

## КРИТЕРИИ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ ДЛЯ НЕТКАНЫХ ТОНКОВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИЭФИРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Назарович А.Н., Рева О.В.

*Цель.* Выявление важнейших критериев эффективности неорганических замедлителей горения по отношению к объемным полиэфирным материалам и особенностей термоокислительной деструкции модифицированных ими полиэфирных теплоизоляционных материалов.

*Методы.* Теоретический метод сравнительного анализа, экспериментальные методы гравиметрии, просвечивающей электронной микроскопии, дифференциально-сканирующей калориметрии, ГОСТированные огневые испытания.

*Результаты.* Исследовано влияние химического и гранулометрического состава аммонийно-фосфатных замедлителей горения на эффективность поверхностной огнезащиты и закономерности термоокислительной деструкции модифицированных ими полиэфирных волокнистых материалов. Доказано, что наиболее эффективны коллоидные системы с размерами частиц не более 50 нм, содержащие компоненты как газофазного, так и твердофазного действия. Сформулированы принципы разработки синтетических неорганических замедлителей горения для тонковолокнистых полимерных материалов.

*Область применения исследований.* Полученные результаты являются основой целенаправленного синтеза новых нетоксичных замедлителей горения для тонковолокнистых полиэфирных материалов различного назначения, в том числе строительных утеплителей и звукоизоляторов.

*Ключевые слова:* огнестойкие полиэфирные волокна, металлофосфатные замедлители горения, коллоидные частицы.

(Поступила в редакцию 13 июля 2022 г.)

### Введение

В настоящее время в строительстве различных объектов широко применяются традиционные теплоизоляционные материалы на основе минеральных волокон, плиты из минеральной ваты с синтетическим связующим, стеклянных штапельных волокон, пенопласта на основе фенолоформальдегидных смол, маты теплоизоляционные из минеральной ваты вертикально-слоистые, плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на битумном связующем, теплоизоляционные материалы из стекловолокна и др. Они обладают хорошими тепло- и шумоизолирующими свойствами и достаточно экономичны. Однако теплоизолирующие материалы на основе минеральных волокон имеют и существенные недостатки: они характеризуются низкой влагостойкостью, в процессе монтажа и эксплуатации могут выделяться вредные пары углеводородов и пыль базальтовых и стеклянных волокон, которые оказывают негативное влияние на слизистые оболочки глаз, органы дыхания и кожные покровы человека. Синтетические связующие, а также компоненты обеспыливающих органических добавок в материалах на основе минеральных волокон отрицательно влияют на окружающую среду. Для упрочнения структуры теплоизолирующих материалов из стеклянных или базальтовых волокон в их состав вводятся фенолформальдегидные смолы, которые в процессе длительной эксплуатации разрушаются и выделяют в окружающую среду формальдегид, являющийся токсичным веществом [1].

В последнее время в строительстве начали применяться нетканые теплоизоляционные материалы, вырабатываемые из синтетических полиэфирных волокон. Область их применения постоянно расширяется: от тепловой изоляции трубопроводов, жилых и нежилых построек, полного и частичного утепления стен, кровли, фундаментов до звукопогло-

щающих и звукоизолирующих конструкций. Применение таких утеплителей в строительстве позволяет не только снизить потери тепла, но и экономить основные стройматериалы: кирпич, древесину, бетон и др. Широкое применение теплоизоляционные материалы из синтетических полимеров, в частности полиэфирных, нашли также в методе «сэндвич-панелей», причем в панелях часто используются многослойные комбинации различных материалов<sup>1</sup>.

В странах ближнего зарубежья широко представлены различные виды синтетических утеплителей с разными торговыми названиями: синтепон, «Холлофайбер», «Пенофол», «Тинсулейт», «Файбертек», а также «Шелтер», «Изософт», «Шерстипон» [2]. На отечественном рынке лидирующую позицию занимает «Акотерм», теплоизоляция из полиэфирных волокон. Большой интерес к теплоизоляционным материалам из полиэфирных волокон обусловлен высокими техническими характеристиками, которыми обладает волокно: высокая прочность, износостойкость, устойчивость к влиянию атмосферных осадков, растворителей органического происхождения, однородность по толщине, устойчивость к многократным деформациям, истиранию, относительно низкая стоимость и доступность сырья [3]. Полиэфирные волокна не выделяют опасных веществ в процессе длительной эксплуатации в широком диапазоне температур. Практически единственным недостатком этих материалов является высокая горючесть [4].

Воспламенение и горение полиэфирных материалов происходит аналогично другим горючим твердым полимерам с одновременным осуществлением как химических реакций деструкции макромолекул полимера, окисления ее горючих продуктов в газовой фазе, сшивания и карбонизации нелетучих продуктов в твердой фазе, так и физических процессов интенсивной диффузии и тепло- и массопередачи [5–7].

Особенность объемных нетканых полиэфирных утеплителей и звукоизоляционных материалов – сквозная пористость и малая теплопроводность, что уменьшает теплопотери при горении [8]. Одновременно рыхлость материала обеспечивает активное поступление воздуха в зону горения, что в сочетании с небольшим поперечным размером волокон и нитей и высокой удельной поверхностью приводит к очень быстрому их разогреву. Это способствует повышению скорости пиролиза полиэфирного нетканого утеплителя и вызывает быстрое развитие пламенной зоны. Поэтому многие вопросы в области снижения горючести и воспламеняемости объемных воздушно наполненных полиэфирных материалов остаются до настоящего времени актуальными.

Способы огнезащиты синтетических материалов основаны на принципе разрыва цикла горения волокнообразующего полимера одновременно в конденсированной и газовой фазах с целью изменения направления процесса горения в сторону образования массивного карбонизированного остатка и выхода в газовую фазу негорючих продуктов разложения антипирена [5].

Из существующих технологий получения огнезащитных синтетических материалов (модификация моновязких полимеров, введение синергических смесей антипиренов в расплав, крейзинг, облучение реакционных смесей высокоэнергетическими импульсами [9]) для утеплительных нетканых материалов чаще всего используется пропитка или спрейная обработка водными растворами замедлителей горения с пленкообразующими агентами как наиболее экономичная и технически доступная.

Для прочного закрепления неорганического антипирена на поверхности полиэфирных волокон мы разработали метод химической пришивки замедлителя горения к диэлектрику через адгезионный слой коллоидных частиц соединений Sn(II) [10]. Ряд факторов, влияющих на эффективность такой огнезащитной обработки, изучен в работах [11–13],

<sup>1</sup> Общая информация о теплоизоляционных материалах и их классификация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fermeram.com/obshhaja-informacija-o-teploizoljacionnyh-materialah-i-ih-klassifikacija.html> #Синтетические\_современные\_утеплители\_для\_стен\_внутри\_коттеджа. – Дата доступа: 07.07.2022.

причем несмотря на обнаруженные закономерности, оптимальный химический, фазовый и гранулометрический состав огнезащитной композиции для каждого типа материала часто подбирается эмпирически.

Целью данной работы было выявление важнейших критериев эффективности неорганических замедлителей горения по отношению к объемным полиэфирным материалам и особенностей термоокислительной деструкции модифицированных ими полиэфирных теплоизоляционных материалов.

### Основная часть

**Методы исследования.** В данной работе выбор был остановлен на полиэфирном звуко- и теплоизоляционном материале производства «Акотерм», изготавливаемом в Республике Беларусь и широко применяющемся на различных объектах.

Огнезащитная обработка полиэфирного теплоизоляционного материала проводилась следующим способом: травление в 10 %-м растворе КОН в течение 8–10 мин, промывка, пропитка в течение 10 мин в коллоидном этанольном растворе SnCl<sub>2</sub> (срок хранения 15 суток), промывка и пропитка полиэфирной теплоизоляции антипиренами в течение 8–10 мин с последующей сушкой в сушильном шкафу при температуре 100–120 °С. Стандартная для текстильных материалов стадия термофиксации не проводилась, поскольку температура размягчения сополимера полиэфира «оболочки» волокна составляет 110–130 °С, а температура плавления «ядра» волокна – 258–261 °С<sup>2</sup>. Термоскрепленное волокно оплавляется, материал теряет упругость, пушистость, мягкость и геометрические характеристики.

В качестве замедлителей горения использовали синтетические огнезащитные композиции КБ-2 четырех модификаций, СиАНС, и СиАН 6.5-20, представляющие собой сложносоставные дисперсные системы на основе аммонийных фосфатов двух- и трехвалентных металлов различного гранулометрического и катионно-анионного состава (табл. 1).

**Таблица 1. – Компонентный состав синтетических комплексных металлофосфатных замедлителей горения**

Антипирен	Состав
СиАНС	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : FeO : SO <sub>3</sub> : NH <sub>3</sub>
СиАН 6,5	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : SO <sub>4</sub> : NH(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>
КБ-2 мод 1	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : SO <sub>4</sub> : NH <sub>3</sub> : Na <sub>2</sub> O
КБ-2 мод 2	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : SO <sub>4</sub> : NH <sub>3</sub> : CaO
КБ-2 мод 3	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : HCl : NH <sub>3</sub>
КБ-2 мод 4	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : HCl : NH <sub>3</sub> : Na <sub>2</sub> O

Содержание огнезащитной композиции на полиэфирном утеплителе в единице объема поверхностного слоя мг/см<sup>3</sup> определяли с помощью аналитических весов OHAUS Pioneer (РХ). Удельный привес антипирена к полиэфирному материалу после обработки  $m_{уд}$  (мг/см<sup>3</sup>) и общий привес антипирена в процентном соотношении  $\Delta m\%$  определяли по следующим формулам:

$$m_{уд} = \frac{m_1 - m_0}{V}, \quad (1)$$

$$\Delta m\% = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $m_0$  – исходная масса образца, мг;

$m_1$  – масса образца после обработки антипиреном, мг;

$V$  – объем образца, см<sup>3</sup>.

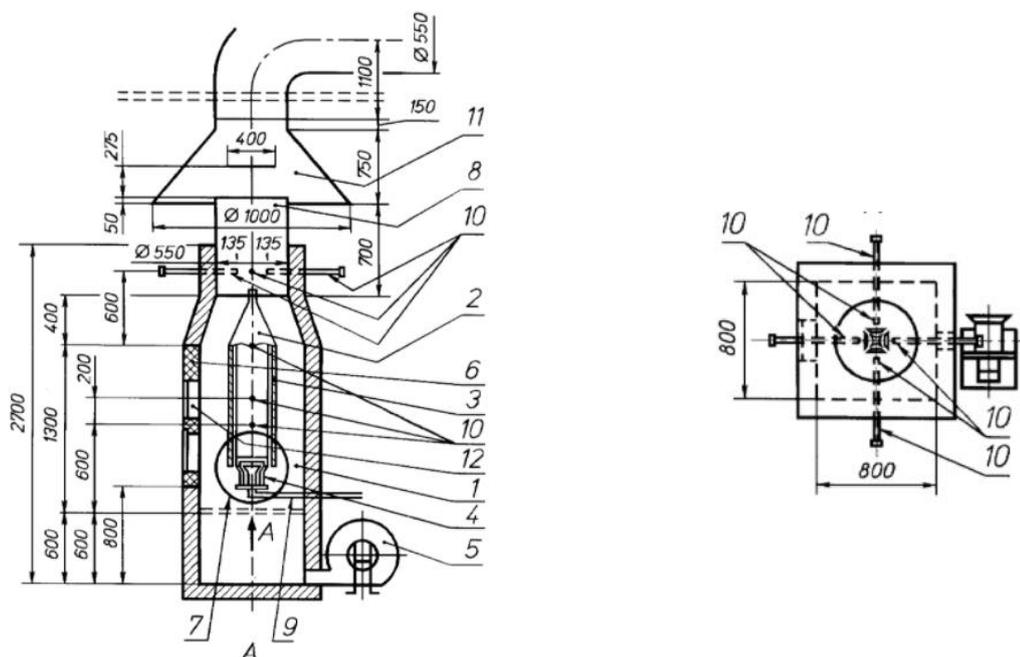
<sup>2</sup> Полиэфирное волокно [Электронный ресурс] // РосХимВолокно. – Режим доступа: [https://www.roshimvolokno.ru/poliefirnoe\\_volokno.php](https://www.roshimvolokno.ru/poliefirnoe_volokno.php). – Дата доступа: 07.07.2022.

Исследование размеров, формы и концентрации коллоидных частиц в объеме огнезащитных композиций проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа LEO 906E. Препарирование частиц твердой фазы проводили в соответствии с работой [14]. Пленку коллодия, полученную растеканием на поверхности дистиллированной воды 2 %-го раствора коллодия в амилацетате, наносили на медную сеточку и высушивали. После испарения растворителя и сушки наносили на пленку каплю исследуемого раствора. Затем пленку коллодия на сеточке несколько раз ополаскивали дистиллированной водой для удаления растворимых солей и высушивали. Минимально различимые при просмотре на электронном микроскопе частицы имели размер ~1 нм.

Огневые испытания проводились согласно СТБ 11.03.02-2011<sup>3</sup> (п. 6.6 Метод определения огнезащитной эффективности пропиток для тканей). Метод состоит в определении воспламеняемости тканей. Образцы утеплителя закрепляли на рамку таким образом, чтобы нижняя кромка образца выходила за нижнюю шпильку на 5 мм. Горелку устанавливали под углом 60° к горизонтали таким образом, чтобы пламя касалось нижней кромки образца. Время воздействия пламени на образец – 15 с. При проведении испытаний фиксировали время остаточного горения, наличие пробежки пламени по поверхности образца, возгорание или тление хлопчатобумажной ваты от падающих частей или горящих капель испытуемого образца, время остаточного тления.

Определение степени горючести проводилось по требованиям ГОСТ 30244-94<sup>4</sup> (метод II) в испытательной лаборатории Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.

Установка для определения группы горючести – шахтная печь – состоит из камеры сжигания, системы подачи воздуха в камеру сжигания, газоотводной трубы и вентиляционной системы для удаления продуктов сгорания (рис. 1).



1 – камера сжигания; 2 – держатель образца; 3 – образец; 4 – газовая горелка; 5 – вентилятор подачи воздуха; 6 – дверца камеры сжигания; 7 – диафрагма; 8 – вентиляционная труба; 9 – газопровод; 10 – термопары; 11 – вытяжной зонт; 12 – смотровое окно

**Рисунок 1. – Общий вид установки для определения группы горючести**

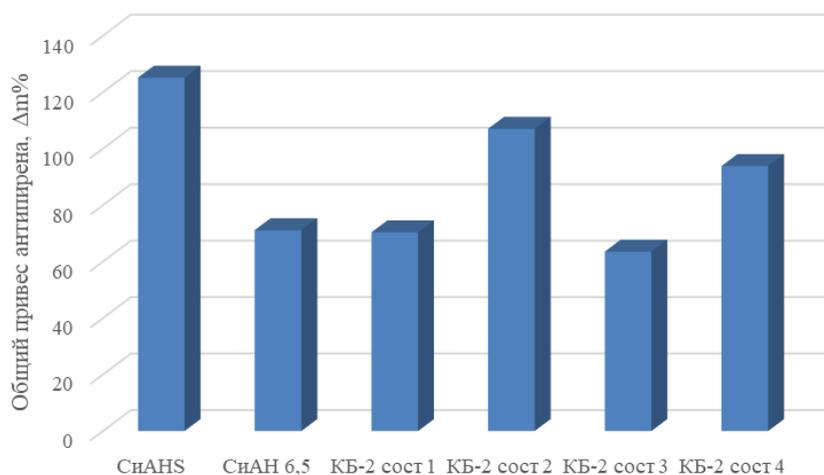
<sup>3</sup> Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 01.01.11. – Минск: Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 2011. – 25 с.

<sup>4</sup> Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть: ГОСТ 30244-94. – Введ. 01.01.96. – М.: Стандартинформ, 2008. – 28 с.

В соответствии с требованиями указанного нормативного документа для определения группы горючести материалов оцениваются следующие параметры: температура дымовых газов, степень повреждения по длине, степень повреждения по массе, продолжительность самостоятельного горения (тления), для материалов групп горючести Г1–Г3 не допускается образование капель расплава.

Дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический анализ (ТГА) исходного и огнезащитного полиэфирного утеплителя проводили на приборе «Термоскан-2» с регистрацией изменения массы образца и процессов, сопровождающихся выделением или поглощением тепла.

**Результаты и обсуждение.** Результаты гравиметрических исследований показали, что в результате пропиточной огнезащитной обработки полиэфирной теплоизоляции композициями металлофосфатных антипиренов масса образца увеличивается в 1,5–2,5 раза (рис. 2). Однако в результате стирки значительная часть замедлителя горения вымывается и на материале остается только хемосорбированный антипирен (табл. 2).



**Рисунок 2. – Относительный привес металлофосфатных замедлителей горения в результате обработки полиэфирного волокнистого нетканого утеплителя**

Наибольшее закрепление компонентов замедлителя горения на полиэфирном нетканом утеплителе наблюдается для огнезащитных композиций SiAHS и KB-2 мод 2: 1,24 и 0,09 мг/см<sup>3</sup> соответственно, хотя по результатам огневых испытаний все изученные металлофосфатные составы обеспечивают обработанному полиэфирному материалу категорию стойкости к горению на уровне «трудновоспламеняемый» (табл. 2).

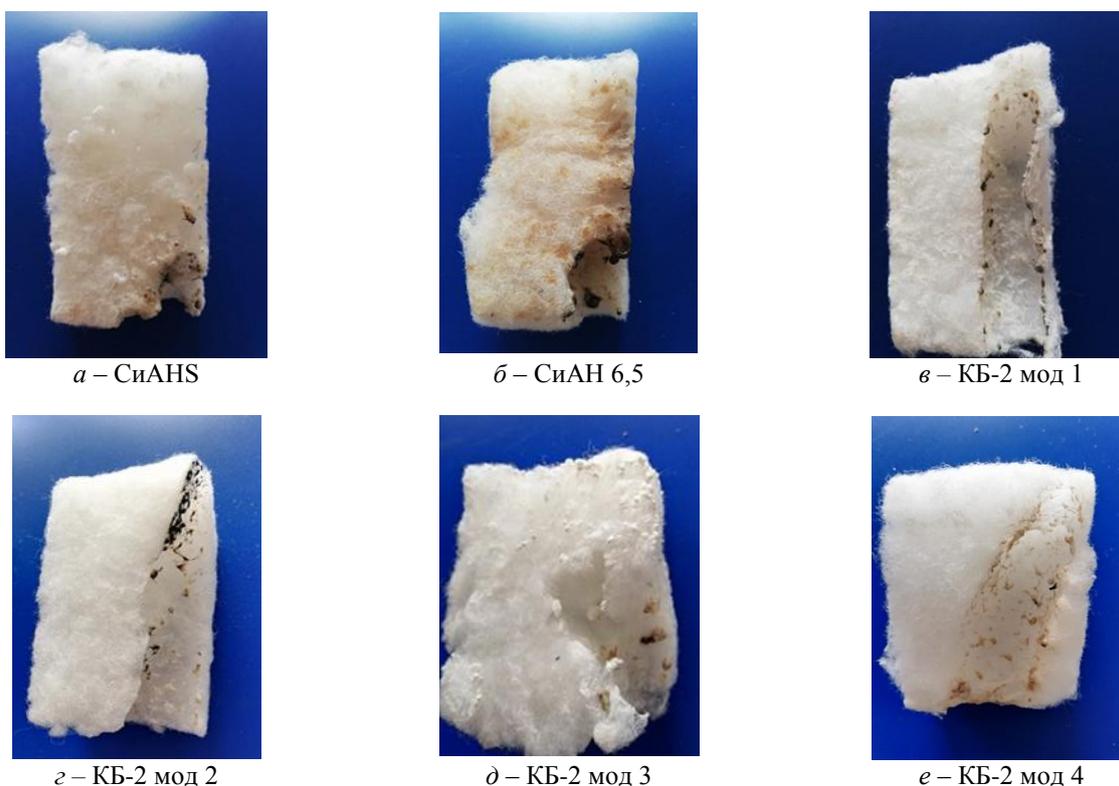
**Таблица 2. – Результаты огневых испытаний полиэфирного материала согласно требованиям СТБ 11.03.02-2011**

Замедлитель горения	Δm на материале после обработки, мг/см <sup>3</sup>	Δm после стирки, мг/см <sup>3</sup>	Время самостоятельного горения, с	Наличие горящих капель, +/-	Классификация по горючести
Необработанный материал	–		11–15	+	Легковоспламеняемый
SiAHS	17,62–23,11	0,47	–	–	Трудновоспламеняемый
SiAN 6,5	10,70–11,73	1,24	–	–	Трудновоспламеняемый
KB-2 мод 1	11,20–11,73	0,11	–	–	Трудновоспламеняемый
KB-2 мод 2	17,49–18,26	0,09	–	–	Трудновоспламеняемый
KB-2 мод 3	8,91–11,15	0,02	–	–	Трудновоспламеняемый
KB-2 мод 4	13,01–13,80	0,01	–	–	Трудновоспламеняемый

Так, в результате проведения огневых испытаний по методике СТБ 11.03.02-2010 установлено, что исходный образец нетканого полиэфирного утеплителя после кратковременного поджигания продолжает активное горение с растеканием горящих капель.

В случае проведения пропиточной огнезащитной обработки полиэфирного нетканого теплоизоляционного материала любым из изученных составов после отнятия пламени полиэфирный утеплитель сразу же затухает. На фотографиях видно, что при проведении испытаний сгорела только та часть образца, которая находилась непосредственно в пламени горелки (рис. 3). Оставшаяся неповрежденная часть утеплителя практически не деформирована и не потеряла функциональных свойств. Согласно требованиям СТБ 11.03.02-2010 такой материал классифицируется как трудновоспламеняемый.

Таким образом, только по результатам огневых испытаний все исследованные огнезащитные композиции удовлетворяют предъявляемым требованиям. Однако огнезащитные составы серии СиАН являются мутными и склонны к расслаиванию. Как следствие, после обработки волокнистого полиэфирного материала происходит некоторая потеря объема утеплителя, увеличение его жесткости и частичное высаливание компонентов замедлителя горения на поверхности материала с осыпанием порошка при хранении и монтаже.



**Рисунок 3. – Образцы полиэфирной теплоизоляции, обработанные антипиренами после огневого испытания**

Огнезащитные составы серии КБ, представляющие собой длительно стабильные прозрачные растворы, практически не изменяют внешнего вида обработанного материала, что имеет важное технологическое и эксплуатационное значение.

Поскольку принципиальных отличий в химическом составе исследованных неорганических антипиренов нет, но они имеются в способе синтеза и нейтрализации композиций, а также наличии микродобавок, представляется важным выяснить отличия в дисперсности данных огнезащитных составов. Методом ПЭМ было установлено, что огнезащитные композиции СиАHS и СиАН 6,5 – сложносоставные тонкодисперсные системы, в которых частицы нерастворимой твердой фазы имеют размеры не более долей микрона, а в растворной части присутствуют коллоидные частицы с размерами 25–75 нм (рис. 4). Эти частицы со временем агрегируют в конгломераты с размерами до 150–200 нм, однако первичные зерна почти не увеличиваются (рис. 4). Для огнезащитной композиции КБ-2 характерно отсутствие нерастворимых частиц микронных размеров, тогда как в ее объеме

наличествуют устойчивые к агрегации длительное время коллоидные частицы с размерами 10–50 нм (рис. 4). Таким образом, все исследованные замедлители горения содержат коллоидную фазу, способную взаимодействовать с наноразмерными частицами соединений олова, хемосорбированными на активированном полиэфирном материале. Однако наиболее мелкодисперсные и однородные частицы с размерами 10–50 нм, сохраняющие длительное время свои частотно-размерные характеристики, обнаружены в составах серии КБ-2, которые оказались наиболее эффективны по отношению к огнезащите нетканых полиэфирных материалов с учетом ряда дополнительных требований.

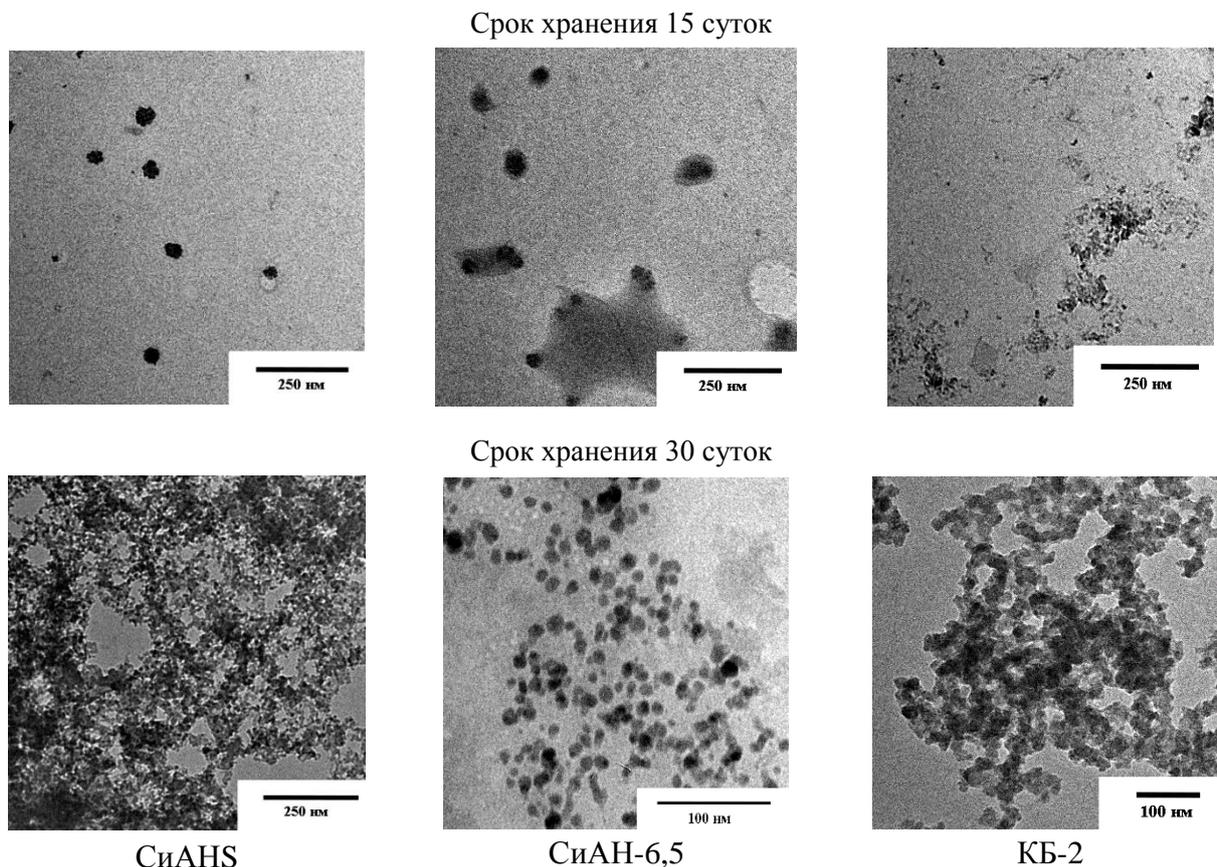


Рисунок 4. – ПЭМ фотографии частиц, формирующихся в растворяющей части огнезащитных композиций SiAHS, SiAH-6,5, КБ-2

Поскольку нетканые полиэфирные утеплители представляют собой не текстильные изделия, а отделочные звуко- и теплоизоляционные материалы, весьма важным является определение их стойкости к горению в более жестких условиях по ГОСТ 30244-94, который относится к строительным материалам. Составы серии КБ были использованы для обработки полиэфирных нетканых волокнистых материалов, испытанных в шахтной печи в испытательной лаборатории Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.

Согласно ГОСТ 30244-94 испытание заключается в одновременном сжигании 4 полотн. Материал теплоизоляции закрепляют на четырех прямоугольных рамах, расположенных по периметру источника зажигания (рис. 5). На протяжении 10 мин происходит воздействие на образец пламени от источника зажигания и фиксируется увеличение температуры в камере сжигания. По истечении 10 мин источник пламени выключают. При наличии пламени или признаков тления фиксируют продолжительность самостоятельного горения. Для каждого испытания определяют температуру дымовых газов, продолжительность горения или тления, длину повреждения образца, массу образца до и после испытания.

В результате проведенных огневых испытаний установлено, что для исходного полиэфирного материала во всех случаях присутствовало сквозное прогорание образцов с существенным повреждением как по длине, так и по массе (рис. 5, табл. 3). На поверхности испытанных образцов присутствовало локальное вспучивание и спекание материала, происходило образование горящих капель расплавленного полимера; средняя температура дымовых газов достигала 149,3 °С (рис. 5, табл. 3).



*а* – исходные образцы  
*б* – образцы, пропитанные КБ-2  
**Рисунок 5. – Испытания в шахтной печи и образцы после проведения испытаний по ГОСТ 30244-94**

Следовательно, данный материал с высокой вероятностью воспламенится при попадании искры и станет самостоятельным источником горения, что недопустимо для объектов с массовым пребыванием людей или промышленных зданий и сооружений с потенциально пожароопасным производством. Данный материал согласно требованиям ГОСТ 30244-94 относится к группе горючести Г4.

Для обработанного замедлителем горения КБ-2 полиэфирного утеплителя во всех случаях сквозное прогорание материала отсутствует, степень повреждения по массе не превышает 2 %. Средняя температура дымовых газов составила 127,4 °С (табл. 3, рис. 6). На поверхности испытанных образцов присутствовало локальное вспучивание в зоне воздействия пламени, однако образование горящих капель расплавленного полимера и самостоятельное горение не наблюдались. Данный материал по требованиям ГОСТ 30244-94 относится к группе горючести Г1.

Таблица 3. – Результаты огневых испытаний полиэфирной теплоизоляции согласно требованиям ГОСТ 30244-94 (метод II)

Определяемые характеристики	Исходный образец – полиэфирный материал	Полиэфирный утеплитель, обработанный композицией КБ-2
Температура дымовых газов $T$ , °С	149,3	127,4
Продолжительность самостоятельного горения $t_{с.г.}$ , с	–	–
Степень повреждения по длине $S_L$ , %	25,1	10,2
Степень повреждения по массе $S_m$ , %	11,3	1,85
Наличие горящих капель, +/-	+	–

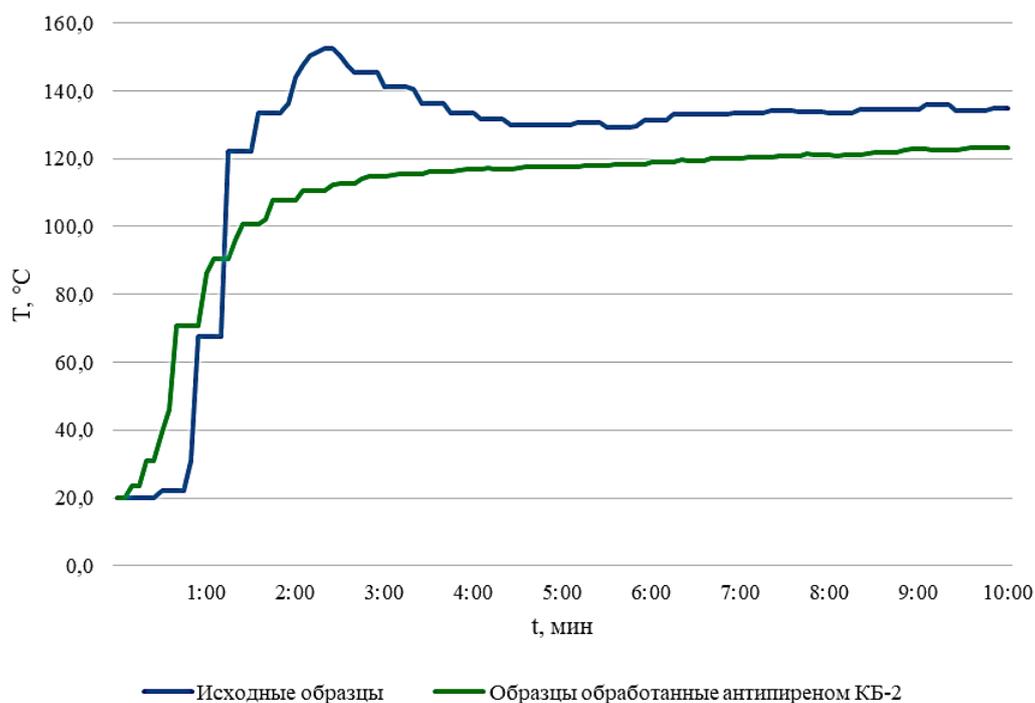
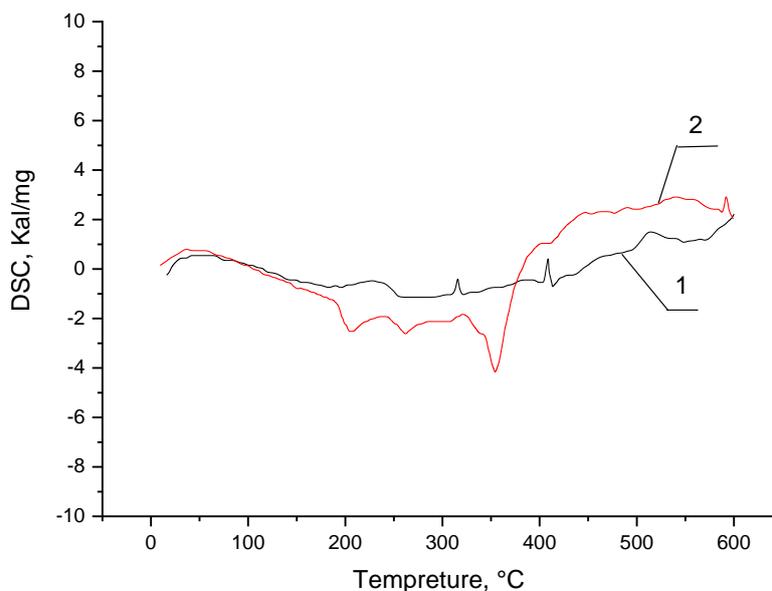


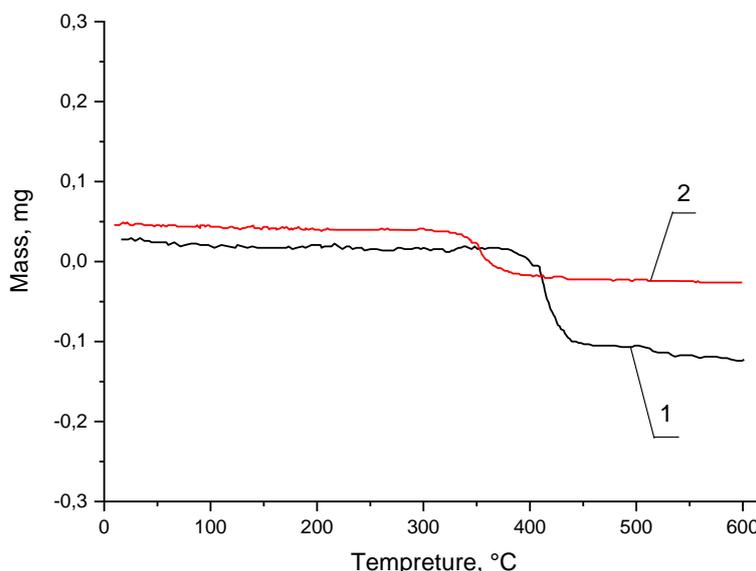
Рисунок 6. – Изменение средней по четырем термопарам температуры дымовых газов во время испытания в шахтной печи

Проведенные исследования и огневые испытания свидетельствуют, что поверхностная огнезащитная обработка нетканого полиэфирного утеплителя неорганической металлофосфатной коллоидосодержащей композицией КБ-2 приводит к существенному изменению закономерностей его термодеструкции и горения. Для выяснения особенностей огнезамедлительного действия данного состава было проведено исследование закономерностей термодеструкции огнезащищенного полиэфирного нетканого утеплителя методом дифференциально-сканирующей калориметрии (рис. 7).

Полученные результаты свидетельствуют о существенном замедлении термодеструкции полиэфирного материала вследствие огнезащитной обработки. Потеря массы модифицированным полиэфирным волокнистым материалом начинается при  $\sim 320$  °С, тогда как для необработанного образца – при 380 °С (рис. 7); суммарная потеря массы огнезащищенным утеплителем не менее чем на 35 % ниже по сравнению с исходным материалом. Очевидно, в отличие от необработанного полимерного материала, для огнезащищенного образца потеря массы при более низких температурах происходит не за счет распада полимерного скелета и деструкции крупных мономеров, а в значительной степени связана с разложением компонентов антипирена и выходом в газовую фазу ингибиторов горения. Этот вывод доказывается появлением на дифференциальной кривой эндотермических пиков в областях температур 200, 260, 360 °С, явно соответствующих поглощению тепла на выделение связанной воды из кристаллогидратов, плавление и разложение компонентов замедлителя горения.



а – дифференциальный термический анализ (ДТА)



б – термогравиметрия (ТГ)

1 – исходный образец; 2 – после огнезащитной обработки композицией КБ-2

Рисунок 7. – Кривые ДТА и ТГ для полиэфирного теплоизоляционного материала

При этом экзотермический пик при  $\sim 510$  °С, соответствующий началу пламенного горения летучих продуктов распада полиэфирных звеньев, для модифицированного образца отсутствует (рис. 7); небольшой пик, который можно отнести к горению органических «осколков», обнаруживается только при 590 °С. Таким образом, для нетканого полиэфирного утеплителя, модифицированного антипиреном КБ-2, в области температур 180–360 °С происходят комплексные процессы одновременного расплавления и разложения антипирена и полимера с вероятным взаимодействием продуктов деструкции замедлителя горения с полимером в конденсированной фазе.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что количество огнезащитной композиции, химически закрепленной на нетканом волокнистом полиэфирном материале без термофиксации, существенно зависит от химического и гранулометрического состава антипирена. Наилучшие результаты не только по устойчивости к горению, но и по физико-

механическим и эксплуатационным свойствам обработанного волокнистого полиэфирного материала обеспечивает синтетический аммонийно-металлофосфатный замедлитель горения КБ-2 мод 2, в объеме которого присутствуют коллоидные частицы с размерами 10–50 нм.

Обработка полиэфирного утеплителя данным замедлителем горения обеспечивает материалу наивысшую категорию стойкости к горению «трудновоспламеняемый» согласно требованиям СТБ 11.03.02-2010 (для текстильных материалов) и группу горючести Г1 по ГОСТ 30244-94 для строительных материалов. Результаты огневых испытаний и дифференциально-сканирующей калориметрии доказывают существенное изменение закономерностей термодеструкции огнезащищенного полиэфирного материала: замедление разложения полимера за счет поглощения тепла замедлителем горения с формированием коксового слоя и выходом ингибиторов горения в газовую фазу.

Таким образом, полученные результаты позволяют сформулировать следующие принципы разработки новых синтетических неорганических замедлителей горения для тонковолокнистых полимерных материалов: огнезащитная композиция должна быть тонкодисперсной коллоидной системой с размером частиц не более 50 нм, что реализуется в присутствии в ее составе ионов металлов, и содержать компоненты как твердофазного (фосфаты), так и газофазного (аммонийные соединения) действия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенкова, Л.Н., Перспективы применения нетканых теплоизоляционных материалов / Л.Н. Лисиенкова, Л.Ю. Комарова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 4. – С. 26–31. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-26-31. – EDN: YUNNMX.
2. Мухамеджанов, Г.К. Нетканые теплоизоляционные строительные материалы и изделия / Г.К. Мухамеджанов // Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии. – 2013. – Вып. 3. – С. 26–29.
3. Перепелкин, К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы: монография / К.Е. Перепелкин. – СПб.: Изд-во СПГУТД, 2008. – 354 с.
4. Булгаков, В.К. Моделирование горения полимерных материалов / В.К. Булгаков, В.Н. Кодолов, А.М. Липанов. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
5. Асеева, Р.М. Горение полимерных материалов / Р.М. Асеева, Г.Е. Заиков. – М.: Наука, 1981. – 280 с.
6. Кодолов, В.И. Замедлители горения полимерных материалов / В.И. Кодолов. – М.: Химия, 1980. – 274 с.
7. Копылов, В.В. Полимерные материалы с пониженной горючестью: монография / В.В. Копылов [и др.]; под ред. А.Н. Праведникова. – М.: Химия, 1986. – 224 с.
8. Перепелкин, К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты: монография / К.Е. Перепелкин. – СПб.: Изд-во «Научные основы и технологии», 2015. – 380 с.
9. Зубкова, Н.С. Регулирование процессов термоллиза и горения термопластичных волокнообразующих полимеров и создание материалов с пониженной горючестью: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.06 / Н.С. Зубкова. – Мытищи, 1998. – 333 л.
10. Рева, О.В. Влияние природы органических растворителей на стабильность и активирующую способность коллоидных растворов SnCl<sub>2</sub> / О.В. Рева [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. 2020. – Т. 56, № 4. – С. 434–444. – DOI: 10.29235/1561-8331-2020-56-4-434-444. – EDN: SGCMZP.
11. Рева, О.В. Влияние состава неорганических замедлителей горения, хемосорбированных на полиэфирном волокнистом материале, на закономерности его термодеструкции / О.В. Рева [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 4–12. – EDN: VKXNRF.
12. Рева, О.В. Исследование закономерностей формирования и характеристик коллоидных частиц в оловосодержащих органозолях, предназначенных для активации поверхности полиэфирных волокнистых материалов / О.В. Рева [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2017. – Т. 90, вып. 6. – С. 778–786. – EDN: ZGFUGH.

13. Рева, О.В. Синтез и исследование огнезащитных свойств новых металлофосфатных замедлителей горения для текстильных материалов, используемых в защитной одежде / О.В. Рева [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 4. – С. 402–417. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-4.402. – EDN: PMSJNB.
14. Воробьева, Т.Н. Задание и методические указания к лабораторному практикуму по спецкурсу «Методы исследования твердых тел». Раздел «Электроннография и электронная микроскопия»: учеб. издание / Т.Н. Воробьева. – Минск: БГУ, 2007. – 37 с.

**Критерии разработки эффективных неорганических замедлителей горения  
для нетканых тонковолокнистых полиэфирных материалов**

**Criteria for the development of effective inorganic flame retardants  
for nonwoven fine fiber polyester materials**

---

***Назарович Андрей Николаевич***

Министерство по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь, отдел науки  
и инновационного развития,  
главный специалист

Адрес: ул. Революционная, 5,  
220030, г. Минск, Беларусь  
Email: nazarovich.andry@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-2547-4806

***Andrei N. Nazarovich***

Ministry of Emergency Situations  
of the Republic of Belarus, Department  
of Scientific and Innovation Development,  
Chief Specialist

Address: Revolyutsionnaya str., 5,  
220030, Minsk, Belarus  
Email: nazarovich.andry@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-2547-4806

---

***Рева Ольга Владимировна***

кандидат химических наук, доцент

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра  
химической, биологической, радиационной  
и ядерной защиты, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
Email: volha107@rambler.ru  
ORCID: 0000-0003-4006-8678

***Olga V. Reva***

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Chemical, Biological, Radiation  
and Nuclear Protection, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: volha107@rambler.ru  
ORCID: 0000-0003-4006-8678

## CRITERIA FOR THE DEVELOPMENT OF EFFECTIVE INORGANIC FLAME RETARDANTS FOR NONWOVEN FINE FIBER POLYESTER MATERIALS

Nazarovich A.N., Reva O.V.

*Purpose.* Identification of the most important criteria for the effectiveness of inorganic flame retardants in relation to bulk polyester materials and the features of thermal-oxidative degradation of polyester heat-insulating materials modified by them.

*Methods.* Theoretical method of comparative analysis, experimental methods of gravimetry, transmission electron microscopy, differential scanning calorimetry, GOST fire tests.

*Findings.* The influence of the chemical and particle size distribution of ammonium phosphate flame retardants on the effectiveness of surface fire protection and the laws of thermo-oxidative destruction of polyester fiber materials modified by them was investigated. It has been proven that colloidal systems with particle sizes of no more than 50 nm, containing components of both gas-phase and solid-phase action, are the most effective. The principles for the development of synthetic inorganic flame retardants for fine-fiber polymeric materials are formulated.

*Application field of research.* The results obtained are the basis for the targeted synthesis of new non-toxic flame retardants for fine-fiber polyester materials for various purposes including building insulation and sound insulator.

*Keywords:* flame protected polyester fibers, metal phosphate flame retardant, colloidal particles.

(The date of submitting: July 13, 2022)

### REFERENCES

1. Lisienkova L.N., Komarova L.Yu. Perspektivy primeneniya netkanykh teploizolyatsionnykh materialov [Prospects for the use of non-woven thermal insulation materials]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2021. Iss. 4. Pp 26–31. (rus). DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-26-31. EDN: YYHHMX.
2. Mukhamedzhanov G.K. Netkanye teploizolyatsionnye stroitel'nye materialy i izdeliya [Non-woven heat-insulating building materials and products]. *Polymer materials. Products, equipment, technology*, 2013. Iss.3. Pp. 26–29. (rus)
3. Perepelkin K.E. *Khimicheskie volokna: razvitie proizvodstva, metody polucheniya, svoystva, perspektivy: monografiya* [Chemical fibers: development of production, manufacturing methods, properties, prospects]: monograph. St. Petersburg: SPGUTD, 2008. 354 p. (rus)
4. Bulgakov V.K., Kodolov V.N., Lipanov A.M. *Modelirovanie goreniya polimernykh materialov* [Modeling of combustion of polymeric materials]. Moscow: Khimiya, 1990. 238 p. (rus)
5. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Gorenie polimernykh materialov* [Combustion of polymeric materials]. Moscow: Nauka, 1981. 280 p. (rus)
6. Kodolov V.I. *Zamedliteli goreniya polimernykh materialov* [Flame retardants for polymeric materials]. Moscow: Khimiya, 1980. 274 p. (rus)
7. Kopylov V.V., Novikov S.N., Oksent'evich L.A., Gefter E.L., Korotkevich S.Kh., Rilo R.P. *Polimernye materialy s ponizhennoy goryuchest'yu* [Polymeric materials with reduced flammability]: monograph. Ed. by A.N. Pravednikov. Moscow: Khimiya, 1986. 224 p. (rus)
8. Perepelkin, K.E. *Armiruyushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity* [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites]: monograph. St. Petersburg: Izd. Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2015. 380 p. (rus)
9. Zubkova N.S. *Regulirovanie protsessov termoliza i goreniya termoplastichnykh voloknoobrazuyushchikh polimerov i sozдание materialov s ponizhennoy goryuchest'yu* [Regulation of the processes of thermolysis and combustion of thermoplastic fiber-forming polymers and the creation of materials with reduced flammability]. Grand PhD chemical sci. diss.: 02.00.06. Mytishchi, 1998. 333 p. (rus)
10. Reva O.V., Nazarovich A.N., Bogdanova V.V., Vrublevskiy A.V. Vliyanie prirody organicheskikh rastvoriteley na stabil'nost' i aktiviruyushchuyu sposobnost' kolloidnykh rastvorov SnCl<sub>2</sub> [Influence of the organic solvents nature on the stability and activating ability of SnCl<sub>2</sub> colloidal solutions]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 2020. Vol. 56, No 4. Pp. 434–444. (rus). DOI: 10.29235/1561-8331-2020-56-4-434-444. EDN: SGCMZP.

11. Reva O.V., Bogdanova V.V., Nazarovich A.N., Shukelo Z.V. Vliyaniye sostava neorganicheskikh zamedliteley goreniya, khemosorbiruyemykh na poliefirnom voloknistom materiale, na zakonomernosti ego termodestruktsii [Influence of inorganic flame retardants, chemisorbed on polyester fiber materials on the patterns of its thermal destruction]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 23 (1). Pp. 4–12. (rus). EDN: VKXNRF.
12. Reva O.V., Bogdanova V.V., Vrublevskii A.V., Nazarovich A.N. Relationships of formation and characteristics of colloidal particles in tin-containing organosols intended for activation of the surface of fibrous polyester materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2017. Vol. 90, No. 6. Pp. 931–939. DOI: 10.1134/S1070427217060143. EDN: XNVMPG.
13. Reva O.V., Bogdanova V.V., Shukelo Z.V., Nazarovich A.N., Kobets O.I. Sintez i issledovanie ognезashchitnykh svoystv novykh metallofosfatnykh zamedliteley goreniya dlya tekstil'nykh materialov, ispol'zuemykh v zashchitnoy odezhde [Synthesis and investigation of the flame-retardant properties of new metallophosphate burning retardants for textile materials used in protective clothing]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 4. Pp. 402–417. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-4.402. EDN: PMCJNB.
14. Vorob'eva T.N. *Zadaniye i metodicheskie ukazaniya k laboratornomu praktikumu po spetskursu «Metody issledovaniya tverdykh tel»*. Razdel «Elektronografiya i elektronnaya mikroskopiya» [Assignment and guidelines for the laboratory workshop on the special course «Methods for the study of solids». Section «Electronography and electron microscopy»]: educational edition. Minsk: Belarusian State University, 2007. 37 p. (rus)