

**СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ
И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**
**SYNTHESIS AND PROCESSING OF POLYMERS
AND POLYMERIC COMPOSITES**

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-2-109-122>

УДК 678.021



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**Проектирование структуры и составов стойких
к горению полимерных композиционных материалов
с наполнителями-антипиренами на основе гидроксида магния**

К.А. Брехова[✉], И.Д. Симонов-Емельянов, А.А. Пыхтин

*МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий
им. М. В. Ломоносова), Москва, 119571 Россия*

[✉] Автор для переписки, e-mail: kr-otaku@mail.ru

Аннотация

Цели. Установить фундаментальные закономерности для проектирования составов дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДНПКМ) с разными обобщенными и приведенными параметрами и типами дисперсной структуры с высокой стойкостью к горению, а также разработать алгоритм создания негорючих полимерных композитов с наполнителями-антипиренами.

Методы. Оценку формы, размера и распределения частиц по размерам для наполнителей-антипиренов всех марок определяли на сканирующем электронном микроскопе и методом лазерной дифракции. Согласно представленной классификации ДНПКМ по структурному принципу были получены стандартные образцы брусков для определения кислородного индекса (КИ) и категории стойкости к горению.

Результаты. Установлено, что для структуры ДНПКМ типа СНС-2 (средне-наполненная система) и ВНС (высоконаполненная система) при обобщенном параметре $\Theta \leq 0.40$ об. д. достигается максимальная стойкость к горению (категория ПВ-0), а значение КИ возрастает в 2 раза (до ~40%) относительно полимерной матрицы.

Выводы. Показано, что для получения стойких к горению ДНПКМ (КИ = 40%, категория ПВ-0) на основе сэвилена с КИ = 20% и гидроксида магния (брусита), количество выделяющихся паров воды должно составлять не менее ~250 мл/г при разложении наполнителя-антипирена, а коксовый остаток ~32%. Представлен алгоритм расчета составов, обобщенных параметров и создания ДНПКМ с заданным типом дисперсной структуры и высокой стойкостью к горению.

Ключевые слова: композиционные материалы, дисперсная структура, кислородный индекс, стойкость к горению, кабельная композиция, сэвилен, минеральные антипирены


Для цитирования: Брехова К.А., Симонов-Емельянов И.Д., Пыхтин А.А. Проектирование структуры и составов стойких к горению полимерных композиционных материалов с наполнителями-антипиренами на основе гидроксида магния. *Тонкие химические технологии.* 2023;18(2):109–122. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-2-109-122>

RESEARCH ARTICLE

Projection of structure and compositions of resistance to burning polymer composite materials with flame retardants based on magnesium hydroxide

Kristina A. Brekhova , Igor D. Simonov-Emel'yanov, Alexander A. Pykhtin

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

 Corresponding author, e-mail: kr-otaku@mail.ru

Abstract

Objectives. To identify general principles for the design of dispersed-filled polymer composite materials (DFPCMs) with different generalized and reduced parameters, as well as types of disperse structure with high fire resistance; to develop an algorithm for the creation of non-combustible polymer composites with flame-retardant fillers.

Methods. Scanning electron microscopy and laser diffraction were used to assess the shape, size, and particle size distribution of flame retardants. According to the presented classification of DFPCMs by structural principle, standard bar samples were obtained to determine the oxygen index (OI) and the fire resistance category.

Results. For the MFS-2 (medium filled system) and HFS (high filled system) structure types, the maximum resistance to burning (category V-0) is achieved with a generalized parameter of $\Theta \leq 0.40$ volume fractions; the OI value increases in 2 times (up to ~40%) in relation to the polymer matrix.

Conclusions. In order to obtain a flame retardant DFPCMs (OI = 40%, category V-0) based on ethylene vinyl acetate with OI = 20% and magnesium hydroxide (brucite), the amount of water vapor released during the decomposition of the flame-retardant filler should be at least ~250 mL/g with a coke residue ~32%. A developed algorithm for calculating compositions and generalized parameters for the creation of DFPCMs having a predetermined type of disperse structure and high resistance to burning is presented.

Keywords: composite materials, disperse structure, oxygen index, resistance to burning, cable composition, EVA, mineral flame retardants

For citation: Brekhova K.A., Simonov-Emel'yanov I.D., Pykhtin A.A. Projection of structure and compositions of resistance to burning polymer composite materials with flame retardants based on magnesium hydroxide. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2023;18(2):109–122 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-2-109-122>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач практического материаловедения является создание негорючих полимерных и полимерных композиционных материалов (ПКМ) с повышенной стойкостью к горению и низкой токсичностью выделяемых при горении газообразных веществ.

Широкое применение дисперсно-наполненных ПКМ (ДНПКМ) в промышленности обусловлено в том числе большим количеством исследований веществ-антипиренов разной химической природы, благодаря которым были сформулированы конкретные условия для получения стойких к горению материалов со сниженной пожароопасностью [1–5].

Активное использование в качестве антипиренов получили галогенсодержащие вещества, которые при нагревании разлагаются с выделением атома галогена и подавляют процесс горения. Однако токсичность продуктов горения и отходов производства галогенсодержащих полимерных композиций, существенно загрязняющих окружающую среду, ограничивает их применение [6–11].

В качестве безгалогенных наполнителей-антипиренов наиболее востребованными оказались минеральные порошкообразные наполнители на основе гидроксидов металлов алюминия (Al), магния (Mg) и кальция (Ca), которые при разложении образуют пары воды. При этом эндотермическая реакция разложения наполнителя с выделением воды способствует охлаждению, изолированию доступа кислорода в зону горения и уменьшению газообмена на поверхности материала, а также снижению дымообразования [12]. Для получения стойких к горению ДНПКМ количество

минерального наполнителя-антипирена в них должно составлять по данным ряда работ [11–13] не менее ~45–60 мас. % (22–30 об. % при плотности ~2.5 г/см³).

Максимальное содержание φ_{\max} дисперсного наполнителя-антипирена, которое практически можно ввести в ПКМ на матрице любой природы, зависит от максимальной упаковки ($k_{\text{уп}}$, φ_m), размера (d), формы (k_c), фракционного состава и распределения частиц в объеме полимерной матрицы (ПМ).

Ниже приведены обобщенные значения максимального содержания (φ_m , об. д.) твердых дисперсных наполнителей с разными размерами частиц в ДНПКМ, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными [14]:

- наночастицы размером 1–100 нм — $\varphi_{\max} \approx 0.05–0.20$ об. д.
- ультрадисперсные размером 0.1–1.0 мкм — $\varphi_{\max} \approx 0.20–0.255$ об. д.
- субмикрочастицы размером 1.0–3.0 мкм — $\varphi_{\max} \approx 0.255–0.35$ об. д.
- микрочастицы размером 3–10 мкм — $\varphi_{\max} \approx 0.35–0.45$ об. д.
- макрочастицы размером 10–40 мкм — $\varphi_{\max} \approx 0.45–0.62$ об. д.
- крупные частицы размером более 50 мкм — $\varphi_{\max} \approx 0.62–0.64$ об. д.

Анализ приведенных данных показал, что для создания стойких к горению ДНПКМ можно использовать только крупные и макрочастицы наполнителей-антипиренов с размером более ~10 мкм или их смеси с наночастицами и микрочастицами [14]. При использовании частиц нано-, ультрадисперсных и субмикрочастиц необходимо применять

высокоэффективные диспергаторы, которые способствуют повышению параметра ϕ_m и позволяют вводить антипирен в требуемом количестве (до ~50–60 мас. %).

К сожалению, данных об упаковке и максимальном содержании дисперсных наполнителей-антипиренов в ДНПКМ в научно-технической литературе практически не приводится и судить о структурообразовании в таких системах не представляется возможным.

Разработанные в последние годы новые модели, классификации и расчеты составов ДНПКМ с использованием обобщенных и приведенных параметров дисперсной структуры позволяют связать параметры и тип дисперсной структуры (разбавленные – РС, низко-наполненные – ННС, средне-наполненные – СНС, до предела текучести – СНС-1, с пределом текучести – СНС-2 и высоконаполненные – ВНС) с комплексом реологических, физико-механических, электрофизических, теплофизических и оптических характеристик [14], однако данные о стойкости к горению отсутствуют.

В работе [15] авторами впервые были рассмотрены вопросы воспламеняемости наливных полов из ДНПКМ с инертным наполнителем на основе диоксида кремния с диаметром 500 мкм и 160 мкм и приведена связь поверхностной плотности теплового потока (q) с обобщенными параметрами и типом дисперсной структуры.

Целью настоящей работы является установление фундаментальных закономерностей для проектирования составов ДНПКМ с разными обобщенными и приведенными параметрами и типами дисперсной структуры с высокой стойкостью к горению, а также разработка алгоритма создания негорючих полимерных композитов с наполнителями-антипиренами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве примера для исследования использовали ДНПКМ для кабельной изоляции на основе сополимера этилена с винилацетатом – сэвилен марки 11306-075 (СЭВА), с показателем текучести расплава 8 г/10 мин (ПАО «Казаньоргсинтез», Россия), и наполнители-антипирены из минерала брусита марки ЭкоПирен® (ЭП) на основе гидроксида магния $Mg(OH)_2$ (ООО «РГХО», Россия).

Форму, размер и распределение частиц по размерам для наполнителей-антипиренов всех марок определяли на сканирующем электронном микроскопе фирмы *Hosokawa-Alpine* (Германия) и с помощью лазерного анализатора *Malvern Mastersizer 2000* (*Malvern Panalytical*, Великобритания).

В табл. 1 приведены основные характеристики дисперсных наполнителей-антипиренов (бруситов) различных марок ЭкоПирен®.

На рис. 1 показана структура дисперсного порошка наполнителя-антипирена марки ЭкоПирен®.

Как видно из рис. 1, частицы гидроксида магния обладают чешуйчатым строением с коэффициентом формы $k_c \approx 5$ [14]. При изучении микрофотографии (рис. 1) не удается определить коэффициент формы частиц антипирена с необходимой точностью, поскольку их форма зачастую отлична от пластинчатой. Исследованные дисперсные наполнители-антипирены марки ЭкоПирен® характеризуются достаточно широким распределением частиц по размерам. Форму, размер, распределение частиц по размерам и максимальное содержание наполнителя-антипирена в ПМ при построении структуры ДНПКМ учитывает параметр ϕ_{max} (об. д.), который можно определить с помощью специальных экспериментальных методик [16].

Таблица 1. Характеристики наполнителей-антипиренов на основе гидроксида магния (брусита) разных марок и различными размерами частиц

Table 1. Characteristics of flame retardants based on magnesium hydroxide (brucite) of various EcoPiren® (EP) grades and particle sizes

Марка наполнителя-антипирена Flame-retardant filler	Интервал изменения размера частиц, мкм Particle size change interval, μm	Средний диаметр частиц d_{cp} , мкм Average particle diameter d_{av} , μm	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /г Specific surface area S_s , м ² /g
ЭП 2СА / EP 2SA	0.6–5.0	2.5	3.50
ЭП 3.5 / EP 3.5	1–10	5.0	2.63
ЭП 5.5 / EP 5.5	1–9	10.0	2.06
ЭП 10R / EP 10R	2–47	24.0	1.60
ЭП 20R / EP 20R	2–89	45.0	1.23

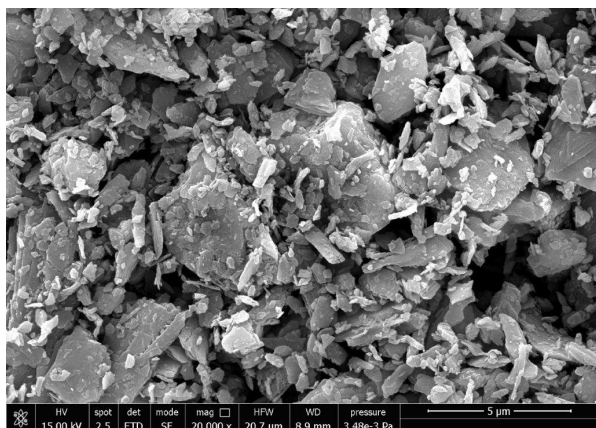


Рис. 1. Структура частиц наполнителя-антипирена марки ЭП 3.5.

Fig. 1. Structure of the particles of the EP 3.5 flame-retardant filler.

Значение параметра φ_{\max} для всех марок исследованных наполнителей-антипиренов (бруситов) ЭкоПирен® приведены в табл. 2.

Из приведенных данных следует, что для всех исследованных наполнителей-антипиренов определять параметр φ_{\max} по насыпной плотности не корректно.

Максимальное содержание наполнителя-антипирена в ДНПКМ ($\varphi_{\max} \sim 0.62$ об. д.) достигается для макрочастиц – марок ЭП-10R и ЭП-20R с размером частиц 25 и 45 мкм соответственно. С уменьшением размера частиц до 2.5 мкм φ_{\max} уменьшается до 0.25 об. д. (ЭП 2СА).

Проектирование дисперсной структуры разных типов и с различными обобщенными параметрами, а также составов ДНПКМ на основе СЭВА и

наполнителей-антипиренов разных марок ЭкоПирен® проводили согласно разработанному ранее алгоритму [14].

Содержание дисперсного наполнителя-антипирена (φ_n) с известным параметром φ_{\max} , которое обеспечивает формирование в ДНПКМ заданного типа структуры (классификация по обобщенному параметру Θ), рассчитывали по формуле (1) [14]:

$$\varphi_n = (1 - \Theta) \times \varphi_{\max}, \text{ об. д.} \quad (1)$$

где Θ – доля ПМ для формирования прослоек между частицами наполнителя в ДНПКМ.

На рис. 2 представлены зависимости $\varphi_n = f(\Theta)$ для проектирования составов ДНПКМ с заданным типом дисперсной структуры на основе СЭВА и наполнителей-антипиренов разных марок ЭкоПирен®.

Представленные данные по составам ДНПКМ показывают, что при использовании наполнителей-антипиренов с размером частиц 2.5–10 мкм (марки ЭП 2СА с $\varphi_{\max} = 0.25$ об. д., ЭП 3.5 с $\varphi_{\max} = 0.35$ об. д. и ЭП 5.5 с $\varphi_{\max} = 0.43$ об. д.) практически не удается ввести достаточное количество дисперсного наполнителя (до ~60 мас. %) для получения стойких к горению материалов [14].

В работе [17] было показано, что количество выделяющихся паров воды из наполнителя-антипирена (брусита) зависит от диаметра частиц и достигает своего максимального значения ($V_{\text{H}_2\text{O}} \sim 430$ мл/г) при диаметре частиц более 10 мкм.

Таблица 2. Значения φ_{\max} для дисперсных порошков наполнителей-антипиренов различных марок ЭкоПирен®
Table 2. φ_{\max} values for dispersed powders of flame-retardant fillers of various EP grades

№	Марка наполнителя-антипирена Flame-retardant filler	Диаметр частиц d_{cp} , мкм Particle diameter d_{av} , μm	φ_{\max} , об. д. φ_{\max} , vol fract.			
			По маслосемкости By oil capacity	По кривой уплотнения By the sealing graph	По трем концентрациям By three concentrations	По насыпной плотности By bulk density
1	ЭП 2СА / EP 2SA	2.5	0.27	0.24	0.23	0.157
2	ЭП 3.5 / EP 3.5	5.0	0.36	0.34	0.35	0.168
3	ЭП 5.5 / EP 5.5	10.0	0.47	0.43	0.42	0.195
4	ЭП 10R / EP 10R	25.0	0.61	0.6	0.59	0.231
5	ЭП 20R / EP 20R	45.0	0.63	0.62	0.61	0.291

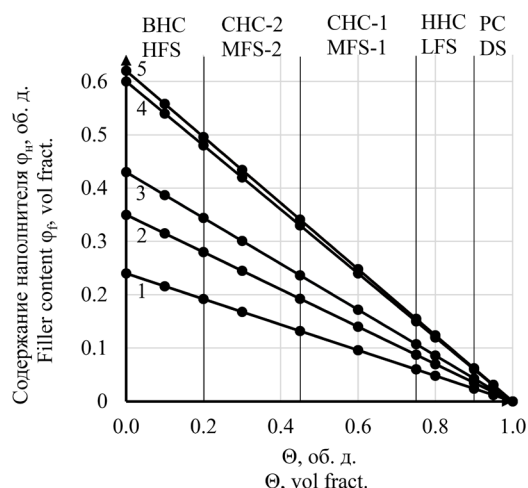


Рис. 2. Зависимость содержания наполнителя-антипирена (φ_f) в ДНПКМ от обобщенного параметра Θ для различных марок ЭкоПирен®:

- 1 – ЭП 2СА ($\varphi_{\max} = 0.25$), 2 – ЭП 3.5 ($\varphi_{\max} = 0.35$),
 3 – ЭП 5.5 ($\varphi_{\max} = 0.43$), 4 – ЭП 10R ($\varphi_{\max} = 0.60$)
 и 5 – ЭП 20R ($\varphi_{\max} = 0.62$).

Fig. 2. Dependence of the flame-retardant filler content (φ_f) in DFPCM on the generalized parameter Θ for various EP grades:

- 1 – EP 2SA ($\varphi_{\max} = 0.25$); 2 – EP 3.5 ($\varphi_{\max} = 0.35$);
 3 – EP 5.5 ($\varphi_{\max} = 0.43$); 4 – EP 10R ($\varphi_{\max} = 0.60$);
 5 – EP 20R ($\varphi_{\max} = 0.62$).

Учитывая максимальную упаковку (φ_{\max}) и количество выделяющихся паров воды при разложении, для исследования влияния типа и параметров структуры и создания стойких к горению ДНПКМ был использован наполнитель-антипирен марки ЭП 10R ($d_{\text{cp}} = 25$ мкм и $\varphi_{\max} = 0.60$ об. д.).

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие составы ДНПКМ с наполнителем-антипиреном марки ЭП 10R ($d_{\text{cp}} = 25$ мкм, $\varphi_{\max} = 0.60$ об. д.) и разными типами структур: PC с $\Theta = 0.95$ об. д., $\varphi_f = 0.03$ об. д.; HHC с $\Theta = 0.75$ об. д., $\varphi_f = 0.15$ об. д.; CHC-1 с $\Theta = 0.60$ об. д., $\varphi_f = 0.24$ об. д. и с $\Theta = 0.50$ об. д., $\varphi_f = 0.30$ об. д.; CHC-2 с $\Theta = 0.45$ об. д., $\varphi_f = 0.33$ об. д. и с $\Theta = 0.30$ об. д., $\varphi_f = 0.42$ об. д.; BHC с $\Theta = 0.20$ об. д., $\varphi_f = 0.48$ об. д.

ДНПКМ на основе СЭВА и наполнителей-антипиренов марки ЭП 10R с разными типами дисперсной структуры получали смешением исходных компонентов на двухшнековом экструдере

LabTech LZ80/VS (Labtech Engineering, Таиланд), с диаметром шнека 16 мм при 200 °С и скорости вращения шнеков 150 об/мин.

Для определения кислородного индекса (КИ)¹ и категории стойкости к горению (метод Б)² из ДНПКМ с разными типами дисперсной структуры методом литья под давлением получали стандартные образцы в виде бруска.

На термопластавтомате «ARBURG» (Германия) были отлиты образцы в виде стандартных брусков при давлении 50 МПа, температуре расплава 200 °С, температуры формы 30 °С, времени выдержки под давлением 5 с, времени охлаждения 24 с.

Испытания ДНПКМ с различными типами дисперсной структуры на стойкость к горению и определение кислородного индекса были проведены в Центре научно-технического отделения № 3 исследований и испытаний АО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова» (Россия).

При определении стойкости к горению ДНПКМ фиксировали время горения и тления вертикально закрепленного образца-бруска, и по результатам испытаний материалу была присвоена категория стойкости к горению, параметры которой приведены в табл. 3.

Наибольшей стойкостью к горению характеризуются ДНПКМ категории ПВ-0. Образцам, которые не соответствуют представленным категориям стойкости к горению, присваивается категория – вне категории (ВН), что соответствует наименьшей стойкости к горению. Для исходной ПМ СЭВА были определены параметры горючести: КИ = 20.5% и категория стойкости к горению – ВН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты по стойкости к горению и параметру КИ для всех исследованных образцов ДНПКМ на основе СЭВА марки 11306-075 с наполнителем-антипиреном марки ЭкоПирен® (ЭП 10R) приведены в табл. 4.

По результатам эксперимента самой высокой категорией стойкости к горению (ПВ-0) обладают ДНПКМ, с содержанием гидроксида магния марки ЭП 10R не менее ~ 0.36 об. д. (~ 0.59 мас. д.), что соответствует типам дисперсной структуры CHC-2 ($\Theta \leq 0.40$ об. д.) и BHC ($\Theta \leq 0.20$ об. д.).

¹ ГОСТ 21793-76. Государственный стандарт союза ССР. Пластмассы. Метод определения кислородного индекса. М.: Государственный комитет стандартов совета министров СССР; 1976. [GOST 21793-76. Gosstandart of the USSR. Plastics. Method for determination of the oxygen index. Moscow: State committee for standards of the council of ministers of the USSR; 1976.]

² ГОСТ 28157-2018. Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Методы определения стойкости к горению. М.: Стандартинформ; 2018. [GOST 28157-2018. Interstate standard. Plastics. Methods for determining the resistance to burning. Moscow: Standartinform; 2018.]

Таблица 3. Критерии категории стойкости к горению ДНПКМ
Table 3. Criteria for the category of resistance to burning DFPCM

Показатели при испытании Test indicators	Категория стойкости к горению Category of resistance to burning		
	ПВ-0 V-0	ПВ-1 V-1	ПВ-2 V-2
Время горения после приложения пламени, не более, с Burning time after application of flame, no more than, s	10	30	30
Суммарное время горения 5 образцов после двукратного приложения пламени, с The total burning time of 5 samples after two-fold application of flame, s	50	250	250
Не горит и не тлеет до зажима Does not burn and smolder before clamping	+	+	+
Воспламенение гигроскопической ваты, находящейся в 300 мм от образца Ignition of hygroscopic cotton wool located 300 mm from the sample	–	–	+
Горение и тление образца после второго удаления пламени, не более, с Burning and smoldering of the sample after the second removal of the flame, no more than, s	30	60	60

Примечание: «+» – показатель достигнут; «–» – показать не достигается.

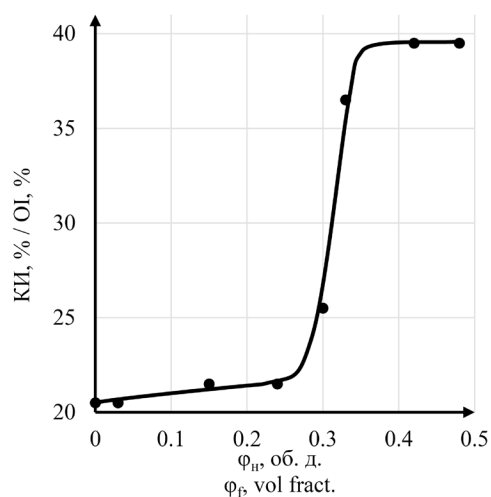
Note: “+” – the indicator is achieved; “–” – the indicator is not achieved.

Таблица 4. Тип структуры, обобщенные параметры, составы ДНПКМ на основе СЭВА + ЭП 10R и их стойкость к горению
Table 4. Type of structure, generalized parameters, compositions of DFPCM based on EVA + EP 10R and their resistance to burning

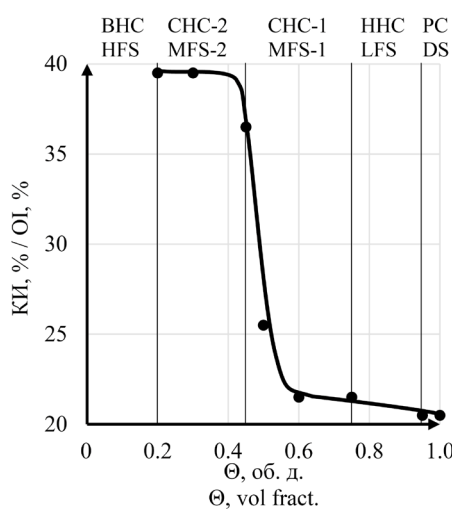
Состав ДНПКМ DFPCM composition	Тип структуры Type of structure	Θ, об. д. Θ, vol fract.	Содержание ЭП 10R (φ _n) EP 10R (φ _p) content		Категория стойкости к горению, ГОСТ 28157-2018 Category of resistance to burning GOST 28157-2018
			об. д. vol fract.	мас. д. wt fract.	
СЭВА 11306-075 EVA 11306-075	–	1.0	–		ВН (–)
СЭВА 11306-075 + ЭП 10R EVA 11306-075 + EP 10R	PC (DS)	0.95	0.03	0.07	ВН (–)
	ННС (LFS)	0.75	0.15	0.31	ВН (–)
	СНС-1 (MFS-1)	0.60	0.24	0.45	ПВ-2 (V-2)
		0.50	0.30	0.52	ПВ-2 (V-2)
	СНС-2 (MFS-2)	0.45	0.33	0.56	ПВ-1 (V-1)
		0.40	0.36	0.59	ПВ-0 (V-0)
		0.30	0.42	0.65	ПВ-0 (V-0)
	ВНС (HFS)	0.20	0.48	0.70	ПВ-0 (V-0)

Полимерные материалы с указанной категорией стойкости к горению допущены для изготовления электротехнических изделий в кабельной промышленности [18]. Согласно данным работы [18] и диссертации А.А. Фрика³, ДНПКМ, использующиеся в качестве электроизоляционных материалов, должны обладать КИ не менее ~32%.

На рис. 3 приведена зависимость КИ = $f(\varphi_n)$, а также впервые представлена зависимость КИ для ДНПКМ от обобщенного параметра Θ



(a)



(б)

Рис. 3. Зависимость КИ для ДНПКМ на основе СЭВА: (а) от содержания наполнителя-антипирена марки ЭП 10R, (б) от обобщенного параметра Θ .

Fig. 3. OI dependence for DFPCM based on EVA: (a) on the EP 10R flame-retardant filler content, (b) on the generalized parameter Θ .

³ Фрик А.А. *Исследование и разработка пожаробезопасных кабелей с применением безгалогенных материалов*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИКП; 2016. 20 с. [Frik A.A. *Research and development of fire-resistant cables using halogen-free materials*: Cand. Sci. Thesis. Moscow: VNIIPK; 2016. 20 p. (in Russ.)]

дисперсной структуры, которая позволяет связать тип дисперсной структуры с параметром КИ и стойкостью к горению. Следует отметить, что традиционная зависимость КИ от φ_n не позволяет провести классификацию ДНПКМ по структурному принципу (РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС).

Зависимость КИ = $f(\Theta)$ для ДНПКМ имеет S-образный вид и характерные области, которые соответствуют разным типам дисперсной структуры.

В области 1 значение КИ при введении ЭП 10R в СЭВА увеличивается всего на ~10% и составляет ~22%. Это типы структуры РС, ННС и СНС-1 (до $\Theta \geq 0.60$ об. д.).

В области 2 наблюдается резкий скачок значения КИ с 22 до 37% при формировании ДНПКМ с типом структуры СНС-1 при $\Theta \approx 0.60-0.45$ об. д.

В области 3 КИ достигает своего максимального значения – 40%, что связано с образованием структуры в ДНПКМ типа СНС-2 ($\Theta < 0.40-0.30$ об. д.) и ВНС ($\Theta \leq 0.20$ об. д.) и соответственно увеличением содержания наполнителя-антипирена (брусита).

Таким образом, для ДНПКМ на основе СЭВА с КИ = 20.5% и антипирена марки ЭП 10R можно достичь значения КИ в ~2 раза превышающего значения КИ, характерного для ненаполненной ПМ при создании дисперсной структуры типов СНС-2 и ВНС. При этом максимальное значение $\Theta \approx 0.40$ об. д., содержание наполнителя-антипирена ЭП 10R ≈ 0.36 об. д. (0.59 мас. д.), а КИ $\approx 40\%$ и категория стойкости к горению – ПВ-0.

При КИ $\approx 32\%$ (рекомендация, приведенная в работе [18] и диссертации Фрика (сноска 3)) кабельная изоляция из ДНПКМ на основе СЭВА + ЭП 10R может иметь структуру типа СНС-1 с $\Theta \approx 0.50$ об. д., а содержание наполнителя уменьшится и составит $\varphi_n \approx 0.30$ об. д. (0.52 мас. д.).

Впервые приведены данные о влиянии типа дисперсной структуры на КИ и стойкость к горению для ДНПКМ на основе СЭВА и дисперсного наполнителя-антипирена, что позволяет целенаправленно проектировать составы с заданной стойкостью к горению.

Повышение значения КИ при введении в ПМ СЭВА наполнителя-антипирена марки ЭП 10R происходит в результате разложения гидроксида магния с выделением водяного пара. Пары воды и образование коксового остатка являются основными факторами повышения КИ и стойкости к горению ДНПКМ.

По данным термогравиметрического анализа (ТГА) [17] нами было определено количество выделяющихся паров воды из 1 г наполнителя-антипирена (брусита) марки ЭП 10R при разложении, которое составило ~425 мл/г, а также значение коксового остатка 32%.

На рис. 4 приведены зависимости объема паров воды, выделяющихся при разложении брусита в ДНПКМ от содержания наполнителя-антипирена и обобщенного параметра Θ , который определяет тип дисперсной структуры ДНПКМ.

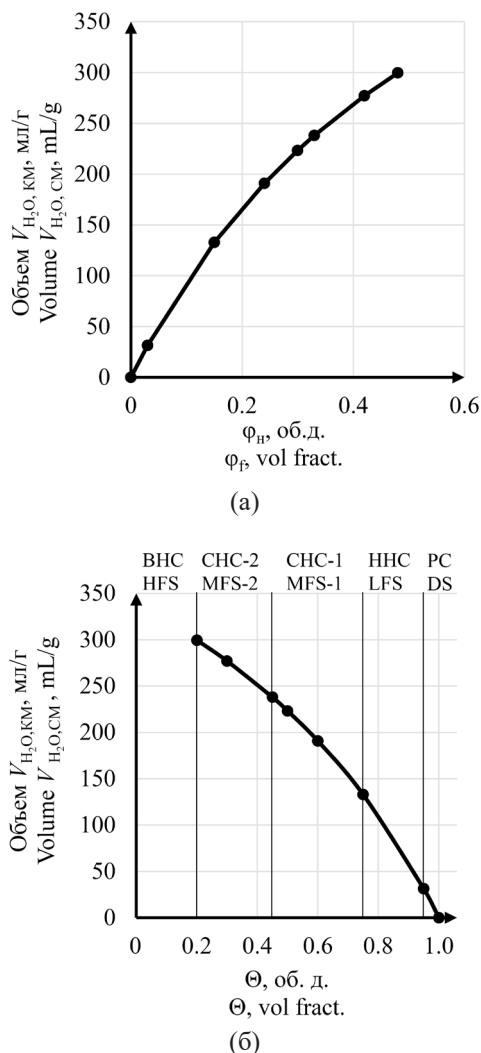


Рис. 4. Зависимость объема паров воды, выделяющихся при разложении брусита в ДНПКМ:

- (а) от содержания наполнителя-антипирена,
- (б) от обобщенного параметра Θ .

Fig. 4. Dependence of the volume of water vapor released during the decomposition of brucite in DNPCM:

- (a) on the content of the flame-retardant filler,
- (b) on the generalized parameter Θ .

Наблюдается общая закономерность: с увеличением содержания наполнителя-антипирена и уменьшением обобщенного параметра Θ возрастает объем паров воды, который зависит от типа структуры ДНПКМ. Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод о том, что чем больше в полимерном композиционном материале антипирена, в ходе реакции разложения которого выделяется вода, тем выше ее содержание в материале при горении.

Так как горение ДНПКМ происходит за счет экзотермической реакции деполимеризации СЭВА, то представляет интерес определить объем водяного пара, приходящегося на 1 г ПМ, необходимого для подавления процесса горения.

На рис. 5 приведены зависимости объема паров воды, выделяющихся при разложении брусита на грамм ПМ ($V_{H_2O, PM}$, мл/г) от содержания наполнителя-антипирена и обобщенного параметра Θ , который определяет тип дисперсной структуры ДНПКМ.

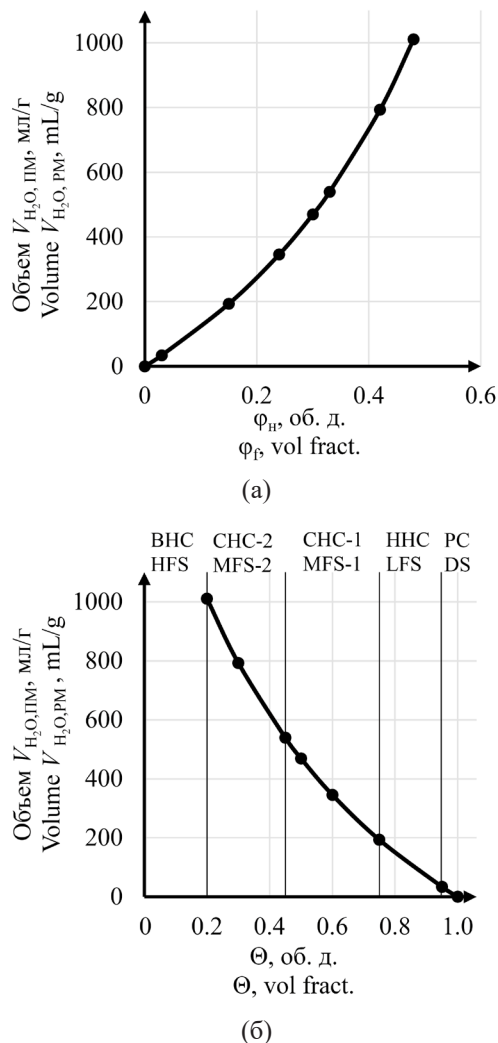


Рис. 5. Зависимость объема паров воды, выделяющихся при разложении брусита на 1 г ПМ:

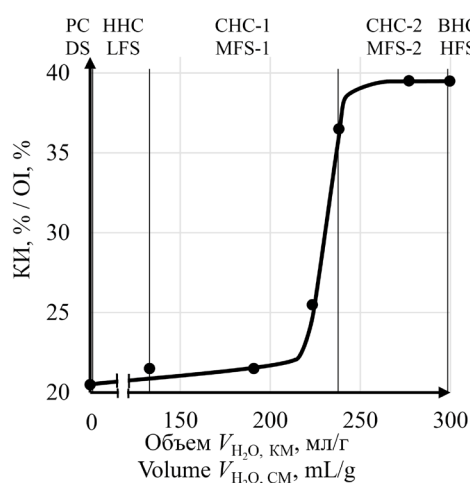
- (а) от содержания наполнителя-антипирена,
- (б) от обобщенного параметра Θ .

Fig. 5. Dependence of the volume of water vapor released during the decomposition of brucite per 1 g of polymer matrix:

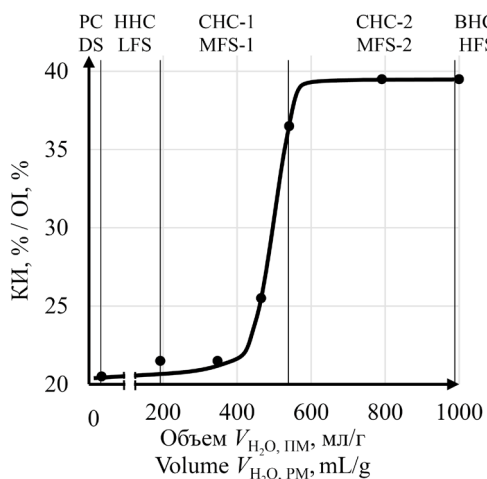
- (a) on the content of the flame-retardant filler,
- (b) on the generalized parameter Θ .

Как видно из полученных данных, для получения ДНПКМ с высоким значением КИ (~40%) и с категорией ПВ-0 необходимо, чтобы содержание паров воды на 1 г ПМ составляло не менее 600 мл/г.

Полученные зависимости впервые позволили связать КИ ДНПКМ с объемом паров воды, выделяющихся при разложении наполнителя-антипирена ЭП 10R и типом дисперсной структуры (рис. 6).



(а)



(б)

Рис. 6. Зависимость КИ для ДНПКМ от объема паров воды, выделяющихся при разложении брусита марки ЭкоПирен®: (а) на 1 г ПКМ, (б) на 1 г ПМ.

Fig. 6. Dependence of the oxygenation index for DFPCM on the volume of water vapor released during the decomposition of EcoPiren® brucite: (a) by 1 g of PCM, (b) by 1 g of the polymer matrix.

Для типа структуры РС, ННС и СНС-1 до $\Theta \geq 0.60$ об. д. КИ для ДНПКМ на основе СЭВА практически не увеличивается (с 20.5 до 22%). Резкое увеличение КИ (в ~2.0 раза) происходит при выделении более 220 мл/г паров воды в области изменения обобщенного параметра Θ от 0.60 до 0.40 об. д., что соответствует переходу структуры типа СНС-1 в СНС-2 и ВНС. Максимальное значение КИ равно 40% для ДНПКМ на основе СЭВА достигается при $\Theta \approx 0.40$ об. д. и выделении паров воды в количестве 250 мл/г и $V_{H_2O, PM} = 600$ мл/г.

Далее с увеличением объема выделяющихся паров воды [более 250 (600) мл/г] значение КИ для ДНПКМ со структурой СНС-2 и ВНС практически остается постоянным.

Таким образом, оптимальное количество паров воды для создания ДНПКМ с высоким значением КИ и стойкостью к горению составляет $V_{H_2O, KM} \approx 250$ мл/г и $V_{H_2O, PM} \approx 600$ мл/г, содержание наполнителя-антипирена 0.36 об. д., тип структуры – СНС-2 и ВНС ($\Theta \leq 0.40$ об. д.).

Для рекомендованного в статье [18] и диссертации Фрика (см. сноску 3) значения КИ $\approx 32\%$, кабельная изоляция из ДНПКМ на основе СЭВА + ЭП 10R может иметь структуру типа СНС-1 с $\Theta \approx 0.47$ об. д., а количество паров воды составлять $V_{H_2O, KM} \approx 230$ мл/г и $V_{H_2O, PM} = 512$ мл/г.

В табл. 5 приведены обобщенные данные по КИ и стойкости к горению, а также характеристики ДНПКМ на основе СЭВА и гидроксида магния марки ЭП 10R ($d_{cp} = 25$ мкм и $\phi_{max} = 0.60$ об. д.) с разными типами дисперсной структуры.

Полученные результаты и новые модельные представления о дисперсной структуре позволяют проектировать тип структуры, составы ДНПКМ с максимальным значением КИ и высокой стойкостью к горению при известном значении ϕ_{max} , коксового остатка и количества паров воды (V_{H_2O}), выделяющейся из 1 г дисперсного наполнителя-антипирена.

В работе [19] показано, что экструзионные и литьевые ДНПКМ хорошо перерабатываются в изделия при выполнении условия $\Theta \approx 0.50-0.60$ об. д. и формировании дисперсной структуры типа СНС-1 (до предела текучести).

Таким образом, для создания высокотехнологичных и стойких к горению экструзионных и литьевых ДНПКМ необходимо создать структуру типа СНС-1 с $\Theta \approx 0.50-0.60$ об. д. и содержанием наполнителя-антипирена не менее 0.36 об. д.

Основная проблема увеличения обобщенного параметра Θ до 0.50–0.60 об. д. при постоянном значении ϕ_n (не менее 0.36 об. д.) связана с созданием нового дисперсного наполнителя-антипирена с заданным фракционным составом, у которого параметр упаковки ϕ_{max} должен достигать значения 0.70–0.75 об. д. (возрастает с 0.60 до 0.75 об. д.). Однако эти вопросы в настоящей статье нами не рассматриваются.

Ниже приводится алгоритм проектирования составов ДНПКМ с использованием наполнителя-антипирена на основе СЭВА (КИ = 20.5%) и гидроксида магния (ЭкоПирен®) с высоким значением КИ и стойкостью к горению.

На основании проведенных исследований и установленных фундаментальных зависимостей можно предложить общий алгоритм для проектирования

Таблица 5. Параметры структуры и стойкость к горению ДНПКМ на основе СЭВА и ЭП 10R ($d_{cp} = 25$ мкм, $\varphi_{max} = 0.60$ об. д.)
Table 5. Structure parameters and resistance to burning DFPCM based on EVA and EP 10R ($d_{av} = 25$ μ m, $\varphi_{max} = 0.60$ vol fract.)

Параметры Parameters	Тип дисперсной структуры ДНПКМ на основе СЭВА + ЭП 10R Types of DFPCM dispersed structure based on EVA + EP 10R								
	PC DF	ННС LFS	СНС-1 MFS-1			СНС-2 MFS-2			ВНС HFS
Θ , об. д. Θ , vol fract.	0.95	0.75	0.60	0.50	0.47	0.45	0.40	0.30	0.20
φ_n , об. д. φ_n , vol fract.	0.03	0.15	0.24	0.30	0.32	0.33	0.36	0.42	0.48
φ_n , мас. д. φ_n , wt fract.	0.07	0.31	0.45	0.52	0.55	0.56	0.59	0.65	0.70
$V_{H_2O, KM}$, мл/г $V_{H_2O, CM}$, mL/g	31.3	132.9	190.8	223.3	230.0	238.0	251.8	277.0	299.9
$V_{H_2O, PM}$, мл/г $V_{H_2O, PM}$, mL/g	33.7	192.6	346.9	465.2	512.2	540.9	614.1	791.4	999.7
КИ, % OI, %	21.5	21.5	21.5	25.5	32	36.5	39.5	40.0	40.0
Категория стойкости к горению Category of resistance to burning	ВН (-)	ВН (-)	ПВ-2 (V-2)	ПВ-2 (V-2)	ПВ-2 (V-2)	ПВ-1 (V-1)	ПВ-0 (V-0)	ПВ-0 (V-0)	ПВ-0 (V-0)

составов и заданного типа структуры ДНПКМ с наполнителями-антипиренами с высоким КИ и стойкостью к горению:

1. Выбор ПМ, определение КИ, стойкости к горению по ГОСТ и исследование методом ТГА.

2. Выбор наполнителя-антипирена, исследование методом дифференциального термического анализа и ТГА и определение основных характеристик: температуры начала разложения (T_n), потерь 10% массы (T_{10}), температуры окончания разложения (T_k), температурного интервала разложения (ΔT), коксового остатка и объема паров воды, выделяющихся из 1 г наполнителя-антипирена (V_{H_2O}).

3. Определение основных характеристик дисперсного наполнителя-антипирена: среднего диаметра частиц (d_{cp}), коэффициента формы частиц (k_e), удельной поверхности частиц ($S_{уд}$), распределения частиц по размерам (гранулометрический состав), плотности и пористости.

4. Экспериментальное определение по известным методикам для наполнителя-антипирена параметра упаковки ($k_{уп}$) и максимального содержания дисперсного наполнителя φ_{max} [17, 18].

5. Расчет значения обобщенного параметра Θ для ДНПКМ при известном значении φ_{max} для наполнителя-антипирена при разном его содержании, при условии $\varphi_n \leq \varphi_{max}$, по формуле (2):

$$\Theta = (\varphi_{max} - f^3 \varphi_n) / \varphi_{max}, \quad (2)$$

где Θ – доля ПМ для формирования прослойки между дисперсными частиц в ДНПКМ;

φ_{max} – максимальное содержание дисперсного наполнителя; φ_n – содержание дисперсного наполнителя; $f^3 = (1 + 2\delta/d)$ – коэффициент, учитывающий отношение толщины граничного слоя (δ) к диаметру (d) дисперсных частиц. Для крупных, макро и микрочастиц коэффициент $f^3 \approx 1$.

6. Классификация ДНПКМ по структурному принципу и определение типа дисперсной структуры ДНПКМ – РС, ННС, СНС-1, СНС-2 и ВНС по значениям обобщенного параметра Θ при разном содержании φ_n .

7. Расчет содержания наполнителя-антипирена ($\varphi_{об.н}$, об. д.) для каждого типа дисперсной структуры ДНПКМ по формуле (3):

$$\varphi_{об.н} = (1 - \Theta) \cdot \varphi_{max}. \quad (3)$$

8. Расчет содержания наполнителя-антипирена в массовых единицах ($\varphi_{мас.н}$, мас. д.) и определение составов для каждого типа дисперсной структуры ДНПКМ по формуле (4):

$$\varphi_{мас.н} = \frac{\varphi_{об.н}}{\varphi_{об.н} \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_n} \right) + \frac{\rho_n}{\rho_n}} \text{ мас. д.}, \quad (4)$$

где ρ_n и ρ_n – плотность наполнителя-антипирена и ПМ.

9. Расчет объема выделяющихся паров воды ($V_{H_2O, KM}$ и $V_{H_2O, PM}$) при разложении наполнителя-антипирена в ДНПКМ с разными типами

структуры и содержанием наполнителя-антипирена по формулам (5) и (6):

$$V_{\text{H}_2\text{O,КМ}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \varphi_{\text{мас. н}}, \quad (5)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O,ПМ}} = V_{\text{H}_2\text{O}} / \varphi_{\text{мас. п}}, \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{мас. п}}$ – содержание ПМ в мас. д.

10. Определение оптимального состава и типа структуры ДНПКМ с высоким значением КИ и стойкости к горению (ПВ-0) при выполнении условий:

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O,КМ}} &\geq 250 \text{ мл/г,} \\ V_{\text{H}_2\text{O,ПМ}} &\geq 600 \text{ мл/г.} \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены фундаментальные зависимости по КИ и стойкости к горению ДНПКМ на основе СЭВА с наполнителями-антипиренами на примере гидроксида магния (брусита) марки ЭкоПирен®, которые позволяют связать построение, тип и параметры дисперсной структуры с основными характеристиками стойкости к горению и КИ.

Показано, что введение гидроксида магния (брусита) в оптимальном количестве в СЭВА позволяет повысить КИ с 20.5 до 40% (~в 2 раза).

Установлено критическое содержание паров воды для максимального повышения значения КИ (до ~40%) для ДНПКМ, которое составляет не менее $V_{\text{H}_2\text{O,КМ}} \approx 250$ мл/г и $V_{\text{H}_2\text{O,ПМ}} \approx 600$ мл/г.

Максимальная стойкость к горению и КИ достигаются для ДНПКМ на основе СЭВА + ЭП 10R при обобщенном параметре $\Theta \leq 0.40$ об. д. для типа структуры СНС-2 и содержания наполнителя-антипирена с $\varphi_{\text{н}} = 0.36$ об. д. (0.59 мас. д.).

Вклад авторов

К.А. Брехова – проведение экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных;

И.Д. Симонов-Емельянов – концепция исследования, обработка экспериментальных данных;

А.А. Пыхтин – корректировка концепции исследования.

Authors' contributions

K.A. Brekhova – conducting experiments, processing experimental data;

I.D. Simonov-Emel'yanov – the research concept, processing experimental data;

A.A. Pykhtin – correction of the research concept.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов В.Ф., Новопольцева О.М., Кочетков В.Г., Лапина А.Г. Основные способы и механизмы повышения огнетеплозащитной стойкости материалов. *Известия Волгоградского государственного технического университета (Известия ВолгГТУ). Серия: Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов.* 2016;(4):46–60.
2. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор). *Труды ВИАМ.* 2022; (113):134–150. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150>

REFERENCES

1. Kablov V.F., Novopoltseva O.M., Kochetkov V.G., Lapina A.G. The main ways and mechanisms to improve fire- and heat resistance of materials. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Izvestiya VolgGTU) = Izvestia VSTU.* 2016;(4):46–60 (in Russ.).
2. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Barbotko S.L. Fire safety of high-temperature carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes (review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM.* 2022;(7):134–150 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150>

3. Барботько С.Л., Боченков М.М., Вольный О.С., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Оценка эффективности антипиренов, перспективных для создания новых полимерных композиционных материалов, предназначенных для авиационной техники. *Труды ВИАМ*. 2021;2(96):20–29. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-2-20-29>
4. Гарашченко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор). *Пожаровзрывобезопасность*. 2019;28(2):9–30. <https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.02.9-30>
5. Буравов Б.А., Бочкарев Е.С., Аль-Хамзави А., Тужиков О.О., Тужиков О.И. Современные тенденции в разработке антипиренов для полимерных композиций. Состав, свойства, применение. *Известия Волгоградского государственного технического университета (Известия ВолгГТУ)*. 2020;12(247):7–24. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-12-247-7-24>
6. Чижов М.А., Хайруллин Р.З. Токсичность продуктов горения полимерных материалов при введении в их состав антипиренов. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(9):144–145.
7. Ломакин С.М., Заиков Г.Е., Микитаев А.К., Кочнев А.М., Стоянов О.В., Шкодич В.Ф., Наумов С.В. Замедлители горения для полимеров. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012;15(7):71–86.
8. Агафонова А.И., Коваль Е.О., Майер Э.А. Композиции полипропилена пониженной горючести. *Известия Томского политехнического университета*. 2011;318(3):136–140.
9. Альмеева Л.Р., Тангатаров А.Ф. Хлорированные парафины как антипирены. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2015;1–1(6):50–53.
10. Зарипов И.И., Вихарева. И.Н., Буйлова Е.А., Берестова Т.В., Мазитова А.К. Добавки для понижения горючести полимеров. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(2):156–161. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161>
11. Фомин Д.Л., Мазина Л.А., Дебердеев Т.Р., Ахметчин Э.С., Улитин Н.В. Пожаробезопасные свойства ПВХ-композиций при использовании некоторых бромсодержащих антипиренов. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012;15(18):104–106.
12. Hornsby P.R., Watson C.L. A study of the mechanism of flame retardance and smoke suppression in polymers filled with magnesium hydroxide. *Polym. Degrad. Stab.* 1990;30(1):73–87. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(90\)90118-Q](https://doi.org/10.1016/0141-3910(90)90118-Q)
13. Сватиков А.Ю., Симонов-Емельянов И.Д. Термическая стабильность полимерных кабельных композиций с наполнителем-антипиреном. *Тонкие химические технологии*. 2018;13(6):35–41. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-6-35-41>
14. Симонов-Емельянов И.Д. Классификация дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов по типу решеток и структурному принципу. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020;(1):8–13. <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2020-0-1-8-13>
15. Константинова Н.И., Симонов-Емельянов И.Д., Шебеко А.Ю., Кривошапкина О.В., Смирнов Н.В. Структура и воспламеняемость полимерных композиционных покрытий для наливных полов. *Пластические массы*. 2019;(3–4):50–54. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-50-54>
3. Barbotko S.L., Bochenkov M.M., Volnyi O.S., Korobeinichev O.P., Shmakov A.G. Evaluation of the effectiveness of the fire retardants, promising for the creation of new polymer composite materials intended for aviation techniques. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2021;2(96):20–29 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-2-20-29>
4. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kulkov A.A. Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2019;28(2):9–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.02.9-30>
5. Buravov B.A., Bochkarev E.S., Al'-Khamzavi A., Tuzhikov O.O., Tuzhikov O.I. Modern trends in the development of antipyrone for polymer compositions. Composition, properties, application. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Izvestiya VolgGTU) = Izvestia VSTU*. 2020;12(247):7–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-12-247-7-24>
6. Chizhov M.A., Khairullin R.Z. Toxicity of combustion products of polymeric materials with the introduction of flame retardants into their composition. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014;17(9):144–145 (in Russ.).
7. Lomakin S.M., Zaikov G.E., Mikitaev A.K., Kochnev A.M., Stoyanov O.V., Shkodich V.F., Naumov S.V. Flame retardants for polymers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012;15(7):71–86 (in Russ.).
8. Agafonova A.I., Koval' E.O., Maier E.A. Low flammability polypropylene compositions. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011;318(3):136–140 (in Russ.).
9. Al'meeva L.R., Tangatarov A.F. Chlorinated paraffins as flame retardants. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsii*. 2015;1–1(6):50–53 (in Russ.).
10. Zaripov I.I., Vikhareva. I.N., Builova E.A., Berestova T.V., Mazitova A.K. Additives to reduce the flammability of polymers. *Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2022;14(2):156–161 (in Russ.). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161>
11. Fomin D.L., Mazina L.A., Deberdeev T.R., Akhmetchin E.S., Ulitin N.V. Fireproof properties of PVC compositions when using some bromine-containing flame retardants. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012;15(18):104–106 (in Russ.).
12. Hornsby P.R., Watson C.L. A study of the mechanism of flame retardance and smoke suppression in polymers filled with magnesium hydroxide. *Polym. Degrad. Stab.* 1990;30(1):73–87. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(90\)90118-Q](https://doi.org/10.1016/0141-3910(90)90118-Q)
13. Svatikov A.Yu., Simonov-Emelyanov I.D. The thermal stability of polymer cable compounds with a flame-retarding filler. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2018;13(6):35–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-6-35-41>
14. Simonov-Emelyanov I.D. Classification of dispersion-filled polymer composite materials relative to lattice types and structural principle. *Klei. Germetiki. Tekhnologii = Adhesives. Sealants. Technologies*. 2020;(1):8–13 (in Russ.). <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2020-0-1-8-13>

16. Симонов-Емельянов И.Д., Харламова К.И., Дергунова Е.Р. Маслосмолкость дисперсных порошков и определение максимального содержания наполнителей в полимерных композиционных материалах. *Клеи. Герметики. Технологии*. 2022;(3):18–24. <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2022-0-3-18-24>

17. Брехова К.А., Симонов-Емельянов И.Д. Наполнители-антипирены на основе гидроксида магния для полимерных материалов и влияние размера частиц на процесс дегидратации при высоких температурах. *Пластические массы*. 2022;(7–8):44–47. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2022-7-8-44-47>

18. Филина А.В., Комаристый А.С. Использование электроизоляционных материалов при изготовлении оболочек кабельных изделий и проводов. В сб.: *Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее: сборник трудов 2-й Всероссийской научной конференции*. Курск: Университетская книга; 2019. С. 205–208.

19. Кречетов Д.Д., Ковалева А.Н., Симонов-Емельянов И.Д. Реологические свойства дисперсно-наполненных термопластов с разным типом структур при температурах переработки. *Пластические массы*. 2020;(9–10):19–22. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-9-10-19-22>

15. Konstantinova N.I., Simonov-Emelyanov I.D., Shebeko A.Yu, Krivoshapkina O.V., Smirnov N.V. The structure and inflammability of the polymer composite coatings for bulk floors. *Plasticheskie Massy*. 2019;(3–4):50–54 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-50-54>

16. Simonov-Emelyanov I.D., Kharlamova K.I., Dergunova E.R. Oil absorption of dispersed fillers and determination of maximum fillers fraction in polymer composite materials. *Klei. Germetiki. Tekhnologii = Adhesives. Sealants. Technologies*. 2022;(3):18–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2022-0-3-18-24>

17. Brekhova K.A., Simonov-Emelyanov I.D. FMagnesium hydroxide-based flame-retardant fillers for polymer materials and the effect of particle size on the dehydration process at high temperatures. *Plasticheskie Massy*. 2022;(7–8):44–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2022-7-8-44-47>

18. Filina A.V., Komaristyi A.S. The use of electrical insulating materials in the manufacture of sheaths of cable products and wires. In: *Problems and Prospects of Russia's Development: A Youth Look into the Future: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific Conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2019. P. 205–208 (in Russ.).

19. Krechetov D.D., Kovaleva A.N., Simonov-Emelyanov I.D. Rheological properties of dispersion-filled thermoplastics with different types of structures at various processing temperatures. *Plasticheskie Massy*. 2020;(9–10):19–22 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-9-10-19-22>

Об авторах:

Брехова Кристина Алексеевна, аспирант кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: kr-otaku@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3340-2490>

Симонов-Емельянов Игорь Дмитриевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: igor.simonov1412@gmail.com. Scopus Author ID 6603181099, SPIN-код РИНЦ 7313-3844, <https://orcid.org/0000-0002-6611-5746>

Пыхтин Александр Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: nanocntpolimer@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 2557-0070, <https://orcid.org/0000-0002-1988-2301>

About the authors:

Kristina A. Brekhova, Postgraduate Student, Department of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: kr-otaku@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3340-2490>

Igor D. Simonov-Emel'yanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: igor.simonov1412@gmail.com. Scopus Author ID 6603181099, RSCI SPIN-code 7313-3844, <https://orcid.org/0000-0002-6611-5746>

Alexander A. Pykhtin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Chemistry and Technology of Plastics and Polymer Composites Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: nanocntpolimer@gmail.com. RSCI SPIN-code 2557-0070, <https://orcid.org/0000-0002-1988-2301>

Поступила: 21.09.2022; получена после доработки: 17.10.2022; принята к опубликованию: 20.03.2023.
The article was submitted: September 21, 2022; approved after reviewing: October 17, 2022; accepted for publication: March 20, 2023.