

Синтез и переработка полимеров
и композитов на их основе
Synthesis and processing of polymers
and polymeric composites

УДК 691.175.743, 678.074

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-73-89>

EDN BDSWGG



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование бутадиен-нитрильного каучука в составе интумесцентных огнезащитных материалов на основе пластифицированного поливинилхлорида

А.А. Галигузов✉, Н.В. Яшин, В.В. Авдеев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, Москва, 119991 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: agaliguzov@yandex.ru

Аннотация

Цели. Исследование свойств интумесцентных огнезащитных материалов на основе пластифицированного поливинилхлорида и окисленного графита в зависимости от содержания в них бутадиен-нитрильного каучука.

Методы. В настоящей работе были получены интумесцентные огнезащитные материалы с различным содержанием бутадиен-нитрильного каучука (от 0 до 20 мас. %). Материалы были изготовлены в виде полотна шириной 38–52 мм и толщиной 1.5–1.9 мм методом плоскощелевой экструзии с использованием двухшнекового экструдера-компаундера. В качестве сырья были использованы пластифицированный поливинилхлорид с константой Фикентчера, равной 71, бутадиен-нитрильный каучук с содержанием связанного акрилонитрила 31–35%, окисленный графит и ультрадисперсный гидроксид алюминия. Свойства сырья и полученных огнезащитных материалов были исследованы методами инфракрасной спектроскопии, термического анализа, сканирующей электронной микроскопии, а также при помощи механических испытаний, испытаний на воспламеняемость и вспенивание при термоударе.

Результаты. Представлены результаты исследований механических, термических и огнезащитных свойств полученных материалов в зависимости от содержания в них бутадиен-нитрильного каучука. Определена динамика вспенивания в температурном интервале от 300 до 800°C. Определена группа воспламеняемости. Приведена зависимость огнезащитных свойств от вязкости расплава огнезащитных материалов. Определены термические свойства в температурном интервале от 40 до 900°C.

Выводы. В исследовании установлено, что введение бутадиен-нитрильного каучука в огнезащитные материалы приводит к изменению ряда свойств: снижению плотности и твердости, снижению прочности на растяжение, увеличению относительного удлинения, росту вязкости расплава в 16 раз и, соответственно, снижению степени вспенивания в 1.43–1.65 раз. Установлено, что степень вспенивания имеет линейную зависимость от вязкости расплава огнезащитных материалов. Введение каучука приводит к повышению прочности пенококса в 4.8 раз. Термический анализ показал, что увеличение содержания каучука приводит к росту термостойкости с 222 до 236°C и стойкости к окислению вспененного графита в составе пенококса с 601 до 659°C. Наличие каучука не оказывает заметного влияния на воспламеняемость. Установлена группа воспламеняемости для всех составов — V-0.

Ключевые слова

огнезащитный материал, окисленный графит, интумесцентный материал, поливинилхлорид, пластификатор, степень вспенивания, прочность при растяжении, воспламеняемость, показатель текучести расплава

Поступила: 02.07.2025

Доработана: 29.11.2025

Принята в печать: 19.01.2026

Для цитирования

Галигузов А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Использование бутадиен-нитрильного каучука в составе интумесцентных огнезащитных материалов на основе пластифицированного поливинилхлорида. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(1):73–89. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-73-89>

RESEARCH ARTICLE

The use of nitrile butadiene rubber in the composition of intumescent fire-retardant materials based on plasticized polyvinyl chloride

Andrey A. Galiguzov✉, Nikolay V. Yashin, Viktor V. Avdeev

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, 119991 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: agaliguzov@yandex.ru

Abstract

Objectives. To investigate the properties of intumescent fire-retardant materials based on plasticized polyvinyl chloride and oxidized graphite as functions of their content of nitrile butadiene rubber.

Methods. Intumescent fire-retardant materials with different contents of nitrile butadiene rubber (from 0 to 20 wt %) were obtained. The materials were prepared in the form of a sheet 38–52 mm wide and 1.5–1.9 mm thick by means of flat-die extrusion using a twin-screw compounding extruder. The raw materials used were plasticized polyvinyl chloride with a K-value of 71, nitrile butadiene rubber with a bound acrylonitrile content of 31–35%, oxidized graphite, and ultrafine aluminium hydroxide. The properties of the raw materials and the resulting fire-retardant materials were investigated using infrared spectroscopy, thermal analysis, scanning electron microscopy, as well as mechanical tests, flammability tests, and thermal shock foaming tests.

Results. The mechanical, thermal, and fire-retardant properties of the obtained materials were studied as functions of their contents of nitrile butadiene rubber. The dynamics of foaming in the temperature range from 300 to 800°C were also explored. The flammability rating was determined. The dependence of fire-retardant properties on the melt viscosity of fire-retardant materials was described. The thermal properties were found to be in the temperature range of 40 to 900°C.

Conclusions. The study found that the introduction of nitrile butadiene rubber into fire-retardant materials leads to a change in a number of properties: a decrease in density and hardness; a decrease in tensile strength; an increase in relative elongation; an increase in melt viscosity by 16 times; and, accordingly, a decrease in foaming rate by a factor of 1.43–1.65. It was established that the foaming rate has a linear dependence on the viscosity of the melt of fire-retardant materials. The introduction of rubber leads to an increase in the strength of foamed char by a factor of 4.8. Thermal analysis showed that increasing the rubber content leads to an increase in heat resistance from 222 to 236°C, and resistance to oxidation of foamed graphite in the composition of foamed char from 601 to 659°C. The presence of rubber does not have a noticeable effect on flammability. The established flammability rating for all compositions is V-0.

Keywords

fire-retardant material, oxidized graphite, intumescent material, polyvinyl chloride, plasticizer, foaming rate, tensile strength, flammability, melt flow index

Submitted: 02.07.2025

Revised: 29.11.2025

Accepted: 19.01.2026

For citation

Galiguzov A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. The use of nitrile butadiene rubber in the composition of intumescent fire-retardant materials based on plasticized polyvinyl chloride. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(1):73–89. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-73-89>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время противопожарная защита конструкций и сооружений — актуальная задача для большинства объектов инженерно-технического обеспечения жизни населения и различных отраслей производства. В условиях пожара конструкции и сооружения испытывают значительные нагрузки, которые приводят к существенным разрушениям, принося колоссальный ущерб экономике страны. Для решения этой проблемы используют материалы пассивной огнезащиты на основе различных полимеров и антипиренов: краски, эмали, пропитки, пасты, ленты, профили и др. [1]. В последние несколько лет широкое применение нашли огнезащитные ленты и профили на основе поливинилхлорида (ПВХ) и интумесцентного графита [2–6]. Сфера их применения: противопожарные муфты (манжеты), огнезащитные материалы (ОЗМ) для противопожарных дверей, окон, вентиляционных коробов и воздуховодов, конструкций лифтов в объектах гражданского и промышленного назначения. В условиях термического удара такие материалы многократно вспениваются, образуя негорючий пенококс, который заполняет технологические проемы и зазоры, является тепловым барьером и препятствует распространению пламени. Известно, что эффективность интумесцентных ОЗМ зависит от комплекса факторов, а именно толщины пенококса, коэффициента вспенивания, свойств пенококса (структуры, химического состава, плотности сшивки, механической прочности, вязкоупругих свойств, плотности, пористости, теплопроводности и др.). В условиях пожара образующийся пенококс подвергается механическим воздействиям (растяжению, сжатию, сдвигу, ударным нагрузкам) вследствие различных факторов: расширения деталей металлических конструкций под действием теплового потока, вибрации, физического контакта с различными предметами (из-за падения предметов при пожаре), действия турбулентных потоков [7]. В связи с этим, одним из наиболее важных показателей является механическая прочность пенококса как в условиях максимальных температур эксплуатации, так и в динамике пожара.

Использование ПВХ в качестве полимерной основы в интумесцентных ОЗМ — актуальное направление при получении средств пассивной огнезащиты. Однако сам по себе ПВХ является жестким полимером. Применение пластификаторов позволяет придать конечному материалу требуемые свойства: эластичность, гибкость, морозостойкость. Пластифицированные материалы обладают меньшей вязкостью, что обеспечивает более низкие температуры переработки, высокую степень наполнения

и однородность смеси [8]. Однако недостатками таких полимерных материалов (ПМ) являются низкий кислородный индекс (КИ) (до 19–22%) и высокая дымообразующая способность [9], а также низкая долговечность, обусловленная наличием низкомолекулярного пластификатора, способного к выпотеванию на поверхности изделия [10]. Использование высокомолекулярных пластификаторов позволяет нивелировать или в ряде случаев полностью исключить эти недостатки [11].

Совместимость ПВХ с бутадиен-нитрильным каучуком (БНК) показана в ряде исследований [12–15]. ПМ на основе этих компонентов являются коммерческими продуктами на протяжении последних 80 лет [16]. В работе [17] показано, что ПВХ с БНК совмещается в любом соотношении при содержании акрилонитрила в каучуке 23–45%. Введение БНК в ПВХ позволяет получить ПМ со свойствами, характерными для эластомеров: повышенной стойкостью к маслам и растворителям, высокой прочностью на разрыв, сопротивлением истиранию, сопротивлением изгибу, повышенной остаточной деформацией при сжатии, стойкостью к миграции пластификатора и потере летучих. Так, замещение половины низкомолекулярного пластификатора диоктилфталата (ДОФ) на БНК в ПВХ пластике приводит к увеличению прочности при растяжении на 25% и увеличению относительного удлинения на 6%, снижению миграции пластификатора с 3% до 0.5%. Полное замещение низкомолекулярного пластификатора на БНК невозможно, т.к. пластифицирующий эффект наблюдается только при содержании БНК на уровне 30%, такие смеси не всегда являются удобными для переработки и наполнения ввиду высокой вязкости расплава [15].

ПМ на основе БНК и пластифицированного ПВХ характеризуются высокой термостабильностью: для комплексного материала этот показатель выше, чем для БНК, что связано с меньшей долей двойных связей в смеси и наличием хлора.

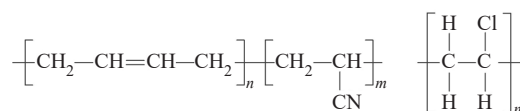


Рис. 1. Структурная формула БНК (слева) и ПВХ (справа)
Fig. 1. Structural formulas of nitrile butadiene rubber (NBR) (left) and polyvinyl chloride (PVC) (right)

Термическое окисление БНК — одностадийный процесс с температурой начала разложения 360°C [18]. В интервале 360–500°C происходит разрыв полимерной цепи и выделение продуктов

разложения, составляющих полимерную цепочку: полибутадиена и полиакрилонитрила, продуктов взаимодействия диеновых фрагментов с нитрильной группой [19, 20]. Этот интервал характеризуется наибольшей потерей массы — 87.7% [20]. В температурном интервале свыше 600°C происходит пиролиз с выделением бутадиена, акрилонитрила, бензола, 1,4-циклогептадиена, 4-винилциклогексена, бензонитрила и других насыщенных циклических продуктов [21]. При температуре до 900°C происходит полный распад БНК со значением коксового остатка, близким к нулю.

Термическое и термоокислительное разложение ПВХ — более сложный процесс. Чистый ПВХ начинает разлагаться при температуре 250°C. Эта стадия протекает в температурном интервале 250–350°C и сопровождается реакцией дегидрохлорирования с потерей массы до 65%. Кроме соляной кислоты, продуктами разложения являются бензол, толуол и другие ненасыщенные циклические углеводороды. На второй стадии (350–525°C) происходит крекинг и разложение дегидрохлорированных остатков с выделением полиеновых цепей [22]. В случае пластифицированного ПВХ на первой и второй стадиях происходит испарение низкомолекулярного пластификатора. Для индивидуальных веществ температуры кипения составляют: для ДОФ — 380°C, для диизонилфталата — 252°C, для диоктилтерефталата — 400°C, для пластификатора в составе ПМ температуры потери массы смещаются в более высокотемпературную область [23]. При температуре свыше 525°C происходит распад полиеновых цепей до толуола и других низкомолекулярных алкилбензолов. При температуре до 900°C выход коксового остатка составляет от 5 до 10% [24, 25].

Термическое разложение смесей ПВХ–БНК — двустадийный процесс. На первой и второй стадиях разложения потеря массы ниже, чем для индивидуальных компонентов. Значение коксового остатка при температуре 600°C в 3–4 раза выше, чем для ПВХ и БНК. Кривые потери массы носят не аддитивный характер относительно компонентов, составляющих смесь. В продуктах распада преобладают низкомолекулярные вещества — толуол, акрилонитрил, бутеннитрил, цианистый водород [20]. Вероятно, увеличение выхода коксового остатка происходит в результате образования свободных радикалов компонентов бинарной смеси и взаимодействия макромолекул до формирования полициклических структур.

При введении неорганических наполнителей в бинарную смесь (каолина, $Mg(OH)_2$) происходит снижение скорости разложения и смещение максимума разложения в область более высоких температур. Это происходит ввиду образования теплового барьера. Также происходит снижение количества выделяющегося HCl в результате реакции с наполнителем. При разложении происходит неаддитивное увеличение выхода коксового остатка [20]. Это явление также характерно и для полиолефинов и их сополимеров [26].

Выход коксового остатка и его механическая прочность — важные характеристики для интумесцентных ОЗМ. Они являются критическими, в особенности, в случае струйного пожара или возникновения турбулентного потока газов при эксплуатации интумесцентных материалов в реальных условиях. Высокая твердость и развитая трещиноватая структура приводит к быстрому разрушению и абляции пенококса, в то время как пенококс с низкой механической прочностью не обеспечивает длительной работоспособности при турбулентном режиме горения [7].

Ввиду вышесказанного необходимо отметить, что влияние содержания БНК в интумесцентных материалах на основе пластифицированного ПВХ и окисленного графита исследовано мало. Целью данной работы было изучение влияния содержания БНК на механические, термические и огнезащитные свойства интумесцентных ОЗМ на основе пластифицированного ПВХ и окисленного графита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

В качестве объекта исследования были использованы интумесцентные ОЗМ различного состава, полученные из следующих компонентов:

Компонент 1: суспензионный ПВХ марки 271PC производства компании ПАО «СИБУР Холдинг» (Россия) (константа Фикентчера — 71.0 ± 1.0 , насыпная плотность — 0.46–0.57 г/см³), ТУ 20.16.30-001-83385954-2018;

Компонент 2: ДОФ производства компании ГК «ВутаХим» (Россия), сорт высший, ГОСТ 8728-88¹;

Компонент 3: комплексный стабилизатор на основе свинца марки РИТМИКС-2040/2 производства компании ООО «СХК» (Россия), ТУ 20.59.56-020-21996423-2020;

¹ ГОСТ 8728-88. Межгосударственный стандарт. Пластификаторы. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов; 1990. [GOST 8728-88. Interstate Standard. Plasticizers. Specifications. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1990 (in Russ.).]

Таблица 1. Гранулометрический состав (мас. %) бисульфатного окисленного графита марки EG-250 (мм)

Table 1. Particle size composition (wt %) of oxidized bisulphate graphite, EG-250 grade (mm)

Размер частиц, мм Particle size, mm	+1.0	-1.0 + 0.63	-0.63 + 0.4	-0.4 + 0.315	-0.315 + 0.2	-0.2 + 0.16	-0.16 + 0.1	-0.1 + 0.05	-0.05
Содержание, % Content, %	0	0	0.5	1.7	54.8	27.4	0.1	13.9	1.5

Компонент 4: БНК в виде порошка марки ПБНК-3365 производства компании ПАО «СИБУР Холдинг» (содержание связанного акрилонитрила — 31–35%, вязкость по Муни ML 1+4 при 100°C — 65 ед.), ТУ 38.30328-2008;

Компонент 5: ультрадисперсный гидроксид алюминия Al(OH)₃ марки TS303 (D50 — 3–6 мкм, влажность — 0.3%, потеря массы при прокаливании — 33.0–34.5%, pH водной суспензии 9.2, пикнометрическая плотность — 2.401 г/см³), ТУ 2322-001-23374430-2015;

Компонент 6: стеариновая кислота марки SA1860 (Китай);

Компонент 7: бисульфатный окисленный графит марки EG-250 (степень расширения — 250 см³/г, выход пенографита — 65%, влажность — 0.5%, pH водной вытяжки 2.9, пикнометрическая плотность — 1.587 г/см³, гранулометрический состав — см. табл. 1) производства компании Ningbo Borhe (Китай).

Методы

Для получения материалов был использован трехстадийный процесс.

Стадия 1: на первой стадии был получен порошкообразный пластикат ПВХ путем смешения компонентов 1–3 в соотношении 100 : 70 : 6 весовых частей (конечная температура смешения 110°C). Далее пластикат был кондиционирован при температуре 18–25°C в течение 24 ч.

Стадия 2: на второй стадии путем смешения порошков пластиката ПВХ и компонентов 4–7 было получено 5 составов с различным содержанием БНК. Во всех случаях суммарное содержание полимеров (пластикат ПВХ + БНК) было одинаковым и составляло 60 мас. %. В рамках этого суммарного содержания

долю БНК меняли таким образом, чтобы его содержание в конечном составе было 0, 5, 10, 15 и 20 мас. %. Суммарное содержание гидроксида алюминия и окисленного графита во всех составах было одинаковым (10 и 30% соответственно). Для оценки динамики изменения свойств ПМ при введении антипиренов также было получено 5 составов ПМ, в которых отсутствовали антипирены, при этом весовое соотношение между пластикатом ПВХ и БНК осталось прежним. Состав полученных смесей приведен в табл. 2.

Стадия 3: на третьей стадии каждая из полученных смесей (ОЗМ и ПМ) была экструдирована на двухшнековом экструдере с сонаправленным вращением шнеков ($D_{III} = 20$ мм, $L_{III}/D_{III} = 44$, где D_{III} и L_{III} — диаметр и длина шнека экструдера соответственно) при температуре 165–170°C и скорости вращения шнеков 170 об./мин с использованием Т-образной плоскощелевой фильеры. При экструзии фиксировали нагрузку на двигатель шнековой пары в процентах от максимального значения. Для формирования полотна был использован двухвалковый каландр с водоохлаждаемыми вальками. Таким образом, для каждого состава было получено полотно шириной 38–52 мм и толщиной 1.5–1.9 мм. Характеристики полученных материалов были определены согласно ряду методик.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав антипиренов

Для антипиренов были определены pH водной суспензии (для гидроксида алюминия — по ГОСТ 21119.3-91²) и водной вытяжки (для окисленного графита — по ГОСТ 17818.6-90³).

Исследование состава антипиренов было проведено с помощью инфракрасного (ИК) Фурье-спектрометра TENSOR 27 (Bruker, Германия)

² ГОСТ 21119.3-91. Межгосударственный стандарт. Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение pH водной суспензии. М.: ИПК Издательство стандартов; 1999. [GOST 21119.3-91. Interstate Standard. General methods of test for pigments and extenders. Determination of pH value of an aqueous suspension. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1999 (in Russ.).]

³ ГОСТ 17818.6-90. Государственный стандарт Союза ССР. Графит. Метод определения концентрации водородных ионов (pH) водной суспензии и водной вытяжки. М.: 1990. [GOST 17818.6-90. State Standard of the USSR. Graphite. Method for determination of hydrogen ions concentration of water suspension and water extract. Moscow; 1990 (in Russ.).]

Таблица 2. Состав (мас. %) ПМ и ОЗМ с различным содержанием БНК

Table 2. Composition (wt %) of polymer materials (PMs) and fire-retardant materials (FRMs) with various NBR contents

Шифр материала Material code	Компонент Component						
	ПВХ PVC	ДОФ DOP	Стабилизатор Stabilizer	Стеариновая кислота Stearic acid	БНК NBR	Al(OH) ₃	Окисленный графит Oxidized graphite
ПМ-0 PM-0	56.72	39.59	3.40	0.29	0	0	0
ПМ-5 PM-5	51.88	36.32	3.11	0.29	8.40	0	0
ПМ-10 PM-10	47.21	33.05	2.83	0.29	16.62	0	0
ПМ-15 PM-15	42.47	29.72	2.55	0.29	24.97	0	0
ПМ-20 PM-20	37.76	26.44	2.27	0.29	33.24	0	0
ОЗМ-0 FRM-0	34.06	23.84	2.04	0.18	0	9.88	30
ОЗМ-5 FRM-5	31.22	21.85	1.87	0.18	5.00	9.88	30
ОЗМ-10 FRM-10	28.37	19.87	1.70	0.18	10.00	9.88	30
ОЗМ-15 FRM-15	25.54	17.87	1.53	0.18	15.00	9.88	30
ОЗМ-20 FRM-20	22.70	15.88	1.36	0.18	20.00	9.88	30

с детектором DLaTGS в диапазоне 4000–400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Использовался метод прессования таблеток с галогенидами щелочных металлов (KBr). Соотношение Al(OH)₃ : KBr = 1 : 500, соотношение (окисленный графит) : KBr = 1 : 850.

Плотность и твердость

Плотность (*D*) и твердость по Шору А (*H_A*) полученных материалов (ПМ и ОЗМ) определяли по ГОСТ 15139-69⁴ и ГОСТ 24621-2015⁵ соответственно.

⁴ ГОСТ 15139-69. Государственный стандарт Союза ССР. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). Переиздание: февраль 1988 г., с изменением № 1. М.: ИПК Издательство стандартов; 1988. [GOST 15139-69. State Standard of the USSR. Plastics. Methods for the determination of density (volume mass). Reprint, February, 1988, with correction 1. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1999 (in Russ.).]

⁵ ГОСТ 24621-2015. Межгосударственный стандарт. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). М.: Стандартиформ; 2016. [GOST 24621-2015. Interstate Standard. Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness). Moscow: Standartinform; 2015 (in Russ.).]

Показатель текучести расплава

Для ОЗМ был определен показатель текучести расплава (ПТР) по ГОСТ 11645-2021⁶ с использованием аналитического пластометра XNR-400 при температуре 190°C и нагрузке 5.0 кг.

Прочность при растяжении

Для образцов ПМ и ОЗМ были определены прочность (σ_r) и относительное удлинение (ϵ_r) при растяжении согласно ГОСТ 270-75⁷. Испытание было проведено при комнатной температуре ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) на образцах типа II (подробное обозначение и габариты указаны в нормативной документации ГОСТ 270-75) с использованием универсальной испытательной машины серии HxK-S/U, модификация H5K-S (*Tinius Olsen*, Великобритания) при скорости перемещения (500 ± 50) мм/мин.

Термические свойства

Термические свойства сырья, ПМ и ОЗМ были определены с помощью термогравиметрического анализа в динамическом режиме в атмосфере воздуха ($60 \text{ см}^3/\text{мин}$) с использованием синхронного термоанализатора STA 449 (*Netzsch*, Германия) в температурном интервале 40–900°C при скорости подъема температуры 20 К/мин. По результатам термического анализа была определена термостойкость, для оценки которой были использованы значения температуры начала разложения T_1 и температуры максимальной скорости разложения T_{max} [5].

Степень вспенивания

Для образцов ОЗМ была определена степень вспенивания FR (foaming rate) в зависимости от заданной температуры изотермической выдержки. Испытание было проведено в атмосфере воздуха. Для определения данного показателя была использована методика, описанная в ГОСТ Р 59637-2021⁸. Образцы ОЗМ диаметром 40 ± 0.5 мм и фактической начальной толщиной T_0 , определенной штангенциркулем, помещались в полый

стальной цилиндр диаметром 41 мм и высотой 60 мм. Далее, установленный на стальной подложке, стальной цилиндр с образцом, помещался в муфельную печь, предварительно разогретую до заданной температуры. По истечении 5 мин стальной цилиндр извлекался из печи и остывал до комнатной температуры. Испытание было проведено для трех параллелей каждого образца. Высота исходного T_0 и вспененного T_1 образцов измерялась штангенциркулем.

Степень вспенивания была определена при температуре в диапазоне от 300 до 800°C (с шагом 100°C). Степень вспенивания FR была рассчитана согласно уравнению:

$$FR = [(T_1 - T_0)/T_0] \times 100\%.$$

В зависимости от заданной температуры выдержки была определена динамика вспенивания для каждого ОЗМ.

Для каждой заданной температуры печи от 300 до 800°C была определена скорость нагрева образца. Для этого в место расположения образца была установлена термопара, которая фиксировала значение температуры в динамике в интервале до 5 мин (рис. 2).

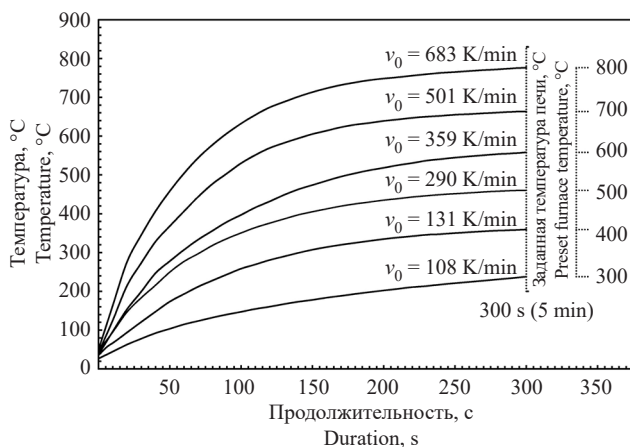


Рис. 2. Зависимость температуры образца ОЗМ от продолжительности выдержки при заданной температуре печи

Fig. 2. Dependence of the temperature of a FRM sample on the duration of holding at a preset furnace temperature

⁶ ГОСТ 11645-2021. Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Методы определения показателя текучести расплава термопластов. М.: Российский институт стандартизации; 2021. [GOST 11645-2021. Interstate Standard. Plastics. Methods for determination of flow index of thermoplastics melt. Moscow: Russian Standardization Institute; 2025 (in Russ.).]

⁷ ГОСТ 270-75. Межгосударственный стандарт. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М.: Стандартинформ; 2008. [GOST 270-75. Interstate Standard. Rubber. Method of the determination elastic and tensile stress-strain properties. Moscow: Standartinform; 2008 (in Russ.).]

⁸ ГОСТ Р 59637-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте. М.: Российский институт стандартизации; 2021. [GOST R 59637-2021. National Standard of the Russian Federation. Fire protection means for buildings and structures. Means of fire protection. Methods of quality control of fire-retardant works during installation (application), maintenance and repair. Moscow: Russian Standardization Institute; 2021 (in Russ.).]

Как видно на рис. 2, чем выше заданная температура печи, тем выше скорость нагрева образца в начальный момент времени (v_0). Известно, что температура — ключевой фактор в процессе вспенивания интумесцентного графита: с ее ростом происходит рост степени вспенивания и снижение насыпной плотности вспененного графита [27].

Механическая прочность пенококкса

Для образцов ОЗМ, вспененных при температуре 600°C, была определена механическая прочность пенококкса (σ_p). Для испытания была использована методика, описанная в [28]. Образец пенококкса был помещен между двумя горизонтальными пластинами, закрепленными в соответствующей траверсе испытательной машины. Испытание было проведено при комнатной температуре с использованием универсальной испытательной машины серии HxK-S/U, модификации H5K-S при скорости перемещения 2.5 мм/мин с погрешностью силоизмерителя ± 2.5 Н. Каждый образец был испытан таким образом, что конечное расстояние между пластинами было 2 мм. Вследствие того, что пенококкс подобных ОЗМ имеет градиентную структуру и его верхняя и средняя части по высоте имеют наибольшую пористость [6], расчеты были сделаны на 75% деформации (для нижней части образца пенококкса).

Воспламеняемость

Для образцов ОЗМ была определена воспламеняемость согласно UL-94 «Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances»⁹. Для испытания из фрагментов экструдированного полотна ОЗМ были вырезаны образцы длиной 125 ± 5 мм, шириной 13.0 ± 0.5 мм и толщиной 1.5–1.9 мм. Далее образцы были кондиционированы при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $50 \pm 5\%$ в течение 48 ч. Все образцы были испытаны на соответствие показателю воспламеняемости V-0: вертикальное расположение образца; высота пламени газовой горелки 20 мм; самогашение пламени образца в течение 10 с после удаления пламени горелки; горящие капли не допускаются; послесвечение — 30 с. В рамках одного испытания было испытано три параллельных образца.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Структура и морфология порошков антипиренов, изломов образцов ПМ и ОЗМ были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3 LMU (*Tescan Orsay Holding*, Чехия) при ускоряющем напряжении 20 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые ОЗМ часто используются в виде эластичных профилей и лент в конструкциях различного назначения, поэтому при их рассмотрении эксплуатационные свойства не ограничиваются огнезащитными характеристиками, а включают и физико-механические свойства. В табл. 3 приведены результаты определения характеристик полученных ПМ и ОЗМ.

В настоящей работе мы исследовали влияние БНК на плотность, твердость по Шору А и прочность при растяжении.

Для оценки влияния свойств антипиренов на механические свойства ОЗМ для окисленного графита и гидроксида алюминия была проведена ИК-спектроскопия, определен показатель кислотности, проведено СЭМ исследование частиц антипиренов.

Согласно ИК-спектру (рис. 3), бисульфатный окисленный графит марки EG-250 характеризуется наличием ряда функциональных групп: О–Н (3438 см^{-1}), карбоксильной $-\text{COOH}$ (1388 см^{-1}), карбонильной $-\text{C=O}$ (1700 см^{-1}), ароматической C=C группы (1633 см^{-1}). Несколько полос в области от $1050\text{--}950\text{ см}^{-1}$ могут соответствовать колебаниям группы S=O , их низкая интенсивность связана с низкой концентрацией этих групп в составе окисленного графита. Полоса 1114 см^{-1} может соответствовать как кислород-содержащей группе C-O , так и асимметричным колебаниям SO_4^{2-} [29–31]. Гидроксильные группы находятся на поверхности базальных слоев. Судя по высокой интенсивности пика 3438 см^{-1} , их содержание велико.

ИК-спектр поглощения ультрадисперсного гидроксида алюминия марки TS 303 (рис. 4) характеризуется наличием, главным образом, полос валентных (в диапазоне от 3620 до 3382 см^{-1}) и деформационных колебаний (1022 и 970 см^{-1}) HO -группы. Полосы в диапазоне от 650 до 515 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям HO -группы и колебаниям AlO -группы [32].

⁹ UL 94 BULLETIN-2018 UL Standard for Safety Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. Underwriters Laboratories Inc. (UL). Northbrook, IL. Fifth Edition, Dated October 29, 1996.

Таблица 3. Свойства полученных ПМ и ОЗМ
Table 3. Properties of the obtained PMs and FRMs

Шифр материала Material code	Содержание БНК NBR content	ПТР, г/10 мин MFI, g/10 min	D, г/см ³ D _r , g/cm ³	H _A , у.е. H _A , c.u.	σ _r , МПа σ _p , MPa	ε _r , %	σ _r , МПа σ _p , MPa	Термические свойства Thermal analysis data			UL-94
								T _{onset} , °C	T _{peak} , °C	Остаток при 900°C, % Residue at 900°C, %	
ПМ-0 PM-0	0	35.0	1.236	61	10.9	249.7	—	—	—	—	—
ПМ-5 PM-5	8.40	27.7	1.236	59	10.9	355.6	—	—	—	—	—
ПМ-10 PM-10	16.62	17.0	1.219	55	10.8	386.1	—	—	—	—	—
ПМ-15 PM-15	24.97	8.8	1.175	49	10.6	421.9	—	—	—	—	—
ПМ-20 PM-20	33.24	2.9	1.085	41	9.5	465.6	—	—	—	—	—
ОЗМ-0 FRM-0	0	14.6	1.382	77	6.2	152.4	129.2	222	253	9.47	V-0
ОЗМ-5 FRM-5	5.00	9.4	1.423	77	6.0	211.6	315.6	226	254	8.74	V-0
ОЗМ-10 FRM-10	10.00	5.0	1.405	75	5.8	254.8	321.4	228	260	8.80	V-0
ОЗМ-15 FRM-15	15.00	2.9	1.367	73	5.1	314.2	448.4	233	264	8.49	V-0
ОЗМ-20 FRM-20	20.00	0.9	1.350	69	4.6	384.6	615.4	236	264	9.43	V-0

Примечание: ПТР — показатель текучести расплава; D — плотность; H_A — твердость по Шору А; σ_r — прочность при растяжении; ε_r — относительное удлинение при растяжении; σ_p — механическая прочность пенококса; T_{onset} — температура начала разложения; T_{peak} — температура, соответствующая максимальной скорости разложения; UL-94 — группа воспламеняемости согласно UL-94.

Note: MFI, melt flow index; D, density; H_A, Shore A hardness; σ_r, tensile strength; ε_r, relative tensile elongation; σ_p, mechanical strength of foamed char; T_{onset}, onset degradation temperature; T_{peak}, temperature of the maximum degradation rate; and UL-94, flammability rating according to UL-94.

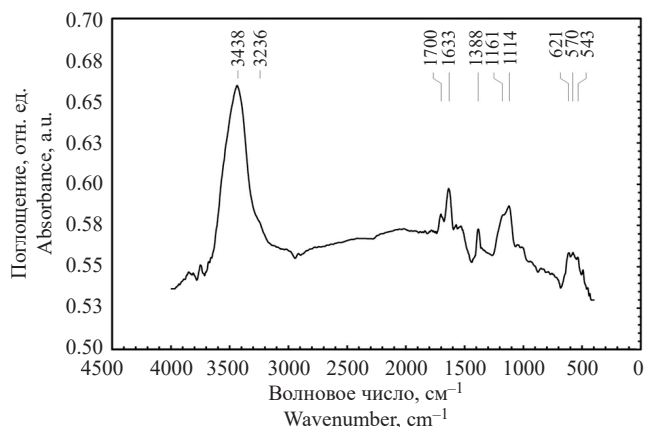


Рис. 3. ИК-спектр поглощения бисульфатного окисленного графита марки EG-250

Fig. 3. IR absorption spectra of oxidized bisulfate graphite, EG-250 grade

Антипирены имеют различные показатели кислотности: рН водной вытяжки/суспензии составляет 2.9 и 9.2 для окисленного графита и гидроксида алюминия соответственно.

СЭМ-изображения частиц антипиренов приведены на рис. 5 и 6.

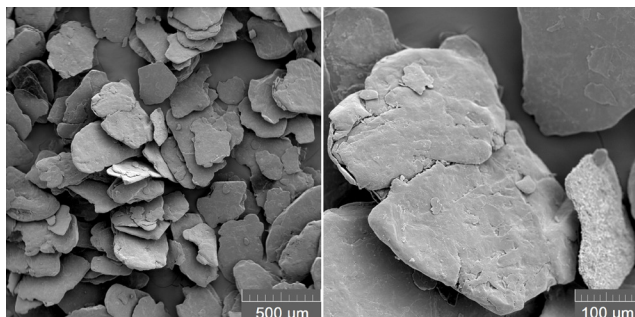


Рис. 5. СЭМ-изображения частиц окисленного графита марки EG-250

Fig. 5. Scanning electron microscopy (SEM) images of oxidized bisulfate graphite, EG-250 grade

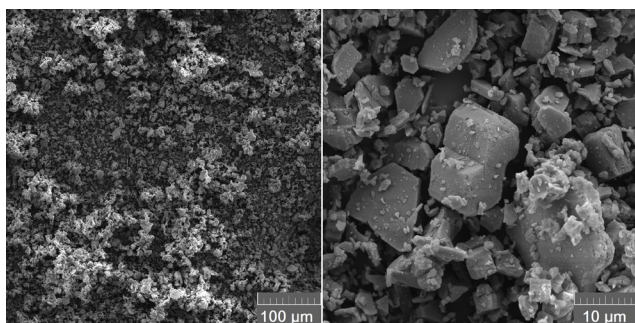


Рис. 6. СЭМ-изображения частиц ультрадисперсного гидроксида алюминия марки TS 303

Fig. 6. SEM images of ultrafine aluminium hydroxide, TS 303 grade

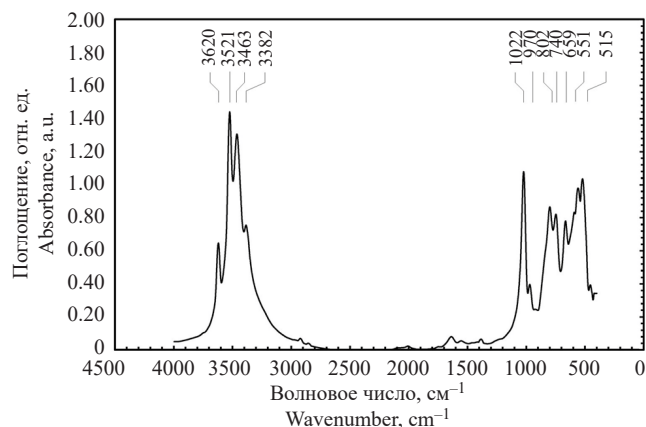


Рис. 4. ИК-спектр поглощения ультрадисперсного гидроксида алюминия марки TS 303

Fig. 4. IR absorption spectra of ultrafine aluminium hydroxide, TS 303 grade

Как видно из табл. 3 и рис. 7, увеличение содержания БНК приводит к снижению плотности на 12% для ПМ, тогда как для ОЗМ этот показатель практически не изменяется (снижается на 2.3%).

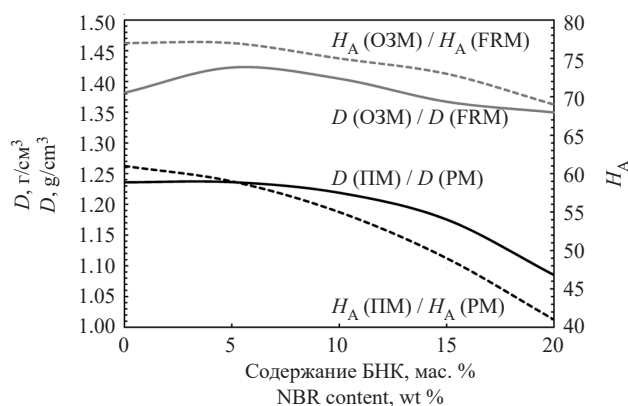


Рис. 7. Изменение плотности D и твердости по Шору A H_A для ПМ и ОЗМ в зависимости от содержания БНК

Fig. 7. Dependencies of the density D and Shore A hardness H_A of PMs and FRMs on NBR content

Введение антипиренов в заданном количестве приводит к увеличению плотности, в среднем, на 12–25% в результате введения более плотных наполнителей, плотность которых составляет 1.587 и 2.401 г/см³ для окисленного графита и гидроксида алюминия соответственно.

Что касается твердости по Шору A , то увеличение содержания БНК приводит к снижению показателя для ПМ и ОЗМ на 33 и 10% соответственно (рис. 7). Характер этого изменения обусловлен твердостью БНК 49 у.е., который выполняет функцию высокомолекулярного пластификатора, повышая подвижность макромолекул ПВХ, тем самым приводя к снижению сопротивления продавливанию [33]. Введение

антипиренов приводит к увеличению твердости в 1.3–1.7 раза. Такое изменение характерно для ПМ на основе ПВХ применительно к широкому ряду наполнителей при большой степени наполнения [34]. В ОЗМ наполнитель усиливает связь между макромолекулами, затрудняя их «скольжение» относительно друг друга. Как видно на рис. 7, характер изменения твердости для ПМ и ОЗМ отличается между собой: для ПМ и ОЗМ значение H_A в рассматриваемом интервале снижается на 33 и 10% соответственно. Это может быть связано с тем, что по мере увеличения содержания БНК в ОЗМ возрастает связь между наполнителями и звеньями полимерных цепей.

Результаты определения прочностных характеристик показали, что при увеличении содержания БНК в ПМ и ОЗМ прочность при растяжении σ_t снижается на 13 и 25%, в то время как относительное удлинение при растяжении ϵ_t возрастает в 1.9 и 2.5 раза соответственно. Введение антипиренов приводит к снижению σ_t и ϵ_t в 1.8–2.1 и 1.2–1.7 раза соответственно (рис. 8).

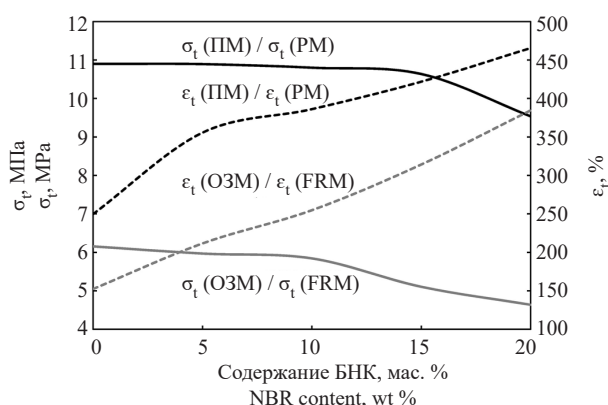


Рис. 8. Изменение прочности σ_t и относительного удлинения при растяжении ϵ_t для ПМ и ОЗМ в зависимости от содержания БНК

Fig. 8. Dependencies of the density σ_t and relative tensile elongation ϵ_t of PMs and FRMs on NBR content

В случае ПМ происходит неравномерное снижение σ_t : в интервале до 15 мас. % (из расчета на состав ОЗМ) показатель практически не изменяется, что согласуется литературными данными [13], тогда как при содержании 20 мас. % снижается на 13%.

Влияние наполнителей на прочностные свойства ПМ на основе ПВХ изучено на примере широкого ряда материалов. Отмечается, что при выборе наполнителя руководствуются его совместимостью с ПМ, которая зависит от адгезии на границе раздела фаз полимер-наполнитель [35] и, по меньшей мере, еще от двух факторов: химического взаимодействия на границе раздела и формы и размера частиц наполнителя.

ПВХ обладает слабыми кислотными свойствами, его α -водородные атомы могут формировать связь с протон-акцепторными веществами [36]. Способ повышения прочности на межфазной границе основан на увеличении количества гидроксильных групп на поверхности наполнителя [37, 38]. На поверхности раздела фаз ПВХ взаимодействует с наполнителями с основными свойствами, которые содержат реакционноспособные HO-группы. Напротив, наполнители, обладающие явно выраженными кислотными свойствами, показывают плохую совместимость с ПВХ [37]. Согласно ИК-спектроскопии (рис. 3), окисленный графит характеризуется большим содержанием поверхностных HO-групп. При этом данный антипирен характеризуется кислой средой водной вытяжки (рН 2.9). Однако необходимо отметить, что кислая среда водной вытяжки определяется наличием остаточного содержания серной кислоты. Серная кислота и гидросульфат-анионы хорошо вымываются водой из межслоевого пространства окисленного графита, переходя в раствор при определении рН, в то время как HO-группы имеют прочную связь с атомами углерода в кристаллической решетке графита. В целом, на основании интенсивности пиков на ИК-спектре окисленного графита можно сказать, что этот антипирен имеет основные свойства.

Гидроксид алюминия также имеет основные свойства благодаря наличию HO-групп (рис. 4). Тем не менее, несмотря на видимую химическую совместимость материалов, введение антипиренов в ПМ вызывает снижение прочностных характеристик. Известно, что размер и форма частиц влияют на свойства ПМ при деформации, в особенности, при растяжении. При испытании в динамике происходит кавитация, то есть отслаивание, приводящее к образованию полостей вблизи поверхности наполнителя [39]. Согласно [40, 41], размер частиц наполнителя определяет формирование дефектов на поверхности раздела фаз матрица-наполнитель в форме либо овальных, либо ромбовидных пор. Первые образуются при размере частиц наполнителя до 100 мкм, их наличие не снижает механические свойства, вторые — при размере частиц наполнителя более 100 мкм. В этом случае возникают дефекты, которые вначале растут как овальные поры, а затем трансформируются в поры ромбовидной формы. Они являются микротрещинами, растущими поперек направления вытяжки. Это приводит к раннему разрушению ПМ. При растяжении отслаивание матрицы происходит по ромбовидным дефектам, что сказывается на характерном снижении прочности. На основании вышесказанного

можно сделать вывод, что, несмотря на химическую совместимость антипиренов с ПМ, именно размер частиц окисленного графита определяет падение прочности у ОЗМ.

В настоящей работе проведено сравнение степени вспенивания ОЗМ в зависимости от содержания в них БНК, в том числе в зависимости от заданной температуры изотермической выдержки (скорости нагрева образца, см. рис. 2). Из результатов видно, что с ростом содержания БНК от 0 до 20% степень вспенивания снижается в 1.43–1.65 раз. Увеличение температуры выдержки приводит к возрастанию степени вспенивания ОЗМ, что характерно для окисленного графита [27]. Как видно на рис. 9, процесс вспенивания ОЗМ можно разделить на два этапа: 1) до температуры 400°C, когда происходит резкое вспенивание образцов для всех составов ОЗМ, и 2) после температуры 400°C, когда происходит плавное вспенивание при незначительном изменении высоты образцов. В интервале температур 700–800°C происходит снижение высоты образцов ввиду окисления пенококса. Это особенно характерно для образца с большой высотой пенококса, когда его верхняя часть подвержена воздействию окислительной среды (образец ОЗМ-0).

Скорость вспенивания — важный параметр огнезащитных материалов, определяющий их эксплуатационные свойства. Как было отмечено выше, сферы применения рулонных ОЗМ — противопожарные двери, противопожарные муфты и т.д., где одним из показателей огнезащитной эффективности является инерционность полного срабатывания, определяющая предел огнестойкости (ГОСТ Р 53306-2009¹⁰). Как видно на рис. 9, содержание БНК в ОЗМ влияет на максимальную степень и скорость вспенивания. Во всем интервале температур с увеличением содержания БНК снижается степень вспенивания, что может быть связано с ростом вязкости расплава ОЗМ в ряду ОЗМ-0, ..., ОЗМ-20 (табл. 3). Как было отмечено в работах [6, 42], лимитирующей стадией процесса пенообразования является зародышеобразование в объеме жидкой фазы: зародыши газовых пузырьков образуются в объеме ПМ при его переходе в вязкотекучее состояние с определенным значением вязкости. На рис. 10 приведена зависимость степени вспенивания при различных температурах от показателя текучести расплава ОЗМ.

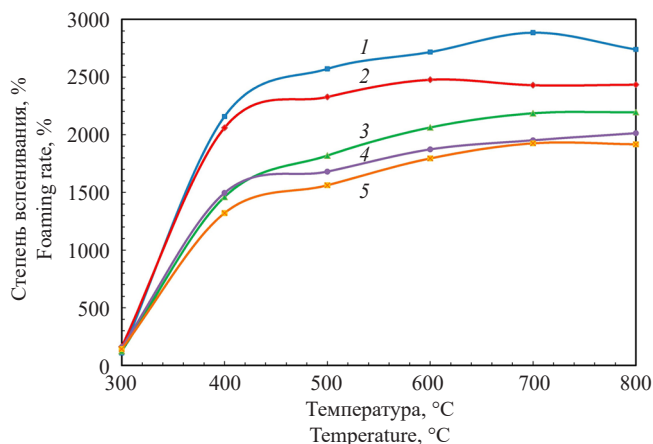


Рис. 9. Степень вспенивания ОЗМ в зависимости от содержания БНК и температуры изотермической выдержки: (1) ОЗМ-0, (2) ОЗМ-5, (3) ОЗМ-10, (4) ОЗМ-15, (5) ОЗМ-20

Fig. 9. Dependencies of the foaming rate of FRM on specified isothermal holding temperature at various NBR contents: (1) FRM-0, (2) FRM-5, (3) FRM-10, (4) FRM-15, and (5) FRM-20

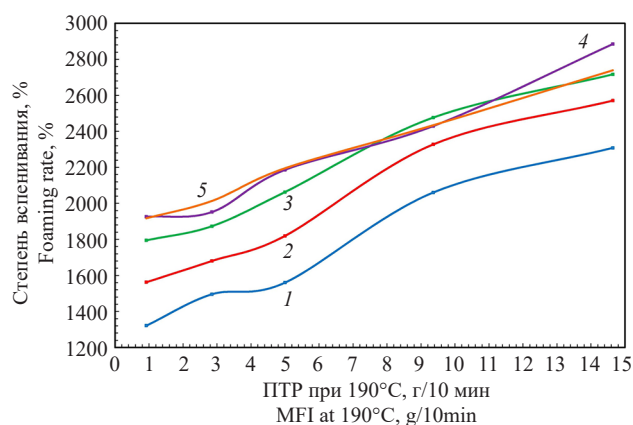


Рис. 10. Степень вспенивания ОЗМ в зависимости от их ПТР при различных содержаниях БНК и температурах изотермической выдержки: (1) 400°C, (2) 500°C, (3) 600°C, (4) 700°C, (5) 800°C

Fig. 10. Dependence of the foaming rate of FRMs on their melt flow index (MFI) at different NBR contents and various specified isothermal holding temperatures: (1) 400°C, (2) 500°C, (3) 600°C, (4) 700°C, and (5) 800°C

Как видно из полученных результатов, во всем интервале температур степень вспенивания ОЗМ имеет, в целом, линейную зависимость от их ПТР.

Прикладной интерес вызывает влияние содержания БНК в ОЗМ на прочность пенококса. Как

¹⁰ ГОСТ Р 53306-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Узлы пересечения ограждающих строительных конструкций трубопроводами из полимерных материалов. Метод испытаний на огнестойкость. М.: Стандартинформ; 2019. [GOST R 53306-2009. National Standard of the Russian Federation. Enclosing building structures crossing junction points by using pipe, which is made of polymeric materials. Fire resistance test. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russ.).]

показано на рис. 11 и в табл. 3, увеличение содержания БНК в ОЗМ от 0 до 20% приводит к росту прочности пенококса на сжатие в 4.7 раз.

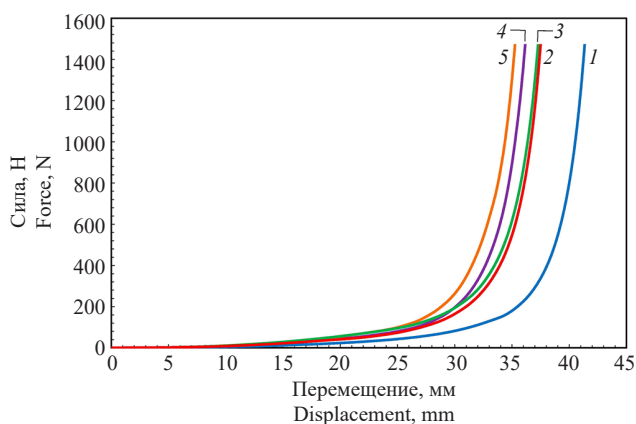


Рис. 11. Зависимость нагрузки при сжатии в результате перемещения от содержания БНК для: (1) ОЗМ-0, (2) ОЗМ-5, (3) ОЗМ-10, (4) ОЗМ-15, (5) ОЗМ-20

Fig. 11. Compressive load *versus* displacement curves for FRMs with various NBR contents: (1) FRM-0, (2) FRM-5, (3) FRM-10, (4) FRM-15, and (5) FRM-20

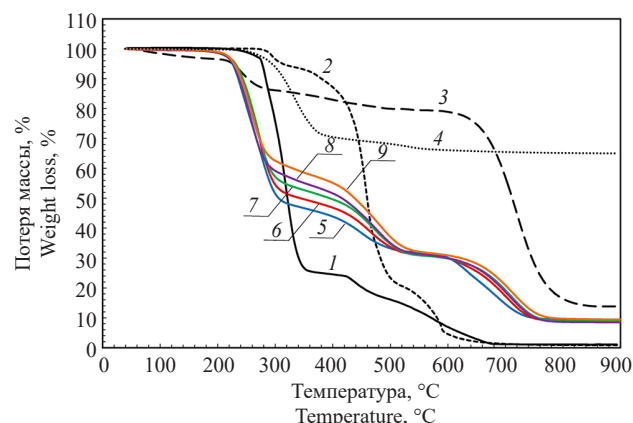


Рис. 12. Кривая потери массы исходных материалов и образцов ОЗМ в температурном интервале 40–900°C: (1) пластикат ПВХ, (2) БНК, (3) окисленный графит, (4) гидроксид алюминия, (5) ОЗМ-0, (6) ОЗМ-5, (7) ОЗМ-10, (8) ОЗМ-15, (9) ОЗМ-20

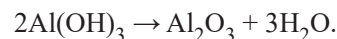
Fig. 12. Weight loss curve of the initial materials and FRM samples at 40–900°C: (1) PVC plasticate, (2) NBR, (3) oxidized graphite, (4) aluminium hydroxide, (5) FRM-0, (6) FRM-5, (7) FRM-10, (8) FRM-15, and (9) FRM-20

Это может быть связано с тем, что при совместном пиролизе ПВХ и БНК происходит взаимодействие продуктов разложения ПВХ и БНК до образования конденсированных соединений. Кроме того, в ПМ с повышением содержания БНК снижается доля легкокипящего низкомолекулярного пластификатора, что приводит к увеличению термостабильности

и смещению процессов пиролиза в более высокотемпературную область [43].

Как видно на рис. 12 и в табл. 3, введение БНК приводит к изменению процесса пиролиза ОЗМ в окислительной атмосфере.

С увеличением содержания БНК температура начала разложения ОЗМ возрастает с 222 до 236°C, что связано с высокой термостойкостью БНК (280°C). Температура, соответствующая максимальной скорости разложения на этой стадии, также возрастает — с 253 до 264°C. Согласно рис. 12, характер протекания первой стадии разложения всех рассматриваемых ОЗМ (дегидрохлорирование) является схожим. В температурном интервале 300–500°C происходит преимущественно пиролиз БНК: с ростом его содержания в ОЗМ на данной стадии увеличивается потеря массы (с 14.7 до 26.3%). В температурном интервале 600–750°C происходит окисление вспененного графита в составе ОЗМ: наличие БНК приводит к смещению процесса окисления в высокотемпературную область — температура начала окисления возрастает с 601°C (для ОЗМ-0) до 659°C (для ОЗМ-20). Содержание БНК не оказывает значительного влияния на остаток после окисления в интервале до 900°C, содержание которого находится в диапазоне 8.74–9.47%. Содержание Al(OH)₃ в ОЗМ составляет 9.88%. Его разложение происходит по уравнению:



При распаде образуется Al₂O₃ до содержания в ОЗМ 6.4%. Разница определяется ненулевым остатком после окисления вспененного графита в составе ОЗМ.

Что касается воспламеняемости рассматриваемых ОЗМ, то наличие БНК в них не оказывает заметного влияния на данный показатель. Для всех материалов при испытании по UL-94 затухание происходит в течение не более 1–2 с, что определяется высоким содержанием антипиренов, главным образом, окисленного графита. Установленная группа воспламеняемости для всех составов — V-0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании установлено, что в результате увеличения доли БНК в ОЗМ наблюдается снижение плотности и твердости (на 2.3 и 10%), снижение прочности на растяжение на 25% и увеличение относительного удлинения в 2.5 раза. Введение антипиренов приводит к повышению плотности, в среднем, на 12–25%, повышению твердости в 1.3–1.7 раз, к снижению прочности и относительного удлинения при растяжении в 1.8–2.1 и 1.2–1.7 раза соответственно. Исследование

огнезащитных свойств показало, что увеличение содержания каучука приводит к снижению степени вспенивания в 1.43–1.65 раз в температурном интервале от 400 до 800°C. Увеличение содержания каучука от 0 до 20% приводит к росту вязкости расплава ОЗМ в 16 раз, что сказывается на степени вспенивания. Установлено, что степень вспенивания в температурном интервале от 400 до 800°C имеет линейную зависимость от вязкости расплава ОЗМ. При введении каучука происходит повышение прочности пенококса в 4.8 раз. Термический анализ показал, что увеличение содержания каучука приводит к росту термостойкости с 222 до 236°C и стойкости к окислению вспененного графита в составе пенококса с 601 до 659°C. Содержание БНК не оказывает значительного влияния на остаток после окисления в интервале до 900°C. Его значение находится в диапазоне 8.74–9.47%. Наличие БНК в ОЗМ не оказывает заметного влияния на воспламеняемость. Установленная группа воспламеняемости для всех составов — V-0. Полученные результаты исследования имеют большой практический интерес, т.к. на их основании возможно проводить прогнозирование оптимального состава при получении интумесцентных ОЗМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарубина Л.П. *Защита зданий, сооружений и конструкций от огня и шума. Материалы, технологии, инструменты и оборудование*. М.: Инфра-Инженерия; 2015. С. 7–168.
2. Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu O. Flexible PVC flame retarded with expandable graphite. *Polym. Degrad. Stab.* 2014;100:63–69. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.024>
3. Qu H., Wu W., Xie J., Xu J. A novel intumescent flame retardant and smoke suppression system for flexible PVC. *Polym. Adv. Technol.* 2011;22(7):1174–1181. <https://doi.org/10.1002/pat.1934>
4. Халтуринский Н.А., Новиков Д.Д., Жорина Л.А., Компаниец Л.В., Рудакова Т.А. Влияние интумесцентных антипиренов на горючесть ПВХ пластикатов. *Химическая физика и мезоскопия*. 2009;11(1):22–27.
5. Галигузов А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Термостойкость огнезащитных материалов на основе ПВХ-пластикатов различного состава. *Пластические массы*. 2023;11-12:21–25. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-21-25>
6. Галигузов А.А., Сердан (мл.) А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Влияние состава ПВХ-пластиката на эксплуатационные свойства и огнезащитную эффективность полимерных материалов на его основе. *Пожаровзрывобезопасность*. 2023;32(5):26–39. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.26-39>
7. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Multiscale Experimental Approach for Developing High-Performance Intumescent Coatings. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006;45(13):4500–4508. <https://doi.org/10.1021/ie060040x>

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова, регистрационный номер АААА-А21-121011590086-0.

Acknowledgments

The study was conducted under the State Assignment of the Lomonosov Moscow State University, project АААА-А21-121011590086-0.

Вклад авторов

А.А. Галигузов — проведение экспериментальной работы, подготовка графических материалов, анализ результатов, написание отдельных разделов.

Н.В. Яшин — написание введения, планирование экспериментальной работы.

В.В. Авдеев — научное редактирование, формулировка выводов.

Authors' contributions

A.A. Galiguzov — conducting experiments, preparing graphic materials, analyzing results, writing individual sections.

N.V. Yashin — writing the introduction, planning the experiments.

V.V. Avdeev — scientific editing, formulating the conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Zarubina L.P. *Zashchita zdaniy, sooruzhenii i konstruktssii ot ognya i shuma. Materialy, tekhnologii, instrumenty i oborudovanie (Protection of Buildings, Structures, and Constructions from Fire and Noise. Materials, Technologies, Tools, and Equipment)*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2015. P. 7–168 (in Russ.).
2. Focke W.W., Muiambo H., Mhike W., Kruger H.J., Ofosu O. Flexible PVC flame retarded with expandable graphite. *Polym. Degrad. Stab.* 2014;100:63–69. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.024>
3. Qu H., Wu W., Xie J., Xu J. A novel intumescent flame retardant and smoke suppression system for flexible PVC. *Polym. Adv. Technol.* 2011;22(7):1174–1181. <https://doi.org/10.1002/pat.1934>
4. Khalturinskii N.A., Novikov D.D., Zhorina L.A., Kompaniets L.V., Rudakova T.A. The Effect of the Intumescent F.R. on the Flammability of PVC Plasticates. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya = Chemical Physics and Mesoscopics*. 2009;11(1):22–27 (in Russ.).
5. Galiguzov A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Thermal stability of fire-retardant materials based on PVC compounds of various compositions. *Plasticheskie massy*. 2023;11-12:21–25 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-21-25>
6. Galiguzov A.A., Serdan (jr.) A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Influence of PVC compound composition on the performance properties and flame retardant efficiency of polymer materials. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2023;32(5):26–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.26-39>

- Biron M. 2-Plastics Overview. In: *A Practical Guide to Plastics Sustainability. Concept, Solutions, and Implementation*. Oxford, UK: Elsevier; 2020. P. 45–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821539-5.00002-1>
- Carty P., White S. The effect of DOP plasticizer on smoke formation in poly(vinyl chloride). *Polymer*. 1992;33(5):1110–1111. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90033-S](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)90033-S)
- Tüzüm Demir A.P., Ulutan S. Migration of phthalate and non-phthalate plasticizers out of plasticized PVC films into air. *J. Appl. Polym. Sci.* 2013;128(3):1948–1961. <https://doi.org/10.1002/app.38291>
- Лавров Н.А., Белухичев Е.В. Полимерные смеси на основе поливинилхлорида (обзор). *Пластические массы*. 2020;3-4: 55–59. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59>
- George K.E., Joseph R., Francis D.J. Studies on NBR/PVC blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 1986;32(1):2867–2873. <https://doi.org/10.1002/APP.1986.070320102>
- Milner P.W. Modification of PVC with NBR. In: Whelan A., Goff J.P. (Eds.) *Developments in Plastics Technology-4*. Dordrecht, NL: Springer; 1989. P. 99–137. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1101-7_3
- Xiaojiang Z., Pu H.H., Yafei L. Morphology and properties of blended NBR/PVC/BR elastomers. *J. Polym. Sci. Part C: Polymer Letters*. 1988;26(6):255–258. <https://doi.org/10.1002/pol.1988.140260601>
- Thomas N.L., Harvey R.J. PVC/nitrile rubber blends. *Prog. Rubber Plast. Tech.* 2001;17(1):1–12. <https://doi.org/10.1177/147776060101700101>
- Perera M.C.S., Ishiaku U.S., Ishak Z.A.M. Thermal degradation of PVC/NBR and PVC/ENR50 binary blends and PVC/ENR50/NBR ternary blends studied by DMA and solid state NMR. *Polym. Degrad. Stab.* 2000;68(3):393–402. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00024-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00024-0)
- Zakrzewski G.A. Investigation of the compatibility of butadiene—acrylonitrile copolymers with poly(vinyl chloride). *Polymer*. 1973;14(8):347–351. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(73\)90018-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(73)90018-9)
- Alneamah M., Almaamori M. Study of Thermal Stability of Nitrile Rubber/Polyimide Compounds. *Int. J. Mater. Chem.* 2015;5(1):1–3. <https://doi.org/10.5923/j.ijmc.20150501.01>
- Levine Y., Chetrit E., Fishman Y., Siyum Y., Rabaev M., Fletcher A., Tartakovsky K. A novel approach to plasticizer content calculation in an acrylonitrile-butadiene rubber real-time aging study (NBR). *Polym. Test.* 2023;124:108091. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108091>
- Pappa A., Miki K., Agapiou A., Karma S., Pallis G.C., Statheropoulos M., Burke M. TG–MS analysis of nitrile butadiene rubber blends (NBR/PVC). *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2011;92(1):106–110. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.05.003>
- Choi S.-S., Han D.-H. Pyrolysis behaviors of poly(acrylonitrile-co-butadiene) with differing microstructures. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2007;80(1):53–60. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.032>
- Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. Thermal degradation of PVC: A review. *Waste Manag.* 2016;48:300–314. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.041>
- Marcilla A., García J.C., Beltrán M. 9 – Plasticization Steps. In: Wypych G. (Ed.) *Handbook of Plasticizers*. Toronto: ChemTec Publishing; 2017. P. 195–208. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-97-3.50011-1>
- Khoshnoud P., Abu-Zahra N. Kinetics of thermal decomposition of PVC/fly ash composites. *Int. J. Polym. Anal. Ch.* 2017;23(2): 170–80. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2017.1404668>
- Ye L., Li T., Hong L. Understanding enhanced char formation in the thermal decomposition of PVC resin: Role of intermolecular chlorine loss. *Mater. Today Commun.* 2021;26:102186. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102186>
- Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Multiscale Experimental Approach for Developing High-Performance Intumescent Coatings. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006;45(13):4500–4508. <https://doi.org/10.1021/ie060040x>
- Biron M. 2-Plastics Overview. In: *A Practical Guide to Plastics Sustainability. Concept, Solutions, and Implementation*. Oxford, UK: Elsevier; 2020. P. 45–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821539-5.00002-1>
- Carty P., White S. The effect of DOP plasticizer on smoke formation in poly(vinyl chloride). *Polymer*. 1992;33(5):1110–1111. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90033-S](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)90033-S)
- Tüzüm Demir A.P., Ulutan S. Migration of phthalate and non-phthalate plasticizers out of plasticized PVC films into air. *J. Appl. Polym. Sci.* 2013;128(3):1948–1961. <https://doi.org/10.1002/app.38291>
- Lavrov N.A., Belukhichev E.V. Polyvinyl chloride-based polymer blends (overview). *Пластические массы*. 2020;3-4:55–59 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59>
- George K.E., Joseph R., Francis D.J. Studies on NBR/PVC blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 1986;32(1):2867–2873. <https://doi.org/10.1002/APP.1986.070320102>
- Milner P.W. Modification of PVC with NBR. In: Whelan A., Goff J.P. (Eds.) *Developments in Plastics Technology-4*. Dordrecht, NL: Springer; 1989. P. 99–137. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1101-7_3
- Xiaojiang Z., Pu H.H., Yafei L. Morphology and properties of blended NBR/PVC/BR elastomers. *J. Polym. Sci. Part C: Polymer Letters*. 1988;26(6):255–258. <https://doi.org/10.1002/pol.1988.140260601>
- Thomas N.L., Harvey R.J. PVC/nitrile rubber blends. *Prog. Rubber Plast. Tech.* 2001;17(1):1–12. <https://doi.org/10.1177/147776060101700101>
- Perera M.C.S., Ishiaku U.S., Ishak Z.A.M. Thermal degradation of PVC/NBR and PVC/ENR50 binary blends and PVC/ENR50/NBR ternary blends studied by DMA and solid state NMR. *Polym. Degrad. Stab.* 2000;68(3):393–402. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00024-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00024-0)
- Zakrzewski G.A. Investigation of the compatibility of butadiene—acrylonitrile copolymers with poly(vinyl chloride). *Polymer*. 1973;14(8):347–351. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(73\)90018-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(73)90018-9)
- Alneamah M., Almaamori M. Study of Thermal Stability of Nitrile Rubber/Polyimide Compounds. *Int. J. Mater. Chem.* 2015;5(1):1–3. <https://doi.org/10.5923/j.ijmc.20150501.01>
- Levine Y., Chetrit E., Fishman Y., Siyum Y., Rabaev M., Fletcher A., Tartakovsky K. A novel approach to plasticizer content calculation in an acrylonitrile-butadiene rubber real-time aging study (NBR). *Polym. Test.* 2023;124:108091. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108091>
- Pappa A., Miki K., Agapiou A., Karma S., Pallis G.C., Statheropoulos M., Burke M. TG–MS analysis of nitrile butadiene rubber blends (NBR/PVC). *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2011;92(1):106–110. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.05.003>
- Choi S.-S., Han D.-H. Pyrolysis behaviors of poly(acrylonitrile-co-butadiene) with differing microstructures. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2007;80(1):53–60. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.032>
- Yu J., Sun L., Ma C., Qiao Y., Yao H. Thermal degradation of PVC: A review. *Waste Manag.* 2016;48:300–314. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.041>
- Marcilla A., García J.C., Beltrán M. 9 – Plasticization Steps. In: Wypych G. (Ed.) *Handbook of Plasticizers*. Toronto: ChemTec Publishing; 2017. P. 195–208. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-97-3.50011-1>

26. Галигузов А.А., Яшин Н.В., Авдеев В.В. Термические свойства материалов на основе этиленвинилацетата и различных антипиренов при термоокислительном разложении. *Пластические массы*. 2024;5:3–10. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-05-3-10>
27. Inagaki M., Tashiro R., Washino Y., Toyoda M. Exfoliation process of graphite via intercalation compounds with sulfuric acid. *J. Phys. Chem. Solids*. 2004;65(2-3):133–137. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2003.10.007>
28. Arogundade A.I., Megat-Yusuf P.S.M., Afolabi L.O. Evaluation of compression strength of intumescent char using ASTM 1162 00. *J. Coat. Technol. Res.* 2021;18:935–943. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00434-0>
29. Pan N., Guan D., He T., Wang R., Wyman I., Jin Y., Xia C. Removal of Th⁴⁺ ions from aqueous solutions by graphene oxide. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2013;298:1999–2008. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2660-2>
30. Salvatore M., Carotenuto G., De Nicola S., Camerlingo C., Ambrogi V., Carfagna C. Synthesis and Characterization of Highly Intercalated Graphite Bisulfate. *Nanoscale Res. Lett.* 2017;12:167. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1930-2>
31. Rimkute G., Gudaitis M., Barkauskas J., Zarkov A., Niaura G., Gaidukevic J. Synthesis and Characterization of Graphite Intercalation Compounds with Sulfuric Acid. *Crystals*. 2022;12(3):421. <https://doi.org/10.3390/cryst12030421>
32. Madejová J., Gates W.P., Petit S. 5 – IR Spectra of Clay Minerals. In: Zhuang G., Yuan P. (Eds.) *Developments in Clay Science*. Oxford, UK: Elsevier; 2017. V. 8. P. 107–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9>
33. Srinivasan S., Valsadwala A.S., Karthik D., Sukanandam D., Begum S.S. A Comparative Study on the Characteristics of Crumb Rubber with Commercial Rubbers. In: Ganippa L., Karthikeyan R., Muralidharan V. (Eds.) *Advances in Design and Thermal Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd; 2021. P. 213–220. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6428-8_15
34. Deanin R.D., Normandin R.O., Patel G.J. 13 – Filler Reinforcement of Plasticized Poly(vinyl chloride). In: Deanin R.D., Schott N.R. (Eds.) *Fillers and Reinforcements for Plastics*. York, PA, USA: The Maple Press Co.; 1974. P. 128–136. <https://doi.org/10.1021/ba-1974-0134.ch013>
35. Глазков С.С. Модель термодинамической совместимости наполнителя и полимерной матрицы в композите. *Журн. прикладной химии*. 2007;80(9):1562–1567. <https://elibrary.ru/iccmfz>
36. Huang X.D., Goh S.H. Miscibility of C60-end-capped poly(ethylene oxide) with poly(vinyl chloride). *Polymer*. 2002;43(4):1417–1421. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00705-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00705-4)
37. Guler S.H., Simsek T., Guler O., Dikici B. Possible Interaction of PVC with Micro-and Nano-fillers. In: Akhina H., Sabu T. (Eds.) *Poly(Vinyl Chloride) Based Composites and Nanocomposites. Engineering Materials*. Cham, GER: Springer; 2024. P. 335–360. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45375-5_16
38. Lu Y., Jiang N., Li X., Xu S. Effect of inorganic-organic surface modification of calcium sulfate whiskers on mechanical and thermal properties of calcium sulfate whisker/poly(vinyl chloride) composites. *RSC Adv.* 2017;7(73):46486–46498. <https://doi.org/10.1039/C7RA09193A>
39. Sato Y., Furukawa J. A molecular theory of filler reinforcement based upon the conception of internal deformation (a rough approximation of the internal deformation). *Rubber Chem. Technol.* 1963;36(4):1081–1106. <https://doi.org/10.5254/1.3539632>
40. Серенко О.А., Насруллаев И.Н., Баженов С.Л. Деформационные свойства полиэтилена средней плотности, наполненного частицами резины. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2003;45(5):759–766. <https://elibrary.ru/ooolwj>
24. Khoshnoud P., Abu-Zahra N. Kinetics of thermal decomposition of PVC/fly ash composites. *Int. J. Polym. Anal. Ch.* 2017;23(2):170–80. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2017.1404668>
25. Ye L., Li T., Hong L. Understanding enhanced char formation in the thermal decomposition of PVC resin: Role of intermolecular chlorine loss. *Mater. Today Commun.* 2021;26:102186. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102186>
26. Galiguzov A.A., Yashin N.V., Avdeev V.V. Thermal properties of materials based on ethylene vinyl acetate and various flame retardants during thermal oxidative degradation. *Пластические массы*. 2024;5:3–10 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-05-3-10>
27. Inagaki M., Tashiro R., Washino Y., Toyoda M. Exfoliation process of graphite via intercalation compounds with sulfuric acid. *J. Phys. Chem. Solids*. 2004;65(2-3):133–137. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2003.10.007>
28. Arogundade A.I., Megat-Yusuf P.S.M., Afolabi L.O. Evaluation of compression strength of intumescent char using ASTM 1162 00. *J. Coat. Technol. Res.* 2021;18:935–943. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00434-0>
29. Pan N., Guan D., He T., Wang R., Wyman I., Jin Y., Xia C. Removal of Th⁴⁺ ions from aqueous solutions by graphene oxide. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2013;298:1999–2008. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2660-2>
30. Salvatore M., Carotenuto G., De Nicola S., Camerlingo C., Ambrogi V., Carfagna C. Synthesis and Characterization of Highly Intercalated Graphite Bisulfate. *Nanoscale Res. Lett.* 2017;12:167. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1930-2>
31. Rimkute G., Gudaitis M., Barkauskas J., Zarkov A., Niaura G., Gaidukevic J. Synthesis and Characterization of Graphite Intercalation Compounds with Sulfuric Acid. *Crystals*. 2022;12(3):421. <https://doi.org/10.3390/cryst12030421>
32. Madejová J., Gates W.P., Petit S. 5 – IR Spectra of Clay Minerals. In: Zhuang G., Yuan P. (Eds.) *Developments in Clay Science*. Oxford, UK: Elsevier; 2017. V. 8. P. 107–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9>
33. Srinivasan S., Valsadwala A.S., Karthik D., Sukanandam D., Begum S.S. A Comparative Study on the Characteristics of Crumb Rubber with Commercial Rubbers. In: Ganippa L., Karthikeyan R., Muralidharan V. (Eds.) *Advances in Design and Thermal Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd; 2021. P. 213–220. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6428-8_15
34. Deanin R.D., Normandin R.O., Patel G.J. 13 – Filler Reinforcement of Plasticized Poly(vinyl chloride). In: Deanin R.D., Schott N.R. (Eds.) *Fillers and Reinforcements for Plastics*. York, PA, USA: The Maple Press Co.; 1974. P. 128–136. <https://doi.org/10.1021/ba-1974-0134.ch013>
35. Глазков С.С. A model of thermodynamic compatibility of the filler with the polymeric matrix in a composite. *Russ. J. Appl. Chem.* 2007;80(9):1594–1597. <https://doi.org/10.1134/S1070427207090297>
[Original Russian Text: Глазков С.С. A model of thermodynamic compatibility of the filler with the polymeric matrix in a composite. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2007;80(9):1562–1567 (in Russ.). <https://elibrary.ru/iccmfz>]
36. Huang X.D., Goh S.H. Miscibility of C60-end-capped poly(ethylene oxide) with poly(vinyl chloride). *Polymer*. 2002;43(4):1417–1421. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00705-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00705-4)
37. Guler S.H., Simsek T., Guler O., Dikici B. Possible Interaction of PVC with Micro-and Nano-fillers. In: Akhina H., Sabu T. (Eds.) *Poly(Vinyl Chloride) Based Composites and Nanocomposites. Engineering Materials*. Cham, GER: Springer; 2024. P. 335–360. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45375-5_16

41. Серенко О.А., Баженов С.Л., Насруллаев И.Н., Берлин А.А. Влияние размера частиц на форму образующихся дефектов в дисперсно наполненном композите. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2005;47(1): 64–72. <https://elibrary.ru/hsafln>
42. Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов. *Пожаровзрывобезопасность*. 2020;29(5):71–81. <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.05.71-81>
43. Pruneda F., Suñol J., Andreu-Mateu F., Colom X. Thermal characterization of nitrile butadiene rubber (NBR)/PVC blends. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2005;80:187–190. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0634-5>
38. Lu Y., Jiang N., Li X., Xu S. Effect of inorganic-organic surface modification of calcium sulfate whiskers on mechanical and thermal properties of calcium sulfate whisker/poly(vinyl chloride) composites. *RSC Adv.* 2017;7(73):46486–46498. <https://doi.org/10.1039/C7RA09193A>
39. Sato Y., Furakawa J. A molecular theory of filler reinforcement based upon the conception of internal deformation (a rough approximation of the internal deformation). *Rubber Chem. Technol.* 1963;36(4):1081–1106. <https://doi.org/10.5254/1.3539632>
40. Serenko O.A., Nasrullaev I.N., Bazhenov S.L. The stress-strain properties of medium-density polyethylene filled with rubber particles. *Polym. Sci. Ser. A*. 2003;45(5):450–455. <https://elibrary.ru/libasv>
[Original Russian Text: Serenko O.A., Nasrullaev I.N., Bazhenov S.L. The stress-strain properties of medium-density polyethylene filled with rubber particles. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2003;45(5):759–766 (in Russ.). <https://elibrary.ru/oojlvj>]
41. Serenko O.A., Bazhenov S.L., Nasrullaev I.N., Berlin A.A. The effect of particle dimensions on the shape of formed defects in a particulate filled composite. *Polym. Sci. Ser. A*. 2005;47(1):49–56. <https://elibrary.ru/ljaxth>
[Original Russian Text: Serenko O.A., Bazhenov S.L., Nasrullaev I.N., Berlin A.A. The effect of particle dimensions on the shape of formed defects in a particulate filled composite. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2005;47(1): 64–72 (in Russ.). <https://elibrary.ru/hsafln>]
42. Arkhangelsky I.V., Godunov I.A., Yashin N.V., Naganovskii Yu.K., Shornikova O.N. The kinetics of intumescent flame retardant foaming. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2020;29(5):71–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.05.71-81>
43. Pruneda F., Suñol J., Andreu-Mateu F., Colom X. Thermal characterization of nitrile butadiene rubber (NBR)/PVC blends. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2005;80:187–190. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0634-5>

Об авторах

Галигузов Андрей Анатольевич, младший научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, Химический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 11). E-mail: agaliguzov@yandex.ru. Scopus Author ID 55362650300, SPIN-код РИНЦ 4148-9040, <https://orcid.org/0000-0002-5675-3891>

Яшин Николай Владимирович, д.х.н., старший научный сотрудник, кафедра химической технологии и новых материалов, Химический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 11). E-mail: yashin.ni.v@gmail.com. Scopus Author ID 6602800878, ResearcherID D-8087-2015, SPIN-код РИНЦ 3248-5409, <https://orcid.org/0000-0002-2232-8192>

Авдеев Виктор Васильевич, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой химической технологии и новых материалов, Химический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 11). E-mail: avdeev@highp.chem.msu.ru. Scopus Author ID 7005990761, <https://orcid.org/0000-0001-5573-2987>

About the Authors

Andrey A. Galiguzov, Junior Researcher, Department of Chemical Technology and New Materials, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (1/11, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia). E-mail: agaliguzov@yandex.ru. Scopus Author ID 55362650300, RSCI SPIN-code 4148-9040, <https://orcid.org/0000-0002-5675-3891>

Nikolay V. Yashin, Dr. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Department of Chemical Technology and New Materials, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (1/11, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia). E-mail: yashin.ni.v@gmail.com. Scopus Author ID 6602800878, ResearcherID D-8087-2015, RSCI SPIN-code 3248-5409, <https://orcid.org/0000-0002-2232-8192>

Viktor V. Avdeev, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of Chemical Technology and New Materials, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (1/11, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia). E-mail: avdeev@highp.chem.msu.ru. Scopus Author ID 7005990761, <https://orcid.org/0000-0001-5573-2987>