

Разработка трудногорючего жесткого напыляемого пенополиуретана и исследование его физико-химических, огнезащитных и огнетушащих свойств

© В. В. Богданова^{1✉}, О. Н. Бурая¹, М. М. Тихонов²

¹ Учреждение Белорусского государственного университета “Научно-исследовательский институт физико-химических проблем” (Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Ленинградская, 14)

² Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь (Республика Беларусь, 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25)

РЕЗЮМЕ

Введение. Предотвращение и тушение пожаров в кабельных шахтах, электроустановках, находящихся под напряжением, пожаров классов А и В требует наличия материалов, обладающих огне- и термостойкостью и способностью заполнять пространство любой формы. Для получения материала, соответствующего данным требованиям, были проведены работы по созданию рецептуры напыляемого пенополиуретана (ППУ) и исследование его эксплуатационных, физико-химических, огнезащитных и огнетушащих свойств.

Цель и задачи. Разработка рецептуры трудногорючего напыляемого жесткого пенополиуретана, исследование механизма и синергизма огнезадерживающего действия N–P–Cl-содержащих замедлителей горения.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись компоненты А и Б для получения пенополиуретана марки “Изолан-125”, N–P–Cl-содержащие замедлители горения и пенополиуретановые композиции на их основе. Исследование огнезащитных, огнетушащих и физико-химических свойств ППУ-композиций и продуктов их термолитиза проводили с использованием методов, регламентированных ГОСТами, сканирующей электронной микроскопии, термического и химического анализов.

Результаты и их обсуждение. Разработан трудногорючий жесткий напыляемый ППУ, обладающий огнезащитными и огнетушащими свойствами. Исследованы эксплуатационные, физико-химические, огнезащитные и огнетушащие свойства трудногорючего пористого материала. Проведен сопоставительный количественный химический анализ остаточного содержания азота и фосфора в продуктах термической обработки исходного и огнезащитного ППУ, прогретых в интервале температур 200–500 °С, реализуемых при горении в предпламенной зоне конденсированной фазы. Определены минимальные концентрации азот-, галоген- и фосфорсодержащих замедлителей горения, необходимые для достижения огнезащитных свойств в исследуемом материале.

Выводы. Разработана рецептура композиции трудногорючего напыляемого жесткого пенополиуретана. Установлен механизм и синергизм действия N–P–Cl-содержащих замедлителей горения, заключающийся в ингибировании летучими азот- и галогенсодержащими продуктами радикальных процессов в газовой фазе, тогда как фосфорсодержащие продукты преимущественно принимают участие в образовании прочных термоизолирующих органоминеральных структур в конденсированной фазе. Показана перспективность применения трудногорючего ППУ для предупреждения и тушения пожаров классов А и В, а также в электроустановках, находящихся под напряжением.

Ключевые слова: термическое разложение; термоизолирующая пена; замедлители горения; конденсированная фаза; огнезамедлительная система.

Для цитирования: Богданова В. В., Бурая О. Н., Тихонов М. М. Разработка трудногорючего жесткого напыляемого пенополиуретана и исследование его физико-химических, огнезащитных и огнетушащих свойств // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 5. — С. 27–38. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.27-38.

✉ Богданова Валентина Владимировна, e-mail: bogdanova@bsu.by

Development of a flame retardant hard sprayed polyurethane foam and the study of its physicochemical, fire retardant and fire extinguishing properties

© Valentina V. Bogdanova^{1✉}, Oksana N. Buraya¹, Maxim M. Tikhonov²

¹ Institution of the Belarusian State University “Research Institute of Physical and Chemical Problems” (Leningradskaya St., 14, Minsk, 220006, Republic of Belarus)

² University of Civil Protection Ministry the Emergency Situations of Belarus Republic (Mashinostroiteley St., 25, Minsk, 220118, Republic of Belarus)

ABSTRACT

Introduction. Burning suppression and prevention in cable shafts, electrical installations, fires of Classes A and B, requires fire resistance materials, which have the ability to fill space with any form. For obtain material, appropriate these requirements, the composition of the sprayed polyurethane foam was developed and its operational, physic and chemical, fire retardant and fire extinguishing properties were studied.

Purpose and tasks. Development the recipe of a slow-burning sprayed hard polyurethane foam, study the mechanism and synergy the fire retardant action of N–P–Cl-containing flame retardants.

Materials and methods. The objects of study were components A and B for production the polyurethane foam brand of Izolan-125, N–P–Cl-containing flame retardants and polyurethane compositions based on them. The study of fire retardant, fire extinguishing, physical and chemical properties of polyurethane foam compositions and products of their thermolysis was carried out using regulate Standard testing methods, scanning electron microscopy, thermal and chemical analyzes.

Results and discussion. A flame resistant hard sprayed polyurethane foam, possessing fire protecting and fire extinguishing properties was been developed. The operational, physicochemical, fire protecting, and fire extinguishing properties of the nonflammable porous material were investigated. A comparative quantitative chemical analysis the residual content of nitrogen and phosphorus in the heat-treated products of the initial and flame protected polyurethane foam, heated in the temperature range 200–500 °C, realizing during combustion in the pre-flame zone of the condensed phase, was carried out. The minimal concentrations of nitrogen-, halogen- and phosphorus-containing combustion retardants, required to achieve flame protective properties in the testing material were determined.

Conclusion. The recipe of composition the nonflammable sprayed hard polyurethane foam was developed. The mechanism and synergism of action the N–P–Cl-containing combustion retardants was established, which consists in the inhibition of radical processes by volatile nitrogen- and halogencontaining products in the gas phase, while phosphorus-containing products mainly participate in the formation of durable thermally insulating organic-mineral structures in the condensed phase. The prospects of using the slow-burning polyurethane foam for the prevention and suppression fires of classes A and B, also electrical installations under voltage was shown.

Keywords: thermal decomposition; heat insulating foam; combustion retardants; condensed phase; fire retardant system.

For citation: V. V. Bogdanova, O. N. Buraya, M. M. Tikhonov. Development of a flame retardant hard sprayed polyurethane foam and the study of its physicochemical, fire retardant and fire extinguishing properties. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 5, pp. 27–38 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.27-38.

✉ Valentina Vladimirovna Bogdanova, e-mail: bogdanova@bsu.by

Введение

Одним из наиболее опасных видов пожаров в жилом секторе и общественных зданиях являются пожары в кабельных шахтах, возникающие при перегрузке электросети и коротких замыканиях, приводящих к возгоранию кабельной изоляции. Линейная скорость распространения горения таких пожаров — 0,8–1,0 м/мин [1], при этом в силу расположения кабельных шахт на лестничных клетках и в коридорах блокируются эвакуационные пути. Существующие в настоящее время способы локализации и ликвидации пожаров в кабельных шахтах не являются эффективными из-за низкой смачивающей способности и контакта огнетушащего вещества (ОТВ) (воды, огнетушащих порошков) с материалом, образующим горящие капли. В связи с этим актуальной является разработка пассивной и активной защиты, способной обеспечить как герметичность заделки мест прохода кабельных линий и шахт для предотвращения распространения пожара, так и эффективность его тушения.

Решение данной задачи может быть реализовано применением полимерных органических быстротвердеющих конденсированных пен, способных принимать любую форму и изолировать зону горения от доступа воздуха, препятствуя тем самым разви-

тию процесса горения. Было предположено, что в качестве такого материала может быть использован жесткий напыляемый пенополиуретан (ППУ), образующий в течение короткого времени (до 5–10 с) твердую пену, обладающую, наряду с термоизолирующими свойствами, способностью прекращать доступ воздуха в зону горения. Однако применение ППУ для этих целей невозможно без придания ему огнестойких свойств.

Пенополиуретаны получают взаимодействием двух основных жидких компонентов — А и Б. Компонент А представляет собой полиэфир или полиол, а компонент Б имеет изоцианатную природу. Снижение горючести ППУ-полимеров достигается введением в один из компонентов (как правило, в компонент А) замедлителей горения [2–4], использованием реагентов, приводящих к образованию термостойких изоциануратных и карбонизованных структур [5–7], а также нанесением на ППУ термоизолирующих покрытий [8]. В качестве замедлителей горения ППУ используются как жидкие, так и твердые галоген-, азот- и фосфорсодержащие соединения: трихлорэтилфосфат, трис(1-хлор-2-пропил)фосфат и другие низковязкие продукты, а также порошкообразные вещества — полифосфат аммония, меламин, терморасширяющийся графит, нанодисперсные

оксиды титана и кремния, природные минералы и разнообразные неорганические и органические соединения [2–12].

Трудность решения задачи по созданию огнезащитных вспененных материалов с требуемыми физико-механическими и физико-химическими свойствами заключается в многообразии исходных реагентов, используемых для синтеза ППУ различных марок (изоцианатов, полиолов, полиэфиров, отходов химических производств, модификаторов, катализаторов, вспенивающих агентов, регуляторов вязкости и других технологических добавок). Это не позволяет получать при экспериментах с реакционными компонентами другой химической природы данные, сопоставимые с литературными.

В настоящей работе для создания огнезащитного конденсированного вспененного материала, способного принимать требуемую форму и надежно изолировать горючие материалы различной химической природы от окислительной среды и температуры, изучены физико-механические, физико-химические, огнезащитные и огнетушащие свойства напыляемого жесткого, широко представленного на рынке пенополиуретана марки “Изолан-125”. Одновременно определена огнетушащая эффективность ППУ-пены на стадии ее получения при тушении пожаров различных классов. В качестве замедлителей горения использованы аммонийные фосфаты двух- и трехвалентных металлов (АМФ) [13] общего катионного и анионного состава ($[\text{NH}_4]^+$; $[\text{Me}^{2+}/\text{Me}^{3+}]$; $[\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{PO}_4^{3-}]$) с различным содержанием азота и фосфора, которые из-за высокой реакционной способности компонента Б вводили только в компонент А. Технологической добавкой, позволяющей снизить вязкость антипирированного компонента А в концентрации 3 %, являлся трихлорэтилфосфат (ТХЭФ) ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_4\text{Cl}_3\text{P}$).

Материалы и методы исследования

Введение замедлителей горения осуществляли за счет пропорционального снижения содержания компонентов реакционной смеси пенополиуретана. Массовое соотношение исходных компонентов составляло: А:Б = 1:1. Огнезащитную эффективность составов на основе АМФ определяли по ГОСТ 12.1.044–89 с установлением группы горючести и кислородного индекса (КИ). Огнетушащую эффективность ППУ определяли по методике [14], в соответствии с которой использовались геометрически подобные деревянные бруски и размеры очагов пожара класса А отличались от стандартных по ГОСТ Р 51057–2001 (были меньше в 2 раза). Очаг пожара класса В также отличался от стандартного по ГОСТ Р 51057–2001 в 2 раза, при этом соотношение воды и горючего в нем сохранялось. Термическое пове-

дение исходного и огнезащитного ППУ исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре (Netzsch STA 449 C) со скоростью подъема температуры 10 К/мин в интервале 20–600 °С. Мгновенные значения эффективной энергии активации $E_{\text{акт}}$ в координатах $\ln k - 1/(RT)$ определяли как тангенс угла наклона касательной к экспериментальной кривой ТГ в точках с шагом не более 1,5° (где k — константа скорости; R — газовая постоянная (8,314 кДж/(моль·К); T — температура, К). Значение эффективной энергии активации на определенной стадии процесса принималось равным среднему арифметическому мгновенных значений в интервале температур, соответствующем протеканию процесса термического разложения ППУ-композиций. Поступление азот- и фосфорсодержащих продуктов в газовую фазу устанавливали по разности содержания азота и фосфора в исходных образцах и образцах пенополиуретанового материала, прогретых в течение 10 мин в температурном интервале 200–500 °С, реализуемом в конденсированной фазе на различном расстоянии от поверхности горения. Остаточное содержание азота находили микрохромовым методом Тюрина [15], а фосфора — спектрофотометрическим методом [16]. Пересчет содержания азота и фосфора в анализируемых образцах проводили с учетом потери массы при термообработке. Чтобы получить сравнимые данные по содержанию анализируемых элементов в образцах, производили пересчет на единицу массы навески. Условную вязкость компонентов ППУ-композиции определяли вискозиметром ВЗ-246 по ГОСТ 9070–75. Сопоставительные исследования микроструктуры исходного и огнезащитного ППУ проводили с использованием электронного сканирующего микроскопа LEO-1420. Прочность продуктов термолитиза исходного и огнезащитного ППУ измеряли способом, аналогичным приведенному в ГОСТ 24622. В нем определялась масса нагрузки, при которой происходило разрушение термообработанных в течение одного и того же времени (10 мин) образцов одинакового размера.

Результаты и их обсуждение

На предварительном этапе работы для дальнейших исследований отобран замедлитель горения (АМФ5), имеющий массовое соотношение компонентов в пересчете на оксиды $\text{NH}_3:\text{P}_2\text{O}_5:\text{SO}_3:\text{CaO}:\text{MgO} = 0,44:2:1,67:1:2$. Введение его в концентрации 15 % позволяет получить трудногорючий ППУ. Однако применение данного замедлителя горения в такой концентрации оказалось проблематичным из-за технологических трудностей получения ППУ, так как вязкость антипирированного компонента А в присутствии такого количества АМФ5 увеличивалась

в 7 раз. Для снижения вязкости антипирированного компонента А использовали ряд модификаторов (трихлорэтилфосфат, трихлорпропилфосфат, гидрофобизирующие кремнийорганические жидкости — ГКЖ-10, Пента). В результате установлено, что лучшим модификатором в данном случае является ТХЭФ. При введении его в компонент А в 3 %-ной концентрации при одновременном снижении содержания АМФ5 до 12 % получаемая ППУ-композиция становилась трудногорючей, а вязкость антипирированного компонента А приближалась к вязкости компонента Б (78,7 с).

Сопоставительными исследованиями реакционных и физико-химических свойств исходного и огнезащитного ППУ показано, что найденная огнезамедлительная система (12 % АМФ5 и 3 % ТХЭФ) не влияет на реакционные параметры исследуемой композиции (время старта — 15–16 с, гелеобразования — 31–33 с, роста пены — 22–40 с), а также на физико-химические свойства вспененного материала (кажущаяся плотность — 43,8–48,3 кг/м³, влагопоглощение — 0,12–0,22 %, теплопроводность — 0,025–0,030 Вт/(м·К)).

За рубежом для характеристики огнестойких ППУ используют стандарты UL 94, VTM-1, ISO 1210 и другие, предусматривающие различную длительность огневого воздействия (10, 30 и 60 с) на вертикально или горизонтально закрепленные образцы с регистрацией времени самостоятельного горения и образования горящих капель. Этим методам в наибольшей степени соответствует ГОСТ 28157. В результате испытаний исходного и огнезащитного ППУ нами установлено [17], что из-за высокой склонности ППУ к карбонизации условия испытаний по данному стандарту не позволяют получить достоверные сопоставительные данные об уровне огнестойкости исходного и огнезащитного материала. Наиболее приемлемым методом экспериментального определения огнестойких свойств ППУ-материалов является метод, регламентированный ГОСТ 12.1.044 (п. 4.3 — определение группы горючести твердых горючих материалов, п. 4.14 — определение кислородного индекса (КИ)). Результаты сопоставительных исследований показали, что максимальное приращение температуры Δt (°C), потеря массы Δm (%) и кислородный индекс исходного и огнезащитного ППУ составляют соответственно 250 и 35,6 °C; 71,9 и 50,1 %; 23,3 и 26,2. Полученные данные позволили классифицировать исходный жесткий напыляемый ППУ как горючий, легковоспламеняемый материал, а огнезащитный ППУ — как трудногорючий.

Исследованием структуры и размера пор исходного и огнезащитного ППУ методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что

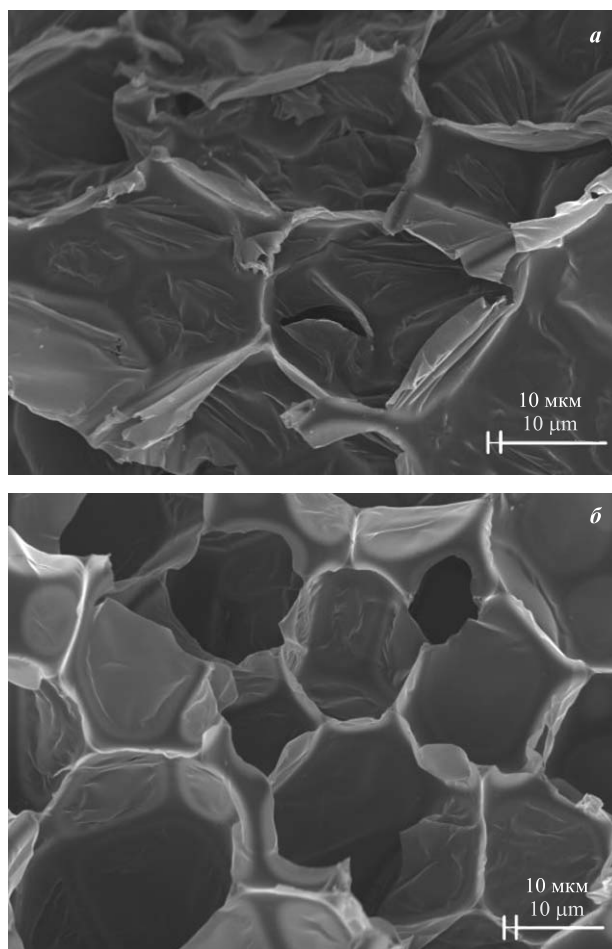


Рис. 1. Структура и размер пор исходного (а) и трудногорючего (б) пенополиуретана

Fig. 1. The structure and pore size of the original (a) and slow-burning (b) polyurethane foam

в последнем случае наблюдается утолщение стенок и уменьшение размера пор (рис. 1). Это свидетельствует о положительном влиянии используемой огнезамедлительной системы на пористую структуру термоизоляционного материала.

Горение ППУ, как и любого другого твердого горючего материала, включает в себя его термическое разложение в предпламенной зоне конденсированной фазы с образованием летучих горючих продуктов, сгорающих в пламенной зоне. На основе данных термического исследования исходного и огнезащитного ППУ можно сделать вывод, что в целом антипириновая система принципиально не изменяет характер кривых потери массы и дифференциального термического анализа ППУ [18, 19]. Однако при этом наблюдается значительное увеличение энергии активации для огнезащитного материала (41,2 кДж/моль) по сравнению с исходным (23,6 кДж/моль) на первой стадии термического разложения. В температурном интервале 240–325 °C, соответствующем распаду ППУ-структуры, обнаружено существенное снижение скорости потери

массы труднотгорючего материала по сравнению с исходным. На последней стадии термолитза исследуемых материалов (450–600 °С), когда происходит догорание коксового остатка, также заметно снижение скорости потери массы огнезащищенного ППУ. Тепловыделение на заключительной стадии термолитза для исходного ППУ составляет 2602 Дж/г, а для труднотгорючего — 1857 Дж/г. Следовательно, для огнезащищенного ППУ характерно ощутимое снижение скорости тепловыделения и повышение температуры начала термического разложения по сравнению с исходным образцом.

С данными термического анализа согласуются результаты по определению температурного профиля в исследуемых материалах при различном расстоянии от фронта и времени воздействия пламени. Независимо от расстояния до источника пламени в огнезащищенном образце регистрируются более низкие (от 2 до 7 раз) скорости подъема температуры по сравнению с исходным ППУ (табл. 1). Одновременно установлено, что при длительном огневом воздействии (100 с), когда скорости подъема температуры у обоих образцов сближаются, в труднотгорючем материале для всех исследуемых расстояний до фронта пламени регистрируются температуры на 50–60 °С ниже, чем в исходном ППУ (табл. 2).

Для установления причин более высокой термостойкости огнезащищенного ППУ по сравнению с исходным проведены электронно-микроскопические исследования морфологии обугленных структур, образующихся на различном расстоянии от фронта пламени. Как видно из полученных данных, для кокса труднотгорючего ППУ на всех исследованных расстояниях от поверхности горения характерна мелкопористая структура (рис. 2,б), тогда как для аналогичных структур исходного материала — крупночешуйчатая (рис. 2,а). Одновременно определена прочность обугленных каркасов исследуемых материалов в температурном интервале 300–500 °С. Из данных табл. 3 видно, что прочность обугленного каркаса труднотгорючего материала в указанном интервале температур в 4–8 раз выше по сравнению с исходным. Полученные данные свидетельствуют о более высоких физико-механических и термостойких свойствах труднотгорючего ППУ по сравнению с исходным после огневого воздействия.

До настоящего времени в литературе встречаются противоречивые суждения относительно факторов, оказывающих определяющее влияние на прекращение горения ППУ. Так, авторы [20] на основании масс-спектрометрических исследований продуктов термического разложения гибкого полиуретана в присутствии антипиренов пришли к выводу о газофазном механизме действия исследуемых замедлителей горения. Авторы [4, 21], напротив,

Таблица 1. Скорость подъема температуры в пенополиуретане на различном расстоянии от фронта пламени в зависимости от времени огневого воздействия

Table 1. The rate of temperature rise in the polyurethane foam at a different distance from the flame front, in dependence on the time of fire exposure

Время огневого воздействия, с Time of fire exposure, sec	Скорость подъема температуры в исходном/труднотгорючем ППУ, °С/с, на расстоянии от фронта пламени, мм The rate of temperature rise in the initial/slow-burning polyurethane foam, °C/sec, at a distance from the flame front, mm		
	5	25	45
25	11,52/6,72	11,54/2,72	7,32/1,00
50	6,78/5,00	4,88/1,76	2,78/1,00
75	4,61/4,00	3,00/1,84	2,00/0,90
100	3,50/3,18	2,22/1,75	1,50/0,75

Таблица 2. Максимальные температуры пенополиуретанового материала на различном расстоянии от фронта пламени при времени экспозиции пламени 100 с

Table 2. Maximal temperatures of polyurethane foam material at various distances from the flame front at a flame exposure time of 100 sec

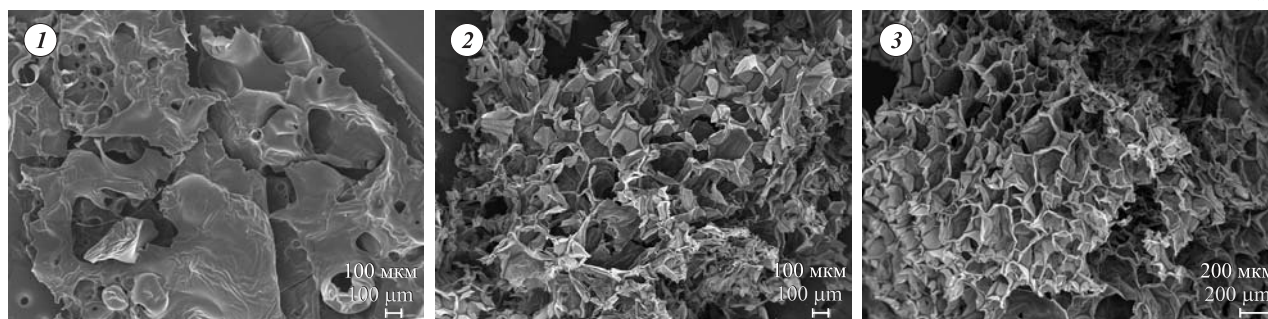
Расстояние от фронта пламени, мм Distance from flame front, mm	Максимальная температура, °С, ППУ Maximum temperature, °C, PPU	
	исходного источника source	труднотгорючего slow-burning
5	350	300
25	260	200
45	150	100

полагают, что пожароопасность модифицированных ППУ снижается в результате увеличения образования карбонизованного остатка в процессе его пиролиза и горения.

В связи с противоречивостью литературных данных относительно процессов, оказывающих определяющее влияние на прекращение горения пенополиуретановых полимеров, проведено количественное исследование распределения ингибирующих элементов (Cl, N, P) между газовой и конденсированной фазами в продуктах термической обработки исходного и огнезащищенного ППУ, прогретых в интервале температур 200–500 °С в течение 10 мин (табл. 4) [22–24]. Данный интервал температур соответствует температурам, реализуемым в предпламенной зоне конденсированной фазы на различном расстоянии от фронта пламени. Время термообработки выбрано исходя из того, что в этом интервале температур для исследуемых образцов наблюдается выход на плато кривых потери массы в зависимости от времени (см. табл. 4).

Как видно из полученных данных (см. табл. 4), при термообработке во всем исследованном темпе-

a



б

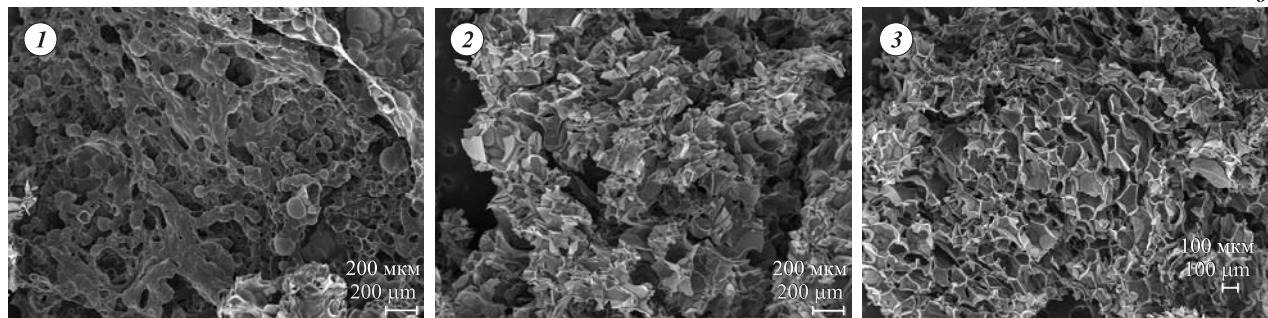


Рис. 2. Морфология поверхности коксовых каркасов исходного (а) и огнезащищенного (б) пенополиуретана на расстоянии от фронта пламени: 1 — 5 мм; 2 — 25 мм; 3 — 45 мм

Fig. 2. Surface morphology of the coke shells initial (a) and fireproof (b) polyurethane foam at a distance from the flame front: 1 — 5 mm; 2 — 25 mm; 3 — 45 mm

Таблица 3. Зависимость нагрузки разрушения продуктов термообработки пенополиуретановых композиций от температуры

Table 3. Dependence of the destruction load the products of heat treatment the polyurethane foam compositions from temperature

Температура термо- обработки ППУ, °С PPU heat treatment temperature, °C	Нагрузка разрушения ППУ, г Destruction load PPU, g	
	исходного source	трудногорючего slow-burning
300	400	3400
350	300	1250
400	200	300
450	100	150
500	50	125

ратурном интервале огнезащищенного ППУ, содержащего примерно одинаковое общее количество азота и фосфора, по сравнению с исходным полимером наблюдается поступление их в газовую фазу в меньшем объеме (в 1,4 раза). Этот факт свидетельствует об участии азота и фосфора, входящих в состав замедлителя горения, в образовании органоминерального каркаса. С другой стороны, для того чтобы определить вклад процессов, протекающих в твердой и газовой фазах, в ингибирование горения ППУ, необходимо, наряду с летучими азотфосфорсодержащими соединениями, учитывать и вклад галогенсодержащего продукта (ТХЭФ). Хлорсодержащие

Таблица 4. Сопоставительные данные по потерям азота (ΔN), фосфора (ΔP) и хлора (ΔCl) при термоллизе исходной и трудногорючей пенополиуретановых композиций [22–24]

Table 4. Comparative data about the loss of nitrogen (ΔN), phosphorus (ΔP) and chlorine (ΔCl) during the thermolysis of the initial and hardly combustible polyurethane foam compositions [22–24]

Темпе- ратура, °С Tempe- rature, °C	Потери для исходного/огнезащищенного ППУ Losses for source/fireproof foam			
	Δm , %	ΔN , г ΔN , g	ΔP , г ΔP , g	ΔCl , г ΔCl , g
200	9,7/8,4	1,76/0,90	0,37/0,35	–/1,11
300	35,8/32,9	2,20/1,59	2,94/1,69	–/1,11
400	41,8/39,5	2,40/1,75	3,63/2,78	–/1,11
500	59,6/54,2	2,89/2,28	4,74/3,64	–/1,11
Всего Total	–	9,25/6,52	11,68/8,46	–/4,44

Примечания: 1. Содержание азота и фосфора в исходном непрогретом ППУ: N — 5,5 г; P — 6,6 г.

2. Общее содержание ингибиторов горения в трудногорючем ППУ: N — 5,3 г; P — 6,9 г; Cl — 1,1 г.

Notes: 1. The content of nitrogen and phosphorus in the source unheated PPU: N — 5,5 g; P — 6,6 g.

2. The total content of combustion inhibitors in slow-burning polyurethane foam: N — 5,3 g; P — 6,9 g; Cl — 1,1 g.

летучие продукты разложения этой добавки также поступают в газовую фазу и принимают участие в ингибировании радикальных реакций, ответственных за развитие процесса горения. В этом случае

по сравнению с исходным материалом в газовую фазу при огневом воздействии на огнезащитный ППУ поступает большее количество азотгалогенсодержащих летучих ингибиторов горения. Одновременно в твердых продуктах термолитического разложения ППУ отмечается более высокое содержание фосфора. Отсутствие ингибирующего эффекта при использовании азот-, галоген- и фосфорсодержащих замедлителей горения по отдельности, а также полученные количественные данные о распределении азота, хлора и фосфора между конденсированной и газовой фазами позволяют установить механизм синергического действия азот-, галоген- и фосфорсодержащих антипиренов: фосфор преимущественно участвует в образовании конденсированных органоинеральных термоизолирующих структур, а азот и хлор являются ингибиторами радикальных процессов в пламенной зоне.

С использованием синтезированного аммонийфосфатного замедлителя горения АМФ5, взятого в различных концентрациях, индивидуального ТХЭФ и их смеси установлена зависимость нормативных параметров горючести от количественного содержания в исследуемой ППУ-композиции ингибирующих элементов. Найдено, что композиционный материал является трудногорючим, если содержание азота либо азота и хлора составляет не менее 0,7–1,6 г, а фосфора — не менее 1,25 г на 100 г ППУ-композиции. При более низких концентрациях элементов, способных образовать летучие ингибиторы горения, нормативный параметр приращения температуры отходящих газов не достигается. Нормативный параметр по потере массы ППУ наиболее чувствителен к содержанию фосфора.

На первом этапе исследования возможности практического использования трудногорючей быстротвердеющей ППУ-пены в качестве средства, препятствующего распространению горения, изучали эффективность ее применения для локализации пожаров в кабельных шахтах зданий, которые отличаются высокой скоростью распространения горения снизу-вверх и сверху-вниз из-за образования горящих капель расплава полимерных оболочек кабеля.

Предварительные сравнительные испытания эффективности локализации горения с применением исходного и трудногорючего ППУ проведены на экспериментальной установке, моделирующей реальные условия при пожаре в кабельной шахте [25]. При измерении температуры на необогреваемой поверхности термоизолирующих пробок установлено, что при 10-минутном горении кабелей с поливинилхлоридной изоляцией на необогреваемой поверхности пробки из трудногорючего ППУ зарегистрирована температура 20 °С, тогда как в аналогичных испытаниях исходного материала температура со-

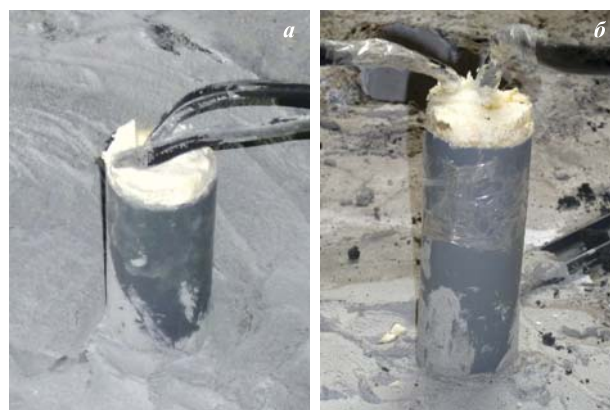


Рис. 3. Результат полигонных испытаний трудногорючего пенополиуретана по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94: а — до испытания; б — после испытания

Fig. 3. The result of ground tests of slow-burning polyurethane foam according to Interstate Standard 30247.0–94 and Interstate Standard 30247.1–94: a — before the test; b — after the test

ставляла 195 °С. Полученные результаты подтверждены проведением полигонных испытаний трудногорючего ППУ для огнезащиты кабельных проходок по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94. При 60-минутном испытании целостность кабеля не нарушалась (рис. 3), максимальная температура на необогреваемой поверхности ППУ-заделки кабеля составляла 62 °С, а на оболочке кабеля — 59,6 °С. Для сравнения согласно НПБ 237–97 критическая температура нагрева материала оболочки кабеля в необогреваемой зоне должна быть не выше 145 °С.

Для тушения лабораторных очагов пожара класса А и В пенополиуретановой пеной использовали оригинальную переносную установку [26], состоящую из двух емкостей и пистолета-распылителя. В первой емкости находилась смесь компонента А с замедлителем горения, во второй — компонент Б. Для определения расхода огнетушащего средства (ОС) на тушение очагов класса А и В использовали показатель удельного расхода ОС на 1 м² поверхности горения Q (дм³/м²) [27]:

$$Q = V_T / F_T,$$

где V_T — объем ОС, израсходованного на тушение, дм³;

F_T — площадь поверхности горения, м².

В табл. 5 представлены сопоставительные данные по огнетушащей эффективности ППУ при тушении очагов пожара класса А по сравнению с водой, водой с поверхностно-активным веществом (ПАВ) и специализированными жидкостными синтетическими средствами на основе аммонийных металлофосфатов [28].

Как следует из полученных сопоставительных данных (см. табл. 5), огнетушащая эффективность при тушении очага пожара класса А существенно выше по сравнению с водой и водой с ПАВ и сопо-

Таблица 5. Расход огнетушащих средств на тушение лабораторного очага пожара класса А [27, 29]**Table 5.** The extinguishing agents (EA) consumption to extinguish a laboratory fire site with class A [27, 29]

Огнетушащее средство Extinguishing agent	Концентрация ОС, % EA concentration, %	Объем ОС, израсходованного на тушение, $\text{l} \cdot 10^{-3}, \text{dm}^3$ The volume of EA spent on quenching, $\text{l} \cdot 10^{-3}, \text{dm}^3$	Наличие повторного воспламенения Reignition	Удельный расход ОС, dm^3/m^2 Specific EA consumption, dm^3/m^2
Вода Water	–	60,0	Нет No	0,50
ПО-6НСВ PO-6NSV	1	45,0		0,38
АН-60 AN-60	15	26,7		0,22
СиАНС SiANS	15	22,5		0,19
Труднотгнущий ППУ Slow-burn-ing PPU	–	19,6		0,16

ставима по удельному расходу со специализированными жидкостными средствами (АН-60, СиАНС), используемыми для тушения твердых горючих материалов [27, 29]. Лабораторный очаг пожара класса В представлял собой круглый противень из листовой стали объемом 120 dm^3 и площадью $0,02 \text{ m}^2$.

Сопоставительные данные по удельным расходам известных пенообразователей и труднотгнущего ППУ на тушение лабораторного очага класса В приведены в табл. 6.

Из данных табл. 6 следует, что удельный расход на тушение пожара В конденсированной трудно-

Таблица 6. Расходы огнетушащих средств на тушение очага пожара класса В [27, 29]**Table 6.** Costs of extinguishing facilities to extinguish a fire site with class B [27, 29]

Огнетушащее средство Extinguishing agent	Удельный расход ОС, $\text{dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$ Specific EA consumption, $\text{dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$
Тонкораспыленная вода Finely atomized water	0,30
Раствор пенообразователя с применением / Foaming agent solution using:	
фторсодержащих пленкообразующих ПО целевого назначения fluorinated film-forming software for special purposes	0,10
ПО-1 / PO-1	0,08
ПО-1Д / PO-1D	0,12
САМПО, ПО-6НП / SAMPO, PO-6NP	0,15
ПО-ЗАИ, ТЭАС, ПО-ЗНПЮ, ПО-6ТС / PO-ZAI, TEAS, PO-ZNPYu, PO-6TS	0,15
Огнезащищенный ППУ Fireproof PUF	0,06

горючей пены существенно меньше аналогичных расходов пенообразующих ПАВ.

На рис. 4 представлены результаты тушения лабораторных очагов пожаров классов А и В.

Конденсированная труднотгнущая ППУ-пена может представлять интерес для тушения оборудования, находящегося под напряжением. Установлено, что электрическое сопротивление исследуемого материала сопоставимо с аналогичным параметром



Рис. 4. Результаты тушения лабораторных очагов пожаров класса А (а, б) и класса В (в, г) до испытания (а, в) и после испытания (б, г)
Fig. 4. The results of extinguishing a laboratory fire site with class A (a, b) and B (v, g) before the test (a, v) and after the test (b, g)

для воздуха — $R > 1$ МОм. Для сравнения электрическое сопротивление воды — 300 КОм. Следовательно, трудногорючий ППУ является перспективным средством тушения электроустановок, находящихся под напряжением.

Таким образом, на базе компонентов напыляемого жесткого пенополиуретана марки “Изолан-125” разработана трудногорючая композиция, имеющая широкий диапазон применения (огнезащитные теплоизоляционные материалы, изделия, защита кабельных проходок от распространения огня). Впервые показана перспективность использования распыляемой пены в момент ее получения в качестве эффективного огнетушащего средства комплексного действия для тушения пожаров класса А и В, а также в электрических установках, находящихся под напряжением. Установлено, что такой эффект достигается за счет реализации нескольких механизмов прекра-

щения горения в присутствии N-, P-, Cl-содержащей антипиреновой системы: образование прочной закрытопористой термоизолирующей структуры, защищающей горючий материал от воздействия температуры, затрудняющей доступ воздуха в зону горения и препятствующей поступлению летучих горючих продуктов в пламенную зону. Одновременно в газовую фазу происходит выход летучих азот- и галогенсодержащих продуктов, нейтрализующих активные центры пламени, что приводит к изменению условий тепло- и массопереноса между пиролизующимся в конденсированной фазе полимером и пламенной зоной. Синергизм азот-, галоген- и фосфорсодержащих антипиренов обусловлен участием фосфора в образовании преимущественно расплавленных или вспененных органоминеральных продуктов в конденсированной фазе, а азот и галогены являются ингибиторами радикальных реакций в газовой фазе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. — М. : Стройиздат, 1987. — 288 с.
2. Weil E. D., Levchik S. V. Commercial flame retardancy of polyurethanes // Journal of Fire Sciences. — 2004. — Vol. 22, No. 3. — P. 183–210. DOI: 10.1177/0734904104040259.
3. Сучков В. П., Мольков А. А. Технология производства трудногорючего пенополиуретана с использованием фосфогипса // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2009. — № 6(606). — С. 25–29.
4. Dong Q., Chen K., Jin X., Sun S., Tian Y., Wang F., Liu P., Yang M. Investigation of flame retardant flexible polyurethane foams containing DOPO immobilized titanium dioxide nanoparticles // Polymers. — 2019. — Vol. 11, No. 1. — P. 75–86. DOI: 10.3390/polym11010075.
5. Chattopadhyay D. K., Webster D. C. Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes // Progress in Polymer Science. — 2009. — Vol. 34, No. 10. — P. 1068–1133. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002.
6. Vitkauskienė I., Makuška R., Stirna U., Cabulis U. Thermal properties of polyurethane-polyisocyanurate foams based on poly(ethylene terephthalate) waste // Materials Science. — 2011. — Vol. 17, No. 3. — P. 249–253. DOI: 10.5755/j01.ms.17.3.588.
7. Jin X., Gu X., Chen C., Tang W., Li H., Liu X., Bourbigot S., Zhang Z., Sun J., Zhang S. The fire performance of polylactic acid containing a novel intumescent flame retardant and intercalated layered double hydroxides // Journal of Materials Science. — 2017. — Vol. 52, No. 20. — P. 12235–12250. DOI: 10.1007/s10853-017-1354-5.
8. Kim Y. S., Davis R., Cain A. A., Grunlan J. C. Development of layer-by-layer assembled carbon nanofiber-filled coatings to reduce polyurethane foam flammability // Polymer. — 2011. — Vol. 52, No. 13. — P. 2847–2855. DOI: 10.1016/j.polymer.2011.04.023.
9. Singh H., Jain A. K., Sharma T. P. Effect of phosphorus-nitrogen additives on fire retardancy of rigid polyurethane foams // Journal of Applied Polymer Science. — 2008. — Vol. 109, No. 4. — P. 2718–2728. DOI: 10.1002/app.28324.
10. Лучкина Л. В., Рудь Д. А., Рудакова Т. А., Сухов А. В. Влияние концентрации антипирена и химической структуры жестких пенополиуретанов на их пожароопасность // Полимерные материалы пониженной горючести : тр. VI Международной конференции (Россия, г. Вологда, 14–18 марта 2011 г.). — Вологда : ВоГТУ, 2011. — С. 43–45.
11. Feske E. F., Brown W. R. Flame retardant pentane blown polyisocyanurate foams for roofing // Proceedings of Polyurethanes Expo 2002 (Salt Lake City, UT, 13–16 October, 2002). — Washington : American Plastics Council, 2002. — P. 32–40.
12. Thirumal M., Singha N. K., Khastgir D., Manjunath B. S., Naik Y. P. Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foams: Effect of alumina trihydrate and triphenylphosphate on the properties of polyurethane foams // Journal of Applied Polymer Science. — 2010. — Vol. 116, No. 4. — P. 2260–2268. DOI: 10.1002/app.31626.

13. Богданова В. В., Кобец О. И. Синтез и физико-химические свойства фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония (обзор) // Журнал прикладной химии. — 2014. — Т. 87, №. 10. — С. 1385–1399.
14. Богданова В. В., Лахвич В. В., Врублевский А. В., Дмитриченко А. С. Огнетушащая эффективность жидкостных химических составов при тушении пожаров класса А распылительными устройствами пожаротушения // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2008. — № 1. — С. 35–41.
15. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : МГУ, 1970. — 488 с.
16. Марченко З. Фотометрическое определение элементов / Пер. с польского. — М. : Мир, 1971. — 501 с.
17. Тихонов М. М. Огнепреграждающая композиция на основе жесткого напыляемого пенополиуретана // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2013. — № 1(33). — С. 50–60.
18. Allan D., Daly J., Liggat J. J. Thermal volatilisation analysis of TDI-based flexible polyurethane foam // Polymer Degradation and Stability. — 2013. — Vol. 98, No. 2. — P. 535–541. DOI: 10.1016/j.polymerdegradstab.2012.12.002.
19. Решетников С. М., Шиляев А. В., Зенитова Л. А. Термическое разложение пенополиуретанов с антипиренами // Полимерные материалы пониженной горючести : тр. VI Международной конференции (Россия, г. Вологда, 14–18 марта 2011 г.). — Вологда : ВоГТУ, 2011. — С. 23–27.
20. König A., Kroke E. Flame retardancy working mechanism of methyl-DOPO and MPPP in flexible polyurethane foam // Fire and Materials. — 2012. — Vol. 36, No. 1. — P. 1–15. DOI: 10.1002/fam.1077.
21. Jiao C., Wang H., Zhang Z., Chen X. Preparation and properties of an efficient smoke suppressant and flame-retardant agent for thermolastic polyurethane // Polymers for Advanced Technologies. — 2017. — Vol. 28, No. 12. — P. 1690–1698. DOI: 10.1002/pat.4041.
22. Богданова В. В., Кобец О. И., Бурая О. Н. Направленное регулирование огнезащитной и огнетушащей эффективности N–P-содержащих антипиренов в синтетических и природных полимерах // Горение и взрыв. — 2019. — Т. 12, № 2. — С. 106–115. DOI: 10.30826/CE19120214.
23. Богданова В. В., Тихонов М. М. Влияние замедлителей горения на термические и огнестойкие свойства жесткого пенополиуретана // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 8(145). — С. 49–53.
24. Богданова В. В., Кобец О. И., Тихонов М. М. Факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение горения природных и синтетических материалов // Полимерные материалы пониженной горючести : тр. VIII Международной конференции (Республика Казахстан, г. Алматы, 5–10 июня 2017 г.). — Кокшетау : Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан, 2017. — С. 88–91.
25. Богданова В. В., Тихонов М. М. Исследование эксплуатационных и огнезащитных свойств пенополиуретановых конденсированных пен // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук [Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук]. — 2013. — № 1. — С. 24–28.
26. Пат. 10112 Республика Беларусь. МПК А 62С 15/00, А 62С 31/12, В 05В 7/02, В 01F 5/18, В 01F 3/14. Ранцевая установка для подачи трудногорючего ППУ / Тихонов М. М., Богданова В. В., Бурая О. Н. — № U 20130873; заявл. 30.10.2013; опубл. 30.06.2014, Бюл. № 3(98). — С. 183.
27. Богданова В. В., Тихонов М. М., Мамедов А. М. Быстротвердеющие полимерные пены для ограничения распространения и тушения пожаров // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2016. — № 2(24). — С. 4–9.
28. Тихонов М. М., Богданова В. В. Трудногорючий пенополиуретан как огнетушащее средство // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб–2017) : тезисы докладов Международной научно-технической конференции (Республика Беларусь, г. Гомель, 27–30 июня 2017 г.). — Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2017. — С. 75.
29. Богданова В. В., Тихонов М. М., Мамедов А. М. Полимерное огнетушащее средство для тушения пожаров в электроустановках, находящихся под напряжением // Строительство: новые технологии — новое оборудование. — 2017. — № 12. — С. 60–66.

REFERENCES

1. V. P. Ivannikov, P. P. Klyus. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [Fire ground commander handbook]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 288 p. (in Russian).
2. E. D. Weil, S. V. Levchik. Commercial flame retardancy of polyurethanes. *Journal of Fire Sciences*, 2004, vol. 22, no. 3, pp. 183–210. DOI: 10.1177/0734904104040259.

3. V. P. Suchkov, A. A. Molkov. The technology for the production of slow-burning polyurethane foam using phosphogypsum. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo / News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2009, no. 6(606), pp. 25–29 (in Russian).
4. Q. Dong, K. Chen, X. Jin, S. Sun, Y. Tian, F. Wang, P. Liu, M. Yang. Investigation of flame retardant flexible polyurethane foams containing DOPO immobilized titanium dioxide nanoparticles. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 75–86. DOI: 10.3390/polym11010075.
5. D. K. Chattopadhyay, D. C. Webster. Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes. *Progress in Polymer Science*, 2009, vol. 34, no. 10, pp. 1068–1133. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002.
6. I. Vitkauskienė, R. Makuška, U. Stirna, U. Cabulis. Thermal properties of polyurethane-polyisocyanurate foams based on poly(ethylene terephthalate) waste. *Materials Science*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 249–253. DOI: 10.5755/j01.ms.17.3.588.
7. X. Jin, X. Gu, C. Chen, W. Tang, H. Li, X. Liu, S. Bourbigot, Z. Zhang, J. Sun, S. Zhang. The fire performance of polylactic acid containing a novel intumescent flame retardant and intercalated layered double hydroxides. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, no. 20, pp. 12235–12250. DOI: 10.1007/s10853-017-1354-5.
8. Y. S. Kim, R. Davis, A. A. Cain, J. C. Grunlan. Development of layer-by-layer assembled carbon nano-fiber-filled coatings to reduce polyurethane foam flammability. *Polymer*, 2011, vol. 52, no. 13, pp. 2847–2855. DOI: 10.1016/j.polymer.2011.04.023.
9. H. Singh, A. K. Jain, T. P. Sharma. Effect of phosphorus-nitrogen additives on fire retardancy of rigid polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 109, no. 4, pp. 2718–2728. DOI: 10.1002/app.28324.
10. L. V. Luchkina, D. A. Rud, T. A. Rudakova, A. V. Sukhov. The effect of the concentration of flame retardant and the chemical structure of rigid polyurethane foams on their fire hazard. In: *Polimernyye materialy ponizhennoy goryuchesti. Trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Low Combustibility Polymeric Materials. Proceedings of VI International Conference]. Vologda, Vologda State Technical University, 2011, pp. 43–45 (in Russian).
11. E. F. Feske, W. R. Brown. Flame retardant pentane blown polyisocyanurate foams for roofing. In: *Proceedings of Polyurethanes Expo 2002 (Salt Lake City, UT, 13–16 October, 2002)*. Washington, American Plastics Council, 2002, pp. 32–40.
12. M. Thirumal, N. K. Singha, D. Khastgir, B. S. Manjunath, Y. P. Naik. Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foams: Effect of alumina trihydrate and triphenylphosphate on the properties of polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 116, no. 4, pp. 2260–2268. DOI: 10.1002/app.31626.
13. V. V. Bogdanova, O. I. Kobets. Synthesis and physicochemical properties of di- and trivalent metal-ammonium phosphates. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, no. 10, pp. 1387–1401.
14. V. V. Bogdanova, V. V. Lakhvich, A. V. Vrublevskiy, A. S. Dmitrichenko. Fire extinguishing effectiveness of liquid chemical compounds in extinguishing Class A fires with spray extinguishing devices. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus / Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2008, no. 1, pp. 35–41 (in Russian).
15. E. V. Arinushkina. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Chemical soil analysis guide]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 1970. 488 p. (in Russian).
16. Z. Marchenko. *Fotometricheskoye opredeleniye elementov* [Photometric determination of elements]. Moscow, Mir Publ., 1971. 501 p. (in Russian).
17. M. M. Tikhonov. The fire-retardant composition based on rigid sprayed polyurethane foam. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya / Emergencies: Prevention and Elimination*, 2013, no. 1(33), pp. 50–60 (in Russian).
18. D. Allan, J. Daly, J. J. Ligat. Thermal volatilisation analysis of TDI-based flexible polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98, no. 2, pp. 535–541. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.12.002.
19. Reshetnikov S. M., Shilyaev A. V., Zenitova L. A. Thermal decomposition of polyurethane foams with flame retardants. In: *Polimernyye materialy ponizhennoy goryuchesti. Trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Low Combustibility Polymeric Materials. Proceedings of VI International Conference]. Vologda, Vologda State Technical University, 2011, pp. 23–27 (in Russian).
20. A. König, E. Kroke. Flame retardancy working mechanism of methyl-DOPO and MPPP in flexible polyurethane foam. *Fire and Materials*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1002/fam.1077.
21. C. Jiao, H. Wang, Z. Zhang, X. Chen. Preparation and properties of an efficient smoke suppressant and flame-retardant agent for thermolastic polyurethane. *Polymers for Advanced Technologies*, 2017, vol. 28, no. 12, pp. 1690–1698. DOI: 10.1002/pat.4041.

22. V. V. Bogdanova, O. I. Kobets, O. N. Buraja. Directional regulation of the fire-protective and extinguish efficiency of N–P-containing fire retardants in synthetic and natural polymers. *Gorenie i vzryv (Moskva) / Combustion and Explosion*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 106–115 (in Russian). DOI: 10.30826/CE19120214.
23. Bogdanova V. V., Tikhonov M. M. Effect on thermal retardants and flame retardant properties of rigid polyurethane foam. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki / Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2013, no. 8(145), pp. 49–53 (in Russian).
24. V. V. Bogdanova, O. I. Kobets, M. M. Tikhonov. Factors that have a dominant effect on the cessation of combustion of natural and synthetic materials. In: *Polimernyye materialy ponizhennoy goryuchesti. Trudy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii* [Low Combustibility Polymeric Materials. Proceedings of VIII International Conference]. Republic of Kazakhstan, Almaty, 5–10 June 2017. Kokshetau, Kokshetau Technical Institute, Committee of Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, 2017, pp. 88–91 (in Russian).
25. V. V. Bogdanova, M. M. Tikhonov. Research of performance and fireproof properties of condensed polyurethane foams. *Vestsi Natsyynalнай akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk / Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 2013, no. 1, pp. 24–28 (in Russian).
26. M. M. Tikhonov, V. V. Bogdanova, O. N. Buraya. Knapsack installation for delivery of slow-burning polyurethane foam. Patent BY, no. 10112, publ. date 30 June 2014, Bull. No. 3(98) (in Russian).
27. V. V. Bogdanova, M. M. Tikhonov, A. M. Mamedov. Fast-curing polymer foams for the limit of spread and extinguishing of fires. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus / Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2016, no. 2(24), pp. 4–9 (in Russian).
28. M. M. Tikhonov, V. V. Bogdanova. Refractory polyurethane foam as a fire extinguishing agent. In: *Polimernyye kompozity i tribologiya (Polikomtrib–2017). Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Polymer Composites and Tribology (Polycomtrib–2017). Abstracts of International Scientific and Technical Conference]. Republic of Belarus, Gomel, 27–30 June 2017. Gomel, IMMS NAN Belarus Publ., 2017, p. 75 (in Russian).
29. V. V. Bogdanova, M. M. Tikhonov, A. M. Mamedov. Polymeric fire extinguishing agent for extinguishing fires in live electrical installations. *Stroitelstvo: novyye tekhnologii — novoye oborudovaniye / Construction: new technologies — new equipment*, 2017, no. 12, pp. 60–66 (in Russian).

Поступила 30.08.2019, после доработки 20.09.2019;
принята к публикации 04.10.2019

Received 30 August 2019; Received in revised form 20 September 2019;
Accepted 4 October 2019

Информация об авторах

БОГДАНОВА Валентина Владимировна, д-р хим. наук, профессор, заведующая лабораторией огнетушащих материалов, Учреждение Белорусского государственного университета “Научно-исследовательский институт физико-химических проблем”, г. Минск, Республика Беларусь; Author ID: 7005614283; ORCID: 0000-0002-8557-9925; e-mail: bogdanova@bsu.by

БУРАЯ Оксана Николаевна, научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов, Учреждение Белорусского государственного университета “Научно-исследовательский институт физико-химических проблем”, г. Минск, Республика Беларусь; ORCID: 0000-0002-6241-1281

ТИХОНОВ Максим Михайлович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры гражданской защиты, Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь; ORCID: 0000-0001-7631-8750; e-mail: timax1978@gmail.com

Information about the authors

Valentina V. BOGDANOVA, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Extinguishing Materials Laboratory, Institution of the Belarusian State University “Research Institute of Physical and Chemical Problems”, Minsk, Republic of Belarus; Author ID: 7005614283; ORCID: 0000-0002-8557-9925; e-mail: bogdanova@bsu.by

Oksana N. BURAYA, Researcher, Extinguishing Materials Laboratory, Institution of the Belarusian State University “Research Institute of Physical and Chemical Problems”, Minsk, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0002-6241-1281

Maxim M. TIKHONOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Civil Protection Department, University of Civil Protection, Ministry of Emergency Situations of Belarus, Minsk, Republic of Belarus; ORCID: 0000-0001-7631-8750; e-mail: timax1978@gmail.com