

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-111-123>

УДК 546.185+677.494.674+699.81



Оригинальная статья

О. В. Рева^{1*}, В. В. Богданова², З. В. Шукело², О. И. Кобец²

¹Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь

²Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт
физико-химических проблем», ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ ПОЛИЭФИРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ ОБРАБОТКОЙ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ СОСТАВАМИ

Аннотация. Разработаны рецептуры неорганических фосфор-галогенсодержащих огнезамедлительных составов и технология поверхностной обработки ими полиэфирных тканевых материалов различной плотности, обеспечивающие долгосрочный водостойкий огнезащитный эффект. Для реализации химического взаимодействия поверхности полиэфирного материала и огнезамедлительной системы осуществлена предварительная активация подложки и введен ряд модификаторов в огнезащитную композицию. Исследованиями методом электронной электроскопии доказано, что хемосорбция компонентов огнезащитной композиции на активированной полиэфирной подложке происходит при наличии в ее объеме устойчивых коллоидных частиц с размером 4–8 нм, формирующихся в присутствии соединений двухвалентного олова. Сопоставительными термическими и аналитическими исследованиями огнезащищенных полиэфирных материалов после стирок установлено хемосорбционное взаимодействие компонентов замедлителей горения с полиэтилентерефталатом (ПЭТФ). Определены концентрационные пределы содержания ингибирующих элементов и медиативного агента на ПЭТФ ткани после стирки, в которых достигается долгосрочная огнезащита за счет изменения условий тепломассопереноса между пиролизующимся в конденсированной фазе материалом и пламенной зоной. Полученный результат можно использовать при производстве водостойких огнезащищенных материалов для защитной одежды пожарных, металлургов, сварщиков, а также текстильных изделий в местах массового пребывания людей.

Ключевые слова: фосфор-галогенсодержащие огнезамедлительные системы, модифицирующие добавки, полиэфирный тканый материал, огнезащитная обработка, хемосорбционное взаимодействие

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» на 2021–2025 годы, задание № 2.1.07.01.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Рева Ольга Владимировна – кандидат химических наук, доцент, профессор кафедры химической, биологической, радиационной и ядерной защиты Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0003-4006-8678>. E-mail: volha107@rambler.ru; Богданова Валентина Владимировна – доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». <https://orcid.org/0000-0002-8557-9925>. E-mail: bogdanova@bsu.by; Шукело Зоя Витальевна – ведущий химик лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». E-mail: pani.marta.08@gmail.com; Кобец Ольга Игоревна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», <https://orcid.org/0000-0002-6702-7430>. E-mail: kobetsoi@mail.ru

Вклад авторов: Рева Ольга Владимировна – формулирование идеи, исследовательских целей и задач, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи; Богданова Валентина Владимировна – планирование исследований; формулирование исследовательских целей и задач, интерпретация результатов исследования, написание текста рукописи; Шукело Зоя Витальевна – сбор и систематизация данных, пробоподготовка образцов, обобщение результатов исследования, работа с графическим материалом; Кобец Ольга Игоревна – сбор данных литературы, анализ и обобщение данных литературы, редактирование текста рукописи, оформление рукописи.

Для цитирования: Обеспечение водостойкости поверхностной огнезащиты полиэфирных текстильных материалов различной плотности обработкой неорганическими составами / О. В. Рева, В. В. Богданова, З. В. Шукело, О. И. Кобец // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 111–123. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-111-123>

Поступила в редакцию: 10.02.2025

Доработанный вариант: 10.03.2025

Утверждена к публикации: 12.06.2025

Подписана в печать: 19.06.2025

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

*Original article*Olga V. Reva^{1*}, Valentina V. Bogdanova², Zoya V. Shukelo², Olga I. Kobets²¹University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus,
25, Mashinostroiteley St., 220118, Minsk, Republic of Belarus²Institution of the Belarusian State University "Research Institute of Physical and Chemical Problems",
14, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Republic of Belarus**PROVIDING WATER RESISTANCE OF SURFACE FIRE PROTECTION OF POLYESTER TEXTILE MATERIALS OF VARIOUS DENSITY BY TREATMENT WITH INORGANIC COMPOSITIONS**

Abstract. Formulations of inorganic phosphorus-halogen-containing fire-retardant compositions and technology of surface treatment of polyester fabric materials of various densities with them, providing a long-term water-resistant fire-protective effect, have been developed. For implementation the chemical interaction between the surface of the polyester material and the fire-retardant system, preliminary activation of the substrate was carried out and a number of modifiers were introduced into the fire-retardant composition. Electron microscopic studies have shown that chemisorption of components of the fire-retardant composition on an activated polyester substrate occurs in the presence of stable colloidal particles with a size of 4–8 nm, formed in the presence of divalent tin compounds. Comparative thermal and analytical studies of fire-protected polyester materials after washing have established the chemisorption interaction of the flame retardants components with polyethylene terephthalate. The concentration limits of the content of inhibitory elements and mediating agent on PET fabric after washing are determined, in which long-term fire protection is achieved by changing the conditions of heat and mass transfer between the material pyrolyzing in the condensed phase and the flame zone. Practical application of research results relates to the introduction of water-resistant fire-resistant materials for protective clothing of firefighters, metallurgists, welders and products made from them in public places through the use of new non-toxic, economical fire-retardant compositions.

Keywords: phosphorus-halogen-containing fire-retardant systems, modifying additives, polyester woven material, fire-retardant treatment, chemisorption interaction

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Scientific Research Program "Chemical processes, reagents and technologies, bioregulators and bioorganic chemistry" for 2021–2025, task no. 2.1.07.01.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Olga V. Reva* – Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Professor the Department of Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Protection at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4006-8678>, SPIN-code: 9028-4876. E-mail: volha107@rambler.ru; *Valentina V. Bogdanova* – Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems the Belarusian State University. <https://orcid.org/0000-0002-8557-9925>, SPIN-code: 5367-7201. E-mail: bogdanova@bsu.by; *Zoya V. Shukelo* – Leading Chemist of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University; *Olga I. Kobets* – Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University. <https://orcid.org/0000-0002-6702-7430>, SPIN-code: 7365-1743. E-mail: kobetsoi@mail.ru

Contribution of the authors: *Olga V. Reva* – formulation of the idea, research goals and objectives, formulation of conclusions, critical revision of the manuscript text; *Valentina V. Bogdanova* – research planning; formulation of research goals and objectives, interpretation of research results, writing the text of the manuscript; *Zoya V. Shukelo* – collection and systematization of data, sample preparation, generalization of research results, work with graphic material; *Olga I. Kobets* – collection of literature data, analysis and synthesis of literature data, editing the text of the manuscript, design of the manuscript.

For citation: Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V., Kobets O. I. Providing water resistance of surface fire protection of polyester textile materials of various density by treatment with inorganic compositions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 111–123 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-111-123>

Received: 10.02.2025

Modified: 10.03.2025

Approved for publication: 12.06.2025

Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Полиэфирные текстильные материалы различной плотности и структуры повсеместно применяются как в повседневной жизни (мебель, шторы, постельные принадлежности), так и в профессиональной деятельности (специальная одежда сварщиков, электриков, пожарных) и промышленности (нетканые утеплители стен, изоляция воздуховодов и др.). Одним из основных требований, предъявляемых к этим изделиям, является их долгосрочная пониженная горючесть [1–7]. Огнезащищенные волокна можно получить введением замедлителей горения в реакционную смесь на стадии синтеза полимера или на стадии формирования волокна [8, 9]. Однако

эти способы требуют применения нерастворимых соединений, химически не меняющихся в условиях высокотемпературного формования из расплава полимера. Кроме того, часто при использовании наполнителей наблюдается резкое снижение физико-механических характеристик волокон и нитей [10–12].

Для придания полимерным волокнам специфических свойств (гидрофобности, огнестойкости, дезодорируемости) проводится их поверхностная модификация с применением лазерного или рентгеновского излучения, плазменно-растворной модификации, озонлиза [13–15], ориентационного вытягивания [13]. Такая подготовка материала предполагает образование пор, дефектов или реакционноспособных центров, в результате чего возникает вероятность закрепления целевых модификаторов на поверхности полимера. Вместе с тем применение указанных способов подготовки таких полимеров, как полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и полиамид с монолитной структурой, не содержащей пор, совместимых по размеру с молекулами и ионами замедлителей горения, а также с отсутствием реакционно-активных групп, не позволяет достичь длительного огнезащитного эффекта [16–18].

Имеются сведения о достижении при использовании органических азот-фосфорсодержащих соединений устойчивой к стиркам огнезащиты синтетических текстильных материалов [19–22]. При этом условия синтеза и технология применения данных соединений не разглашаются, что проблематично для воспроизведения данных этих исследований.

В ряде работ огнезащитный эффект достигается применением замедлителей горения в смеси с пленкообразующими агентами либо использованием интумесцентных (вспенивающих) составов [23–25]. Следует подчеркнуть, что текстильные материалы с пленочными или специальными покрытиями не подвергаются стандартным испытаниям на устойчивость огнезащитного эффекта к водным обработкам, что вызывает сомнения в их долговечности, поскольку текстильные материалы бытового назначения нуждаются в систематических гигиенических обработках.

Еще одним подходом к приданию огнезащитных свойств полимерным текстильным материалам является использование золь-гель метода [26–28], при котором защита поверхности волокна или ткани осуществляется в результате образования поверхностного барьера (органического, неорганического или гибридного), способного препятствовать диффузии кислорода к материалу, замедлять его пиролиз и горение. Однако в результате исследования устойчивости к стиркам огнезащиты образцов, полученных по данной технологии, установлено, что после водных обработок огнезащитный эффект отсутствует [29, 30]. Вследствие этого применение золь-гель метода ограничивается обработкой текстильных материалов технического назначения, не подвергающихся стиркам.

Таким образом, проблема придания синтетическим текстильным материалам устойчивого к стиркам огнезащитного эффекта методами поверхностной обработки распространенными малотоксичными неорганическими замедлителями горения до настоящего времени не решена. Устойчивость огнезащитного эффекта к стиркам может быть обеспечена химическим взаимодействием между полимерной матрицей и соединениями, входящими в состав огнезащитного средства [31–33], что требует адресного подхода к выбору химического и гранулометрического состава замедлителя горения и технологии его нанесения для каждого вида не только полимера, но и текстильного материала одной химической природы.

Ранее нами показана принципиальная возможность достижения устойчивого к водным обработкам огнезащитного эффекта путем поверхностного нанесения неорганических замедлителей горения на волокнистые (нетканые) полиэфирные материалы, тогда как при аналогичной обработке плотных тканевых полиэфирных материалов огнезащитный эффект после их стирок отсутствовал [34–39].

Цель данной работы состояла в разработке рецептур неорганических огнезамедлительных систем и технологии поверхностной обработки ими полиэфирных тканевых материалов различной плотности, обеспечивающих химическое взаимодействие компонентов антипирена с ПЭТФ и, как следствие, водостойкость огнезащитной обработки.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись текстильные полиэфирные материалы различного назначения: подкладочная, гардинная, фильтрующая и портьерная ткани с соответствующими значениями плотности – 65; 114; 145 и 204 г/м². Огнезащитную обра-

ботку проводили синтезированным нами неорганическим огнезащитным составом ($OC_{\text{баз}}$), содержащим фосфор, хлор, азот в массовом соотношении $P : Cl : N = 1 : 2,2 : 2$. На различных этапах исследования данный состав в виде водного раствора модифицировали введением реакционно-способных медиативных агентов как индивидуально, так и в различных сочетаниях. В качестве модифицирующих агентов использовали хлорид двухвалентного олова ($SnCl_2$), проявляющий способность к образованию на полимерной подложке хемосорбированного медиативного слоя из наноразмерных коллоидных частиц [38, 39], а также полиэтиленгликоль (ПЭГ) и гипофосфит натрия (ГПФ, NaH_2PO_2) – в качестве редокс-системы, способствующей изменению свойств поверхности текстильного материала и проницаемости волокон [40, 41]. Модификаторы добавляли к базовому составу в следующих количествах: 1,5 % $SnCl_2$; 3 % ГПФ; 10 % ПЭГ, при соответствующем снижении количества базового состава из расчета общего содержания всех компонентов в рабочих растворах огнезащитных составов 100 %.

На предыдущем этапе исследований нами установлено, что устойчивость огнезащитного эффекта к стиркам возрастает при предварительном травлении полиэфирных образцов в щелочном комплексном растворе при 70 °C в течение 30 мин [42, 43]. После проточной отмычки от травильного раствора образцы помещали в раствор огнезащитного состава на 20 мин, затем отжимали методом плюсовки при комнатной температуре или при нагревании до 60–70 °C в течение от 30 до 60 мин в зависимости от плотности ткани. Сушку образцов осуществляли при температуре 140 °C в течение 15 мин, термофиксацию – при температуре 220 °C в течение 2 мин. Огнезащитную обработку полиэфирных материалов различной плотности проводили одинаковыми объемами исследуемых вариантов составов, при этом мокрый и сухой привес на огнезащищенном полиэфирном материале (ОЗМ) составлял 99–100 % и 30,2–34,4 % соответственно. Стирку образцов выполняли по ГОСТ 30157.1–95¹ при 40 °C в течение 15 мин.

Устойчивость к горению огнезащищенных образцов определялась по ГОСТ Р 50810–95². Согласно данному нормативному документу классификации «трудновоспламеняемый» соответствует материал, не поддерживающий самостоятельного горения (не более 5 с) при средней длине обугливания не более 150 мм. При несоблюдении этих условий материал является легковоспламеняемым.

Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исходных и огнезащищенных тканей после стирки проводили на приборе Netzsch STA 449C (Германия) в воздушной атмосфере при скорости подъема температуры 10 °C/мин в интервале температур 30–600 °C. Суммарное теплоглощение ($\Sigma Q_{\text{экзо}}$, Дж/г) рассчитывали с использованием программного приложения по площади комплексных пиков экзо- и эндоэффектов. Содержание фосфора и хлора (основных компонентов синергической композиции) на полиэфирных тканях после стирок определяли на спектрометре фирмы PANalytical с автоматической обработкой данных по программе Epsilon 3.

Размеры коллоидных частиц в объеме исследуемых синтетических замедлителей горения определяли с использованием просвечивающего электронного микроскопа LEO-906 E (производство ZEISS). Частицы препарировали нанесением на медную сеточку с пленкой коллодия капли исследуемого раствора, после высыхания капли сеточку промывали дистиллированной водой для удаления растворимых солей. Минимально различимые в электронном микроскопе частицы имели размер ~ 1 нм. Фазовый состав соединений в замедлителе горения исследовали на дифрактометре ДРОН-2 (CuK_{α} -излучение). Кристаллические фазы идентифицировали с помощью программного обеспечения JCDD [42]. Спектроскопическое исследование исходных и огнезащищенных образцов после стирки проводили на инфракрасном спектрометре с Фурье-преобразованием Alpha (производство Bruker). Калибровка прибора выполнена с использованием стандартного образца – пленки полистирола N 0101, по ГОСТ 12998–85³. Для достоверности получас-

¹ ГОСТ 30157.1–95. Полотна текстильные. Методы определения изменения размеров после мокрых обработок или химической чистки. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294813/4294813973.pdf>

² ГОСТ Р 50810–95. Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация. М.: Госстандарт России, 1995. 9 с.

³ ГОСТ 12998–85. Пленка полистирольная. Технические условия: межгосударственный стандарт. М: ИПК Издательство стандартов, 1999. 11 с.

мых экспериментальных данных измеряемые характеристики определялись из среднеарифметических значений трех-шести измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207-76¹.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты испытаний огнезащитных материалов (ОЗМ) различной плотности (табл. 1) показали, что огнезащитный эффект после стирок для образцов с низкой плотностью (65 и 114 г/м²) сохраняется при всех рецептурных вариантах исследуемых огнезащитных составов (ОС). Номера ОС и обработанных ими ОЗМ совпадают.

Таблица 1. Содержание основных компонентов замедлителей горения и характеристики горючести полиэфирных материалов различной плотности после стирки

Table 1. Content of the main components of flame retardants and flammability characteristics of polyester materials of different densities after washing

Экспериментальная серия Experimental series	Номер огнезащитного состава и обработанного им экспериментального образца The number of fire protection composition and treated with it experimental sample of fire-proof polyester materials	Компоненты огнезащитного состава Flame retardant components	Содержание компонентов, мас. % Component content, wt. %	Горючесть* полиэфирных тканей различной плотности, г/м ² Flammability* of polyester fabrics of various densities, g/m ²			
				65	114	145	204
I	1	ОС _{баз} : H ₂ O	25 : 75	–	–	+	+
	2	ОС _{баз} : ГПФ : H ₂ O	22 : 3 : 75	–	–	+	+
	3	ОС _{баз} : ПЭГ : H ₂ O	25 : 10 : 65	–	–	+	+
	4	ОС _{баз} : ГПФ : ПЭГ : H ₂ O	22 : 3 : 10 : 65	–	–	+	+
II	5	ОС _{баз} : SnCl ₂ : H ₂ O	23,5 : 1,5 : 75	–	–	+	+
	6	ОС _{баз} : SnCl ₂ : ГПФ : H ₂ O	20,5 : 1,5 : 3 : 75	–	–	+	+
	7	ОС _{баз} : SnCl ₂ : ПЭГ : H ₂ O	23,5 : 1,5 : 10 : 65	–	–	+	+
	8	ОС _{баз} : SnCl ₂ : ГПФ : ПЭГ : H ₂ O	20,5 : 1,5 : 3 : 10 : 65	–	–	–	–

Примечание: ОС_{баз} – неорганический огнезащитный состав, ГПФ – гипофосфит натрия, ПЭГ – полиэтиленгликоль; * – категория воспламеняемости: + легковоспламеняемый, – трудновоспламеняемый.

Note: ОС_{баз} – inorganic flame retardant, ГПФ – sodium hypophosphite, ПЭГ – polyethylene glycol; * – flammability category according: + flammable, – flame-retardant

Однако устойчивого огнезащитного эффекта для тканей плотностью 145 и 204 г/м² с использованием огнезащитных составов ОС1–ОС4 достичь не удалось. Для усиления реакционной способности базового и модифицированных составов (ОС1–ОС4, серия I) проведена их дополнительная модификация введением в реакционную смесь коллоидного раствора хлорида олова (ОС5–ОС8, серия II).

Как видно из полученных данных, сохранение огнезащитного эффекта после стирок на плотных тканях (145 и 204 г/м²) удалось получить только с использованием ОС8, содержащего полный набор модифицирующих агентов. Рентгенофазовым исследованием синтетического ОС_{баз} и ОС1–ОС8 на его основе, модифицированных введением дополнительных компонентов, установлено, что все изученные ОС состоят из аморфных и кристаллических неидентифицируемых соединений, что также характерно для продуктов их термообработки.

С целью нахождения факторов, оказывающих определяющее влияние на получение устойчивого огнезащитного эффекта, проведены термические исследования как самих замедлителей горения (ОС1–ОС8), так и огнезащитной ими полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² (ОЗМ1–ОЗМ8). Для получения сопоставимых данных при проведении комплексного термического анализа использовали близкие навески для всех образцов. Одновременно в тканевых стираных образцах определяли содержание фосфора, хлора и олова, входящих в состав исследуемых ОС.

¹ ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2008. 9 с.

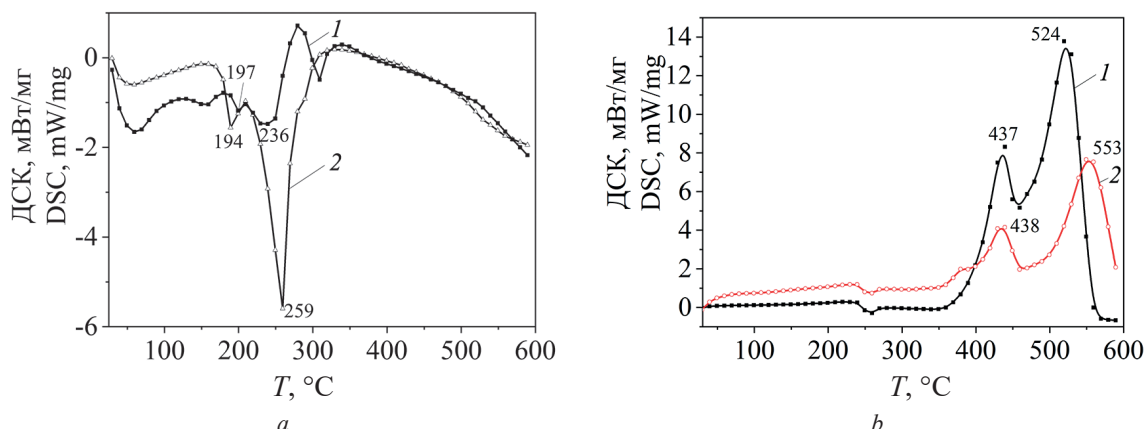


Рис. 1. Данные дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК): *a* – для огнезащитных составов (кривая 1 – OC8; кривая 2 – OC5); *b* – для полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² (кривая 1 – исходный образец; кривая 2 – O3M8 после стирки)

Fig. 1. Differential scanning calorimetry (DSC) data for: *a* – fire-retardant compounds (curve 1 – OC8; curve 2 – OC5); *b* – polyester fabric with a density of 204 g/m² (curve 1 – original sample; curve 2 – O3M8 after washing).

Here and further: OC – fireprotecting composition, O3M – fireprotected material

Термические превращения огнезащитных составов серий I и II характеризуются наличием двух эндозэффектов при температурах ~ 200 °C и ~ 260 °C. В присутствии модифицирующих добавок в этих ОС при сохранении температурных интервалов эндозэффектов наблюдается снижение суммарного теплопоглощения, а в присутствии гипофосфита натрия (OC2; OC4; OC6; OC8) существенно снижается потеря массы (рис. 1, *a*, табл. 2).

Таблица 2. Результаты комплексного термического анализа огнезащитных составов
Table 2. Results of complex thermal analysis of fire-retardant compositions

Экспериментальная серия Experimental series	Огнезащитный состав Flame retardant	$T_{\text{начала потери массы}}^{\circ\text{C}}$ Mass loss onset temperature, °C	$T_{1 \text{ эндозэффекта}}^{\circ\text{C}}$ Temperature of the first heat absorption effect, °C	$T_{2 \text{ эндозэффекта}}^{\circ\text{C}}$ Temperature of the second heat absorption effect, °C	$\Sigma Q_{\text{эндо}}^{\circ\text{C}}$ Total heat absorption, J/g	Остаток массы, % Remaining mass, %
I	OC1	219	192	258	1673	32,70
	OC2	219	194	248	1128	45,14
	OC3	199	196	236	1285	32,31
	OC4	203	193	239	728	40,41
II	OC5	223	193	259	1516	25,81
	OC6	180	194	256	1437	44,96
	OC7	205	195	253	1043	21,18
	OC8	228	197	236	1180	34,26

Иная картина характерна для комплексного термического анализа постиранных огнезащитных образцов ткани I и II серий (обработанных соответствующими ОС), где для всех O3M зарегистрирован сдвиг второго экзозэффекта пиролиза полиэфирной матрицы в высокотемпературную область при одновременном снижении суммарного количества выделяющегося тепла (см. рис. 1, *b*). Кроме того, наблюдается очевидная разница в количественном значении термических параметров образцов I и II серий. Так, для O3M8, в отличие от O3M4, не содержащего олова при одинаковом содержании других компонентов, регистрируется в 1,4 раза меньшее тепловыделение и более существенный сдвиг второго экзозэффекта в высокотемпературную область на 33 °C и 23 °C по сравнению с исходной тканью (табл. 3). Эти данные согласуются с результатами химического анализа постиранных образцов I и II серий (табл. 4): содержание ингибирующих элементов (P, Cl) на тканевых образцах второй серии в 1,7–1,8 раза выше на всех этапах модифицирования по сравнению с образцами серии I, не содержащими хлорид олова.

Таблица 3. Термические характеристики огнезащитной полиэфирной ткани плотностью 204 г/м²
 Table 3. Thermal characteristics of flame-retardant polyester fabric with a density of 204 g/m²

Экспериментальная серия Experimental series	Номер экспериментального образца огнезащитных полиэфирных материалов The number of the experimental sample fire-resistant polyester materials	$T_{\text{начала потери массы}}$, °C Mass loss onset temperature, °C	$T_{1 \text{ экзoeffекта}}$, °C Temperature of the first heat absorption effect, °C	$T_{2 \text{ экзoeffекта}}$, °C Temperature of the second heat absorption effect, °C	Высота второго экзoeffекта, мВт/мг Height of the second heat absorption effect, mW/mg	$\Sigma Q_{\text{экзо}}$, Дж/г Total heat absorption, J/g
Исходная ткань original fabric		408	437	520	14,2	7687
I	O3M1	405	437	543	12,5	6799
	O3M2	400	430	558	5,3	4309
	O3M3	381	436	551	8,5	4902
	O3M4	389	435	543	7,4	4746
II	O3M5	403	438	542	10,8	6692
	O3M6	404	437	555	7,7	5259
	O3M7	400	437	556	7,2	3856
	O3M8	403	433	553	7,2	3355

Таблица 4. Аналитические характеристики огнезащитной полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² после стирки
 Table 4. Analytical characteristics of flame-retardant polyester fabric with a density of 204 g/m²

Эксперимен- тальная серия Experimental series	Номер экспериментального образца огнезащищенных полиэфирных материалов The number of the experimental sample fire-resistant polyester materials	Содержание ингибирующих элементов, % The content of inhibitory elements, %		
		P	Cl	Sn
Исходная ткань original fabric		—	—	—
I	O3M1	0,158	0,077	—
	O3M2	0,161	0,085	—
	O3M3	0,164	0,103	—
	O3M4	0,249	0,116	—
II	O3M5	0,169	0,138	0,029
	O3M6	0,294	0,147	0,029
	O3M7	0,296	0,166	0,030
	O3M8	0,448	0,198	0,084

Таким образом, из результатов комплексного термического анализа исходной и огнезащитной полиэфирной ткани после стирки следует, что каждый из компонентов ОС по отдельности и в сочетании друг с другом оказывает существенное влияние на ее термические характеристики: сдвиг максимума второго экзoeffекта, соответствующего полному разложению полимерной матрицы, в высокотемпературную область и снижение суммарного количества тепла при термоллизе полиэфирного материала. Вместе с тем, несмотря на одинаковые тенденции в термическом поведении огнезащитных различными вариантами ОС полиэфирных материалов, требуемой категории по горючести «трудновоспламеняемый» после стирки соответствует только материал O3M8, термические параметры которого в наибольшей степени отличаются от аналогичных характеристик исходного материала (см. рис. 1, б, табл. 3). Достижение такого результата обусловлено более высоким количественным содержанием ингибирующих элементов (P – 0,448 %, Cl – 0,198 %) в O3M8 по сравнению с другими вариантами модификации ОС, что позволило изменить условия тепло- и массопереноса между пиролизирующимся в конденсированной фазе полимерным материалом и пламенной зоной. Соединения фосфора образуют термоизолирующие расплавы и карбонизованные структуры на горячей поверхности, а галогенсодержащие летучие продукты ингибируют радикальные реакции в газовой фазе.

Проведением термических и аналитических исследований ОЗМ с плотностью 65 и 114 г/м² и, следовательно, более низкой пожарной нагрузкой установлено, что для этих материалов перманентный огнезащитный эффект достигается при содержании фосфора 0,047 и 0,076 %; хлора – 0,108 и 0,127 % соответственно. Полученные данные свидетельствуют, что перманентный эффект огнезащиты для материалов различной плотности может быть получен при достижении определенного количества компонентов замедлителя горения, зависящего от плотности содержания ингибирующих элементов, хемосорбированных на инертной полимерной поверхности. Этот факт необходимо учитывать как при разработке рецептур замедлителей горения, так и технологии их применения.

Для выяснения причин более высокой реакционной способности оловосодержащих замедлителей горения проведены электронно-микроскопические исследования коллоидной фазы в объеме огнезащитных составов ОС4 и ОС8 с одинаковым набором модифицирующих агентов, кроме отсутствия в рецептуре ОС4 хлорида олова. Как видно из рис. 2, размер первичных коллоидных частиц в объеме обоих составов одинаков и составляет 4–8 нм. Однако в композиции ОС8 эти частицы не агломерируют в течение длительного времени и равномерно распределены по всему объему, тогда как в композиции ОС4 первичные частицы собираются в более крупные и неравномерно распределенные агломераты, что, очевидно, связано с комплексным составом и прочностью сольватной оболочки частиц.

В соответствии с полученными данными можно предположить, что устойчивость к стиркам полиэфирных материалов, обработанных ОС8, обусловлена взаимодействием реакционноспособных коллоидных частиц в объеме ОС8 с поверхностными активными группами полиэфирной матрицы, приводящим к прочной хемосорбции антипиренирующих соединений.

Для проверки этого предположения проведено ИК-спектроскопическое исследование материалов, обработанных ОС8, после стирок. На рис. 3 показаны ИК-спектры исходной и огнезащитной полиэфирной ткани после стирки, которые имеют существенные отличия, заключающиеся в появлении новых полос. Так, в области валентных колебаний C=O для огнезащитного образца наблюдается уширение характеристичной полосы эфирной связи в области 1726,1 см⁻¹ [45, 46].

Кроме того, появление характеристических полос –CH₂–O–CH₂– в области 1066–1471 см⁻¹ свидетельствует о разрушении эфирных связей полимера. Этот факт подтверждает участие карбонильной группы на поверхности ПЭТФ в химическом взаимодействии с компонентами огнезамедлительной системы. Также обращают на себя внимание изменения ИК-спектра в области от 2000 до 3000 см⁻¹, что может служить доказательством активации поверхности ПЭТФ, в том числе и за счет появления ОН-групп, колебания которых зарегистрированы в диапазоне 3000–3500 см⁻¹.

Данные ИК-спектроскопического исследования согласуются с результатами количественного содержания ингибирующих элементов на полиэфирной матрице после стирки, где наиболее

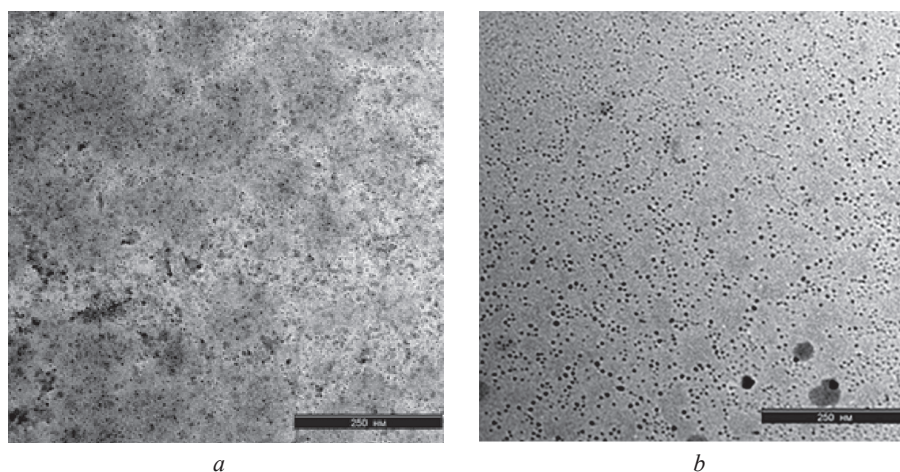


Рис. 2. ПЭМ-фотографии частиц в объеме составов ОС4 (а) и ОС8 (b)

Fig. 2. TEM photographs of particles in the bulk of compositions OC4 (a) and OC8 (b)

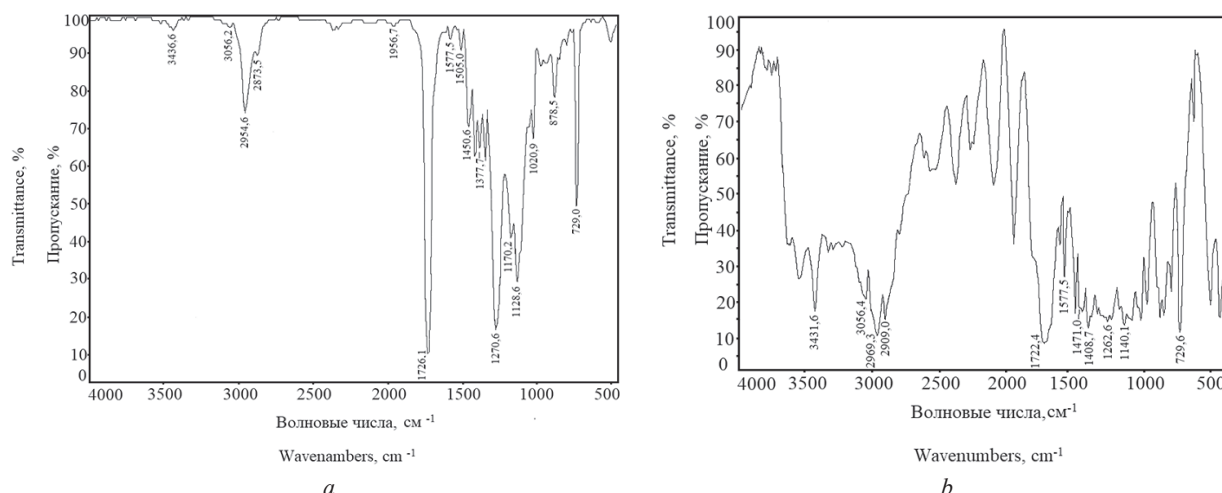
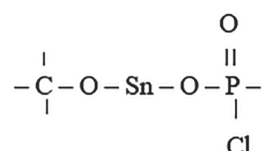


Рис. 3. ИК-спектр исходного (а) и обработанного ОС8 полиэфирного материала после стирки (b)
 Fig. 3. IR spectrum of the original (a) and treated with OC8 polyester material after washing (b)

высокое их присутствие обнаружено на ткани, обработанной ОС8 с полным набором модифицирующих агентов. Это позволяет предположить образование между активными группами полимерной матрицы и компонентами огнезащитной композиции химических связей типа:



Следует отметить, что ранее методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии нами обнаружен факт химического взаимодействия компонентов огнезамедлительной смеси при наличии или направленном формировании активных центров на поверхности инертного полимера [36, 38, 47].

Закключение. Методом поверхностной огнезащитной обработки полиэфирных текстильных материалов различной плотности синтетической композицией неорганических замедлителей горения получен устойчивый к стиркам эффект огнезащиты, достигаемый за счет хемосорбционного взаимодействия компонентов антипиреновой композиции с полимерной матрицей. Установлен фактор, влияющий на возможность хемосорбции компонентов огнезамедлительной системы на поверхности полиэфирной ткани: присутствие в пропиточном составе медиативного агента – хлорида олова (II).

Определены концентрационные пределы содержания ингибирующих элементов и медиативного агента на ПЭТФ ткани после стирки, в которых достигается долгосрочная огнезащита за счет изменения условий тепломассопереноса между пиролизующимся в конденсированной фазе материалом и пламенной зоной.

Результаты данных исследований позволят оптимизировать технологии поверхностной огнезащитной обработки применением новых нетоксичных экономических замедлителей горения с получением водостойких огнезащищенных материалов из полиэфирных волокон для защитной одежды пожарных, металлургов, сварщиков и текстильных изделий в местах массового пребывания людей.

Список использованных источников

1. Зубкова, Н. С. Снижение горючести текстильных материалов – решение экологических и социально-экономических проблем / Н. С. Зубкова, Ю. С. Антонов // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 96–102.
2. Оценка пожарной опасности материалов палаток детских временных лагерей отдыха / Н. И. Константинова, А. В. Зубань, Е. А. Поединцев, Н. В. Голов // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 2. – С. 5–15. <https://doi.org/10.22227/PVB.2021.30.01.5-15>

3. Сабирзянова, Р. Н. Современные тенденции в производстве огнестойких текстильных материалов / Р. Н. Сабирзянова, И. В. Красина // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 9, № 5. – С. 75–79.
4. Horrocks, A. R. Flame retardant textile finishes / A. R. Horrocks // Textile Finishing: Recent Developments and Future Trends / eds: K. L. Mittal, T. Bahners. – Wiley, 2017. – Ch. 2. – P. 69–127. <https://doi.org/10.1002/9781119426790.ch2>
5. Шебеко, А. Ю. Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта / А. Ю. Шебеко, Н. И. Константинова, С. Г. Цариченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 1. – С. 32–42. <https://doi.org/10.18322/PVB.2020.29.01.32-42>
6. Перепелкин, К. Е. Горючесть текстиля как одна из его важнейших характеристик / К. Е. Перепелкин // Химические волокна. – 2001. – № 5. – С. 8–42.
7. Кричевский, Г. Е. Роль химии в производстве текстиля. Эволюция и революция в текстильной химии / Г. Е. Кричевский // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 5–8.
8. Перепелкин, К. Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности / К. Е. Перепелкин // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 31–47.
9. Морыганов, А. П. Разработка новых способов получения и модификации перспективных текстильных материалов на основе отечественного сырья / А. П. Морыганов // Текстильная химия. – 1998. – № 1. – С. 82–95.
10. Wail, E. D. Flame retardants in commercial use or development for textiles / E. D. Wail, S. V. Levchik // Journal of Fire Sciences. – 2008. – Vol. 26, Iss. 3. – P. 243–281. <https://doi.org/10.1177/0734904108089485>
11. Horrocks, A. R. Flame retardant challenges for textile and fibers: New chemistry versus innovatory solutions / A. R. Horrocks // Polymer Degradation and Stability. – 2011. – Vol. 96, Iss. 3. – P. 377–392. <http://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.036>
12. Химические волокна, основы получения, методы исследования и модифицирования: учеб. пособие для хим.-технол. фак. высш. учеб. заведений / под ред. Т. В. Дружининой. – М.: Моск. госуд. текстил. ун-т им. А. Н. Косыгина, 2006. – 472 с.
13. Модифицирование полиолефинов – современное направление создания полиолефиновых материалов с новым комплексом свойств / И. Н. Мешкова, Т. М. Ушакова, Н. М. Гульцева [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50, № 11. – С. 1985–1989.
14. Высокочастотная плазменная обработка в динамическом вакууме капиллярно-пористых материалов: теория и практика применения / И. Ш. Абдуллин, Л. Н. Абуталипова, В. С. Желтухин, И. В. Красина. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – 428 с.
15. Модификация синтетических волокон и нитей: обзор / И. П. Ершов, Е. А. Сергеева, Л. А. Зенитова, И. Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 18. – С. 136–143.
16. Волинский, А. П. Крейзинг полимеров в жидких средах – универсальный непрерывный способ введения в полимерное волокно модифицирующих добавок / А. П. Волинский, Л. М. Ярышева, Н. Ф. Бакеев // Химические волокна. – 2006. – № 2. – С. 46–50.
17. Пророкова, Н. П. Химический способ поверхностной активации волокнистых материалов на основе полиэтилентерефталата. Ч. 1: Исследование модифицирующего действия растворов гидроксида натрия и препаратов на основе четвертичных аммониевых солей / Н. П. Пророкова, А. В. Хорев, С. Ю. Вавилова // Химические волокна. – 2009. – № 3. – С. 11–16.
18. Плазменно-растворная модификация полиэтилентерефталатного волокнистого материала / С. М. Кузьмин, Н. П. Пророкова, А. В. Хорев, С. Ю. Вавилова // Химические волокна. – 2010. – № 1. – С. 26–30.
19. Carosio, F. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology thermal stability and combustion of PET fabrics / F. Carosio, G. Alongi, A. Frache // European Polymer Journal. – 2011. – Vol. 47, Iss. 5. – P. 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009>
20. Salmeia, K. A. Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry / K. A. Salmeia, S. Gaan, G. Malucelli // Polymers. – 2016. – Vol. 8, Iss. 9. – P. 319–355. <https://doi.org/10.3390/polym8090319>
21. Константинова, Н. И. О требованиях к проведению огнезащиты текстильных материалов / Н. И. Константинова, А. В. Зубань // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 57–62. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-1-57-62>
22. Durable flame-retardant finishing for silk fabric using boron hybrid silica sol / Q. H. Zhang, J. Gu, G. Q. Chen, T. L. Xing // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 387. – P. 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.119>
23. Проблемные вопросы придания текстильным материалам специальных защитных свойств / С. А. Сырбу, О. Г. Циркина, А. Х. Салихова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 2 (47). – С. 133–139.
24. Спиридонова, В. Г. Обоснование актуальных подходов к оценке пожароопасных свойств текстильных материалов и способов огнезащиты тканей различного функционального назначения / В. Г. Спиридонова, Д. В. Сорокин, А. Л. Никифоров // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 2 (47). – С. 125–132.
25. Flame retardant based on amino silanes and phenylphosphonic acid / R. S. Kappes, T. Urbainczyk, U. Artz [et al.] // Polymer Degradation and Stability. – 2016. – Vol. 129. – P. 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.012>
26. Comparative analysis Nanoparticle Adsorption as Fire-Protection approach for Fabrics / Y. Alagni, Y. Tata, F. Carosio [et al.] // Polymers. – 2015. – Vol. 7, Iss. 1. – P. 47–68. <https://doi.org/10.3390/polym7010047>
27. Wan Norfazilah Wan Ismail. Sol-gel technology for innovative fabric finishing – A Review / Wan Norfazilah Wan Ismail // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2016. – Vol. 78. – P. 698–707. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4027-y>
28. Malucelli, G. Surface-Engineered Fire Protective Coatings for Fabrics through Sol-Gel and Layer-by-Layer Methods: An Overview // Coatings. – 2016. – Vol. 6, № 3. – P. 33–56. <https://doi.org/10.3390/coatings6030033>

29. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics subjected to sol-gel treatments / G. Alongi, M. Cuofanu, J. Tata [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2011. – Vol. 119, Iss. 4. – P. 1961–1969. <https://doi.org/10.1002/app.32954>
30. Recent developments in the fire retardancy of polymer materials / A. Dasari, Z. Yu, C. P. Cai, J. W. Ma // *Progress in Polymer Science*. – 2013. – Vol. 38, Iss. 9. – P. 1357–1387. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsi.2013.06.006>
31. The role of pre-hydrolysis on multistep sol-gel processes for enhancing the flame retardancy of cotton / G. Alongi, C. Colloni, G. Rosare, G. Malucelli // *Cellulose*. – 2013. – Vol. 20. – P. 525–535. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9806-1>
32. Разработка огнезащитных составов для текстильных материалов / С. А. Сырбу, В. А. Бурмистров, Д. Б. Самойлов, А. Х. Салихова // *Технология техносферной безопасности*. – 2011. – Вып. 5 (39). – С. 1–7.
33. Коновалова, М. В. Поверхностная модификация и крашение полиэфирных волокон с использованием магнитоактивированных водных растворов / М. В. Коновалова, Ю. М. Рабаева // *Химические волокна*. – 2007. – № 4. – С. 41–44.
34. Влияние состава неорганических замедлителей горения, хемосорбированных на полиэфирном волокнистом материале, на закономерности его термодеструкции / О. В. Рева, В. В. Богданова, А. Н. Назарович, З. В. Шукело // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 4–12.
35. Зависимость эффективности огнезащиты нетканого полиэфирного материала от химической природы азот- и фосфорсодержащего антипирена / О. В. Рева, В. В. Богданова, А. С. Лукьянов [и др.] // *Журнал Белорусского Государственного университета. Серия: Химия*. – 2017. – № 2. – С. 85–93.
36. Химическая прививка неорганических функциональных слоев к инертным полимерам / О. В. Рева, В. В. Богданова, З. В. Шукело, Л. В. Радкевич // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2011. – Т. 16, № 3. – С. 90–94.
37. Назарович, А. Н. Критерий разработки эффективных неорганических замедлителей горения для нетканых тонковолокнистых полиэфирных материалов / А. Н. Назарович, О. В. Рева // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2022. – Т. 6, № 3. – С. 263–275. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-3.263>
38. Рева, О. В. Химическая прививка огнезащитных композиций к полиэфирным матрицам / О. В. Рева, В. В. Богданова, З. В. Шукело // *Свиридовские чтения: сб. ст.* – Минск: БГУ, 2013. – Вып. 9. – С. 158–168.
39. Рева, О. В. Получение перманентной огнезащиты полиэтилентерефталата наноразмерными азотфосфорсодержащими антипиренами / О. В. Рева, В. В. Богданова, А. С. Лукьянов // *Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина (НАНО–2016): материалы V Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 нояб. 2016 г.* – Минск: Беларус. навука, 2016. – С. 205–208.
40. Богданова, В. В. Влияние рецептурного состава металлофосфатных огнезамедлительных систем и модифицирующих добавок на устойчивость огнезащитной отделки полиэфирных тканей к гидролизной обработке / В. В. Богданова, О. И. Кобец, О. В. Рева // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 423–436. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-4.423>
41. Механизм интенсифицирующего действия окислительно-восстановительных систем в процессе крашения шерсти кислотными и активными красителями / О. В. Петрова, Л. Э. Ермакова, А. А. Буринская, С. Ф. Гребенников // *Технология текстильной промышленности*. – 2006. – № 2 (289). – С. 61–65.
42. Новые огнетушащие составы для полиэфирных волокон / О. В. Головешкина, И. Я. Шипинский, Н. А. Кейбал [и др.] // *Информационное пространство современной науки: сб. материалов II Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Чебоксары, 18 сент. 2010 г.* – Чебоксары, 2010. – С. 118–120.
43. Богданова, В. В. Исследование условий предварительной химической активации тканого полиэфирного материала для усиления эффективности его огнезащитной отделки / В. В. Богданова, О. И. Кобец, З. В. Шукело // *Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., 23 сент. 2023 г.* – Минск: УГЗ, 2023. – С. 31–32.
44. Powder Diffraction File. JcpDS. Int. Centre for Diffraction Data. – Swarthmore, 1989. – URL: <https://www.icdd.com>
45. Беллами, Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. – М.: Изд-во иностран. лит., 1963. – 590 с.
46. Electron beam induced surface modifications of PET film / A. A. El-Safty, A. Elfalaky, M. S. Ragheb, S. G. Zakhary // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2014. – Vol. 102. – P. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.04.025>
47. Рева, О. В. Закрепление неорганических антипиренов на поверхности полиэфирных волокон / О. В. Рева, А. Н. Назарович, В. В. Богданова // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 107–116.

References

1. Zubkova N. S., Antonov Yu. S. Reducing the flammability of textile materials – a solution to environmental and socio-economic problems. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the D. I. Mendeleev Russian Chemical Society)], 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 96–102 (in Russian).
2. Konstantinova N. I., Zuban' A. V., Poedinczev E. A., Golov N. V. Assessment of fire hazard of materials of tents of children's temporary recreation camps. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 5–15 (in Russian). <https://doi.org/10.22227/PVB.2021.30.01.5-15>
3. Sabirzyanova R. N., Krasina I. V. Modern trends in the production of fire-resistant textile materials. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2013, vol. 9, no. 5, pp. 75–79 (in Russian).
4. Horrocks A. R. Ch. 2. Flame retardant textile finishes. Mittal K. L., Bahners T. (eds.). *Textile Finishing: Recent Developments and Future Trends*. Wiley, 2017, pp. 69–127. <https://doi.org/10.1002/9781119426790.ch2>

5. Shebeko A. Yu., Konstantinova N. I., Tsarichenko S. G. Fire hazard of textile materials based on polyester fibers for railway cars. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 32–42 (in Russian). <https://doi.org/10.18322/PVB.2020.29.01.32-42>
6. Perepelkin K. E. Flammability of textiles as one of its most important characteristics. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2001, no. 5, pp. 8–42 (in Russian).
7. Krichevskij G. E. The role of chemistry in textile production. Evolution and revolution in textile chemistry. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the D. I. Mendeleev Russian Chemical Society)], 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 5–8 (in Russian).
8. Perepelkin K. E. Modern chemical fibers and prospects of their application in the textile industry. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the D. I. Mendeleev Russian Chemical Society)], 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 31–47 (in Russian).
9. Moryganov A. P. Development of new methods for producing and modifying promising textile materials based on domestic raw materials. *Tekstil'naya khimiya* [Textile Chemistry], 1998, no. 1, pp. 82–95 (in Russian).
10. Wail E. D., Levchik S. V. Flame retardants in commercial use or development for textiles. *Journal of Fire Sciences*, 2008, vol. 26, iss. 3, pp. 243–281. <https://doi.org/10.1177/0734904108089485>
11. Horrocks A. R. Flame retardant challenges for textile and fibres: New chemistry versus innovatory solutions. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, vol. 96, iss. 3, pp. 377–392. <http://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.036>
12. Druzhinina T. V. (ed.). *Chemical Fibers, Basics of Production, Methods of Research and Modification*. Moscow, Moscow State Textile University named after A. N. Kosygin, 2006. 472 p. (in Russian).
13. Meshkova I. N., Ushakova T. M., Gul'tseva N. M., Grinev V. G., Ladygina T. A., Novokshonova L. A. Modification of polyolefins is a modern direction in creating polyolefin materials with a new set of properties. *Polymer Science Series A*, 2008, vol. 50, no. 11, pp. 1161–1174. <https://doi.org/10.1134/s0965545x08110060>
14. Abdullin I. Sh., Abutalimova L. N., Zheltukhin V. S., Krasina I. V. *High-Frequency Plasma Processing of Capillary-Porous Materials in Dynamic Vacuum: Theory and Practice of Application*. Kazan', Kazan University Publishing House, 2004. 428 p. (in Russian).
15. Ershov I. P., Sergeeva E. A., Zenitova L. A., Abdullin I. Sh. Modification of synthetic fibers and threads: Review. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 18, pp. 136–143 (in Russian).
16. Volynskij A. P., Yarysheva L. M., Bakeev N. F. Crazing of polymers in liquid media is a universal continuous method of introducing modifying additives into polymer fiber. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2006, no. 2, pp. 46–50 (in Russian).
17. Prorokova N. P., Khorev A. V., Vavilova S. Yu. Chemical method of surface activation of fibrous materials based on polyethylene terephthalate. Part 1: Study of the effect of sodium hydroxide solutions and preparations based on quaternary ammonium salts. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2009, no. 3, pp. 11–16 (in Russian).
18. Kuz'min S. M., Prorokova N. P., Khorev A. V., Vavilova S. Yu. Plasma-solution modification of polyethylene terephthalate fibrous material. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2010, no. 1, pp. 26–30 (in Russian).
19. Carosio F., Alongi G., Frache A. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology thermal stability and combustion of PET fabrics. *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, iss. 5, pp. 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009>
20. Salmeia K. A., Gaan S., Malucelli G. Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry. *Polymers*, 2016, vol. 8, iss. 9, pp. 319–355. <https://doi.org/10.3390/polym8090319>
21. Konstantinova N. I., Zuban' A. V. On the requirements for fire protection of textile materials. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*, 2022, no. 1, pp. 57–62 (in Russian). <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-1-57-62>
22. Zhang Q. H., Gu J., Chen G. Q., Xing T. L. Durable flame-retardant finish for silk fabric using boron hybrid silica sol. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 387, pp. 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.119>
23. Sirbu S. A., Czirkina O. G., Salikova A. Kh., Spiridonova V. G., Frolova T. V., Kuz'mina N. N. Problematic issues of imparting special protective properties to textile materials. *Sovremennyye problemy grazhdanskoi zashchity = Modern Problems of Civil Protection*, 2023, no. 2, pp. 133–139 (in Russian).
24. Spiridonova V. G., Sorokin D. V., Nikiforov A. L. Justification of current approaches to assessing the fire hazardous properties of textile materials and methods of fire protection of fabrics for various functional purposes. *Sovremennyye problemy grazhdanskoi zashchity = Modern Problems of Civil Protection*, 2023, no. 2 (47), pp. 125–132 (in Russian).
25. Kappes R. S., Urbainczyk T., Artz U., Textor T., Gutmann J. S. Flame retardant based on amino silanes and phenylphosphonic acid. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 129, pp. 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.012>
26. Alagni Y., Tata Y., Carosio F., Rosare G., Frache A. A Comparative analysis Nanoparticle Adsorption as Fire-Protection approach for Fabrics. *Polymers*, 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 47–68. <https://doi.org/10.3390/polym7010047>
27. Wan Norfazilah Wan Ismail. Sol-gel technology for innovative fabric finishing – A Review. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2016, vol. 78, pp. 698–707. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4027-y>
28. Malucelli G. Surface-Engineered Fire Protective Coatings for Fabrics through Sol-Gel and Layer-by-Layer Methods: An Overview. *Coatings*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 33–56. <https://doi.org/10.3390/coatings6030033>
29. Alongi G., Ciobanu M., Tata J., Carosio F., Malucelli G. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics subjected to sol-gel treatments. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, vol. 119, iss. 4, pp. 1961–1969. <https://doi.org/10.1002/app.32954>
30. Dasari A., Yu Z., Cai C. P., Ma J. W. Recent developments in the fire retardancy of polymer materials. *Progress in Polymer Science*, 2013, vol. 38, iss. 9, pp. 1357–1387. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsi.2013.06.006>

31. Alongi G., Collconi C., Rosare G., Malucelli G. The role of pre-hydrolysis on multistep sol-gel processes for enhancing the flame retardancy of cotton. *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 525–535. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9806-1>
32. Sirbu S. A., Burmistrov V. A., Samoilov D. B., Salikhova A. Kh. Development of fire-retardant compositions for textile materials. *Tekhnologiya tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Security Technologies*, 2011, vol. 5 (39), pp. 1–7 (in Russian).
33. Konovalova M. V., Rabaeva Yu. M. Surface modification and dyeing of polyester fibers using magnetically activated aqueous solutions. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2007, no. 4, pp. 41–44 (in Russian).
34. Reva O. V., Bogdanova V. V., Nazarovich A. N., Shukelo Z. V. Influence of the composition of inorganic flame retardants, chemisorbed on polyester fibrous material, on the patterns of its thermal destruction. *Vestnik komandno-inzhenerenogo instituta MCHS Respubliki Belarus* [Bulletin of Command-Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Belarus Republic], 2016, vol. 23, no. 1, pp. 4–12 (in Russian).
35. Reva O. V., Bogdanova V. V., Luk'yanov A. S., Perevostnikov S. S., Andreeva T. M. Dependence of the fire protection efficiency of nonwoven polyester material on the chemical nature of nitrogen-phosphorus-containing fire-retardant. *Zhurnal Belorusskogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya = Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2017, no. 2, pp. 85–93 (in Russian).
36. Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V., Radkevich L. V. Chemical grafting of inorganic functional layers to inert polymers. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 2011, vol. 16, no. 3, pp. 90–94 (in Russian).
37. Nazarovich A. N., Reva O. V. Criteria for the development of effective inorganic flame retardants for non-woven fine-fiber polyester materials. *Journal of Civil Protection*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 263–275. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-3.263>
38. Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V. Chemical grafting of fire-retardant compositions to polyester matrices. *Sviridovskie chteniya: sbornik statei* [Sviridov Readings: Collection of Articles]. Minsk, Belarusian State University, 2013, Iss. 9, pp. 158–168 (in Russian).
39. Reva O. V., Bogdanova V. V., Luk'yanov A. S. Obtaining permanent fire protection of polyethylene terephthalate with nano-sized nitrogen-phosphorus-containing fire retardants. *Nanostrukturnye materialy – 2016: Belarus' – Rossiya – Ukraina (NANO–2016): materialy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 22–25 noyabrya 2016 g.* [Nanostructured Materials – 2016: Belarus – Russia – Ukraine (NANO–2016): Proceedings of the V International Scientific Conference, Minsk, November 22–25, 2016]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, pp. 205–208 (in Russian).
40. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Reva O. V. Influence of the formulation of metal phosphate fire-retardant systems and modifying additives on the resistance of fire-retardant finishing of polyester fabrics to hydrolysis treatment. *Journal of Civil Protection*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 423–436. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-4.423>
41. Petrova O. V., Ermakova L. E., Burinskaya A. A., Grebennikov S. F. The mechanism of the intensifying action of redox systems in the process of dyeing wool with acid and active dyes. *Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [Textile Industry Technology], 2006, no. 2 (289), pp. 61–65 (in Russian).
42. Goloveshkina O. V., Shipinskii I. Ya., Kejbal N. A., Bondarenko S. N., Kablov V. F. New fire extinguishing compositions for polyester fibers. *Informatsionnoe prostranstvo sovremennoi nauki: sbornik materialov II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Cheboksary, 18 sentyabrya 2010 g.* [Information Space of Modern Science: Collection of Materials of the II International Correspondence Scientific and Practical Conference, Cheboksary, September 18, 2010]. Cheboksary, 2010, pp. 118–120 (in Russian).
43. Bogdanova V. V., Kobecz O. I., Shukelo Z. V. Study of the conditions for preliminary chemical activation of woven polyester material to enhance the effectiveness of its fire-retardant. *Innovatsionnyye tekhnologii zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy: sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 23 sentyabrya 2023 g.* [Innovative technologies for protection from emergency situations: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, September 23, 2023]. Minsk, University of Civil Protection, 2023, pp. 31–32 (in Russian).
44. *Powder Diffraction File. JcpDS. International Centre for Diffraction Data.* Swarthmore, 1989. Available at: <https://www.icdd.com>
45. Bellamy L. J. *The Infra-Red Spectra of Complex Molecules*. Dordrecht, Springer, 2013. XIX, 433 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6017-9>
46. El-Saftawy A. A., Elfalaky A., Ragheb M. S., Zakhary S. G. Electron beam induced surface modifications of PET film. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 102, pp. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.04.025>
47. Reva O. V., Nazarovich A. N., Bogdanova V. V. Fixation of inorganic flame retardants on the surface of polyester fibers. *Journal of Civil Protection*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 107–116 (in Russian).