Х.Д. Влияние модификаторов на физико-механические свойства композиционных материалов на основе полиамида 6 // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. 2020. №8 (74). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/10581>(12.06.2025).
4. Хассан Е.А.М., Эль-Абид А.Е.А., Башир Е.О., Элагиб Т.Х.Х. Влияние модификации углеродных волокон на механические свойства полиамидных композитов для автомобильных применений // Механика композитных материалов. 2022. Т. 58, №2. С. 369–382. DOI: 10.22364/mkm.58.2.08.
5. Чижова М.А., Хайруллин Р.З. Проблема точной оценки токсичности продуктов, выделяющихся при горении полимерных строительных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, №9. С. 139–140. EDN: SFMKPJ.
6. Николаевич Б.А., Головина Е.А., Савин Д.А., Бычин Н.В. Повышение огнестойкости полимерных композитов: ucbmuf // Ползуновский вестник. 2025. №1. С. 267–271. DOI: 10.25712/astu.2072-8921.2025.01.036.
7. Зарипов И.И., Вихарева И.Н., Буйлова Е.А., Берестова Т.В., Мазитова А.К. Добавки для понижения горючести полимеров // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т.14. №2. С. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161.
8. Барботько С.Л., Боченков М.М., Вольный О.С., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Исследование влияния двух типов антипиренов на горючесть образцов из эпоксидной смолы // Труды ВИАМ. 2021. Т. 98, №4. С. 132–140. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-132-140.
9. Borukaev T.A., Shaov A.Kh., Kharaev A.M., Kyarov A.A. Fire Resistance and Physical-Mechanical Properties of Polyamide-6 and Polypropylene Containing Salts Based on Melamine and Mineral Acids // Polymer Science. Series D. 2020. Vol. 13, N1. pp. 95–100. DOI: 10.1134/S1995421220010098.
10. Борукаев Т.А., Саламов А.Х., Маламатов А.Х., Паштова Л.Р. Влияние добавки $(Mg(OH))_2CO_3$ на некоторые характеристики пожарной опасности и физико-механические свойства ПЭНД // Материаловедение. 2024. №12. С. 30–37. DOI: 10.31044/1684-579X-2024-0-12-30-37.
11. Богданова В.В., Кобец О.И., Бурая О.Н. Механизм огнезадерживающего действия азот- и фосфорсодержащих антипиренов в полимерах различных классов // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. 2023. №1. С. 3–19. DOI: 10.33581/2520-257X-2023-1-3-19.
12. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19, №8. С. 11–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/09.06.2025>.
13. Ломакин С.М., Заиков Г.Е., Микитаев А.К. Замедлители горения полимеров // Энциклопедия инженера-химика. 2011. №9. С. 22–33. EDN: OCRGFF.
14. Максимов В.Р., Петросян Г.О. Влияние функциональных наполнителей на характеристики пенококса эпоксидных огнезащитных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2023. №1/2. С. 47–55. URL: <https://rucont.ru/efd/788528> (10.06.2025).
15. Евтушенко Ю.М., Григорьев Ю.А., Кучкина И.О. и др. Влияние комплексного антипирена на физико-химические свойства ортофталевой ненасыщенной смолы // Пластические массы. 2020. №1–2. С. 26–29. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-1-2-26-29.