

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 5–12
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):5-12

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12>

Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны

Екатерина Валерьевна Головина¹✉, Андрей Владимирович Калач^{2, 3}

¹Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение средств огнезащиты на нефтегазовых предприятиях, расположенных в Арктическом регионе, требует особого подхода к оценке их огнезащитной эффективности. Прежде всего, испытания необходимо проводить в условиях углеводородного температурного режима, вероятность развития которого весьма высока на объектах хранения и переработки нефти и газа. Углеводородный режим пожара характеризуется резким ростом температуры (в течение 5 мин температура может достигнуть 1100 °С) и возникновением избыточного давления.

Целью исследования является выбор огнезащитного терморасширяющегося покрытия для возможности применения на объектах нефтегазовой отрасли в Арктической зоне. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведение испытаний огнезащитной эффективности терморасширяющихся материалов на основе водной дисперсии, акрилового, эпоксидного и силиконового связующего;
- сравнительный анализ огнезащитных свойств исследуемых интумесцентных композиций.

Методология. В соответствии с ГОСТ 1363-2-2014 и ГОСТ 53295-2009 были проведены испытания на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима. Исследования проводились на универсальной установке для испытаний на огнезащитную эффективность средств огнезащиты и огнестойкость строительных конструкций и заполнения проемов, аттестованной как для стандартного температурного режима по ГОСТ 30.247.0-94, так и для углеводородного температурного режима по ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014.

Результаты. В результате проведенных исследований были получены значения достижения критической температуры (500 °С) образцами с нанесенными на них огнезащитными покрытиями.

Выводы. На основе экспериментальных исследований проведен сравнительный анализ огнезащитных свойств интумесцентных композиций. Сделан вывод о приоритетном выборе огнезащитных терморасширяющихся составов на основе эпоксидных смол для промышленных объектов, расположенных в Арктическом регионе.

Ключевые слова: огнезащитная эффективность; вспучивающийся огнезащитный состав; углеводородный температурный режим; предел огнестойкости; объект нефтегазовой отрасли; огнезащитное покрытие

Для цитирования: Головина Е.В., Калач А.В. Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12

✉ Головина Екатерина Валерьевна, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in climatic conditions of the Arctic zone

Ekaterina V. Golovina¹✉, Andrey V. Kalach^{2, 3}

¹Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

³Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The application of fire protection products at oil and gas enterprises located in the Arctic region requires a special approach to the assessment of their fire-retardant efficiency. First of all, it is necessary to conduct the tests under conditions of a hydrocarbon temperature regime, the probability of development of which is very high at oil and gas storage and processing facilities. The hydrocarbon fire regime is characterized by a sharp temperature rise (within 5 minutes the temperature can reach 1,100 °C) and the occurrence of overpressure.

The purpose of the research is the choice of a flame-retardant thermally expanding coating for the possibility of application at the objects of oil and gas industry in the Arctic zone. To achieve this goal, the following tasks were solved:

- testing flame-retardant effectiveness of thermally expanding materials based on water dispersion, acrylic, epoxy and silicone binder;
- comparative analysis of flame retardant properties of studied intumescent compositions.

Methodology. In accordance with GOST 1363-2-2014 and GOST 53295-2009, tests for fire-retardant efficiency under hydrocarbon temperature conditions were carried out. The research was carried out on the universal installation for testing the fire-retardant efficiency of fire protection means and fire resistance of building structures and filling openings, certified both for the standard temperature regime according to GOST 30.247.0-94 and for the hydrocarbon temperature regime according to GOST R EN 1363-2-2014.

Results. As a result of the conducted research, the values of reaching the critical temperature (500 °C) by the samples with fire-resistant coatings applied to them were obtained.

Conclusions. Based on experimental studies, a comparative analysis of the flame retardant properties of intumescent compositions was carried out. The conclusion is made about the priority choice of flame-retardant thermo-expanding compositions based on epoxy resins for industrial facilities located in the Arctic region.

Keywords: flame retardant efficiency; intumescent flame retardant composition; hydrocarbon temperature regime; fire resistance limit; oil and gas industry object; flame retardant coating

For citation: Golovina E.V., Kalach A.V. Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in climatic conditions of the Arctic zone. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12 (rus).

✉ Ekaterina Valeryevna Golovina, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Введение

Ингибирование процессов горения имеет значительную практическую значимость для предотвращения и тушения пожаров [1, 2]. Огнезащитные составы, как правило, используются в качестве добавок для повышения стойкости к воспламенению и уменьшения распространения пламени без существенного влияния на их свойства [3, 4]. Такие огнезащитные составы способствуют образованию продуктов разложения в газовой фазе с эффектом тушения пламени, но также способствуют появлению защитного покрытия на поверхности материала [5–7]. Добавка ингибирующих компонентов позволяет снижать вероятность воспламенения материала и замедляет распространение пламени, что обеспечивает большее время для эвакуации или проведения мероприятий по тушению пожара [8–11].

Необходимо отметить, что предыдущие исследования в области огнезащитных составов [12–14] были в основном сосредоточены на поиске подходящих химических компонентов, отвечающих определенным критериям, таким как подавление пламени, и не учитывали негативное влияние на объекты окружающей среды.

Применение средств огнезащиты на нефтегазовых предприятиях, расположенных в Арктическом регионе, требует особого подхода к оценке их огне-

защитной эффективности. Исследование географических и климатических особенностей Арктического региона позволило выделить ключевые моменты, характеризующие специфику промышленных объектов, расположенных в арктических районах, главными из которых являются:

- длительный сезон с отрицательными среднесуточными температурами: годовая разница температур (июль и январь) колеблется от 40–41 до 53 °C;
- влажность атмосферы воздуха арктических районов, что сказывается на коррозионной стойкости применяемых огнезащитных материалов. Следовательно, огнезащитные средства, применяемые в арктических районах, должны соответствовать следующим требованиям [13]:
- возможность нанесения при отрицательных температурах и в условиях повышенной влажности;
- работоспособность и сохранение характеристик прочности при температурах от –50 до –75 °C.

Также испытания необходимо проводить в условиях углеводородного температурного режима, вероятность развития которого весьма высока на объектах хранения и переработки нефти и газа. Углеводородный режим пожара характеризуется резким ростом температуры (в течение 5 мин температура может достигнуть 1100 °C) и возникновением избыточного давления.

Методология

В качестве объектов исследования оценки огнезащитной эффективности были выбраны терморасширяющиеся огнезащитные составы (далее — ОЗС) разной химической природы, характеристики которых, согласно технической документации, соответствуют специфике промышленных объектов, расположенных в арктических районах. Покрытия наносились по схеме в соответствии с технической документацией (табл. 1):

- грунтовочный слой + огнезащитный материал — для эпоксидных и силиконовых ОЗС;
- грунтовочный слой + огнезащитный материал + + покрывной финишный слой — для водных и акриловых ОЗС [15–18].

В качестве образцов использовались стальные колонны двутаврового сечения с приведенной толщиной металла 3,4 мм. Подготовка поверхности металла перед окрашиванием заключалась в уда-

Таблица 1. Толщины систем покрытий образцов для испытаний на огнезащитную эффективность

Table 1. Thicknesses of coating systems of samples for fire-retardant efficiency tests

Вид ОЗС Type of FRC	Номер образца Number of sample	Толщина грунтовочного слоя, мм The thickness of the primer layer, mm	Толщина огнезащитного материала, мм The thickness of the flame retardant material, mm	Толщина финишного слоя, мм Thickness of the finishing layer, mm	Общая толщина, мм Total thickness, mm
ОЗС на силиконовой основе Silicone-based FRC	1.1	0,6–0,7	4,4	–	5,0
	1.2		4,1		5,1
	1.3		4,1		4,7
ОЗС на эпоксидной основе Epoxy-based FRC	2.1	0,6–0,7	3,8	–	4,4
	2.2		3,9		4,5
	2.3		3,7		4,4
ОЗС на акриловой основе FRC based on acrylic	3.1	0,6–0,7	3,5	1,3	5,4
	3.2		3,8	1,5	5,9
	3.3		3,6	1,2	5,4
ОЗС на водной основе Water-based FRC	4.1	0,6–0,7	4,0	1,5	6,1
	4.2		4,0	1,4	6,0
	4.3		3,8	1,1	5,5

лении жировых загрязнений и абразивоструйной обработке до степени Sa 2 ½ в соответствии с ГОСТ 9.402–2004¹. Покрытия нанесены методом пневматического распыления. Сушка покрытий естественная при температуре 18–20 °С и относительной влажности 15–20 %. Толщины покрытий измерены магнитным толщиномером Minitest 600 В (см. табл. 1).

В соответствии с ГОСТ 1363-2–2014² и ГОСТ 53295–2009³ были проведены испытания на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима на установке для огневых испытаний для каждого огнезащитного покрытия.

Сущность метода заключается в тепловом воздействии на опытный образец с нанесенным покрытием и определении времени от начала теплового воздействия до наступления предельного состояния опытного образца. Температура на поверхности образца измеряется с помощью термопар, изготовленных из провода диаметром не более 0,75 мм, которые устанавливаются методом зачеканивания на необогреваемую поверхность образца в количестве трех штук. Одна из термопар устанавливается в центре образца, а две другие — по диагонали на расстоянии 200 ± 5 мм от центра.

Температура металла испытываемого образца рассчитывается как среднее арифметическое значение показаний термопар, расположенных в установленных местах.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с ГОСТ 53295–2009³, за результат принимается время достижения образцом предельного состояния. За предельное состояние принимается достижение металлом опытного образца критической температуры, равной 500 °С (среднее значение по показаниям трех термопар), как это предписано в ГОСТ 53295–2009.

Результаты исследований ОЗС на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима графически представлены на рис. 1–4.

Сравнительный анализ результатов, полученных при исследовании ОЗС разной химической природы в условиях углеводородного температурного режима, приведен в табл. 2.

¹ ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.

² ГОСТ 1363-2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость.

³ ГОСТ 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности.

Таблица 2. Результаты испытаний ОЗС на огнезащитную эффективность в условиях углеводородного температурного режима**Table 2.** The results of tests of the FRC for fire-retardant efficiency in the conditions of a hydrocarbon temperature regime

Показатель Indicator	ОЗС на силиконовой основе Silicone-based FRC			ОЗС на эпоксидной основе Epoxy-based FRC			ОЗС на акриловой основе FRC based on acrylic			ОЗС на водной основе Water-based FRC		
Номер образца Number of sample	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
$\tau_{кр}$, мин τ_{cr} , min	34	34	30	49	53	47	21	24	19	15	14	13
$\tau_{ср}$, мин τ_{mean} , min	33			50			21			14		

Примечание: $\tau_{кр}$ — время достижения критической температуры (500 °C) металлической конструкции; $\tau_{ср}$ — среднее значение времени достижения критической температуры металлической конструкцией.

Note: τ_{cr} — is the time to reach the critical temperature (500 °C) by a metal structure; τ_{mean} — is the average value of the time to reach the critical temperature by a metal structure.

В соответствии с данными табл. 2, наименьшее время достижения критической температуры образца наблюдается у композиций на основе водной дисперсии — от 13 до 15 мин. Наибольшее время $\tau_{кр}$ показали составы на основе эпоксидных смол — $\tau_{ср}$ составляет 50 мин. Время достижения критической температуры металлической конструкцией для акриловых огнезащитных композиций составляет от 19 до 24 мин. В то же время при проведении испытаний акриловых и эпоксидных ОЗС наблюдается схожесть поведения огнезащитного покрытия: при 5 мин от начала испытаний анализируемые материалы достигают температуры

200–250 °C, что соответствует процессу образования пенококса в интумесцентных системах (см. рис. 1, 3). В дальнейшем у акриловых ОЗС отмечается быстрый рост температуры защищаемой конструкции, что свидетельствует о низкой огнезащитной способности образовавшегося вспученного слоя [19, 20].

В процессе исследования на огнезащитную эффективность силиконовых композиций температура металлоконструкции не превышает 130 °C в течение 15 мин от начала испытаний (см. рис. 2). Достижение температуры 350 °C длится 10 мин и затем наблюдается рост температуры до 500 °C.

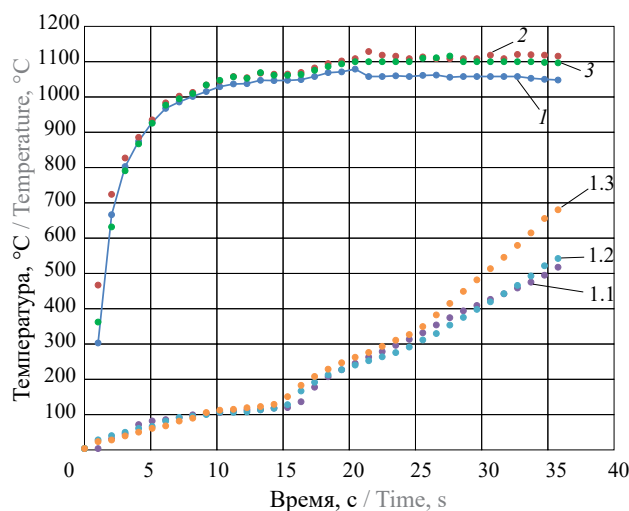


Рис. 1. Результаты испытаний ОЗС на силиконовой основе на огнезащитную эффективность: 1.1, 1.2, 1.3 — анализируемые образцы на силиконовой основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 1.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 1.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 1.3

Fig. 1. Results of tests of silicone-based FRC for fire-retardant efficiency: 1.1, 1.2, 1.3 — analyzed silicone-based samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 1.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 1.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 1.3

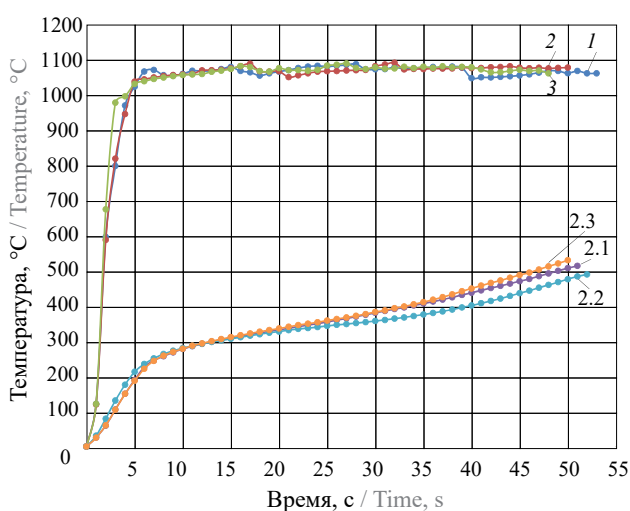


Рис. 2. Результаты испытаний ОЗС на основе эпоксидных смол на огнезащитную эффективность: 2.1, 2.2, 2.3 — анализируемые образцы на эпоксидной основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 2.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 2.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 2.3

Fig. 2. The results of tests of FRC based on epoxy resins for fire-retardant efficiency: 2.1, 2.2, 2.3 — analyzed epoxy-based samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 2.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 2.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 2.3

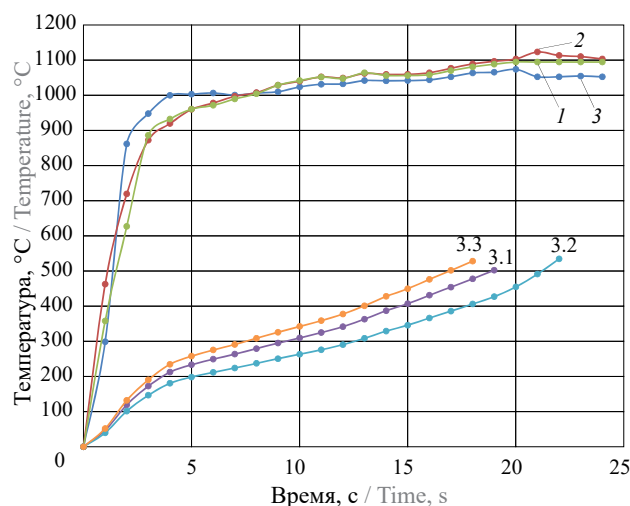


Рис. 3. Результаты испытаний ОЗС на основе акриловой дисперсии на огнезащитную эффективность: 3.1, 3.2, 3.3 — анализируемые образцы на акриловой основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 3.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 3.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 3.3

Fig. 3. The results of tests of the FRC based on acrylic dispersion for fire-retardant efficiency: 3.1, 3.2, 3.3 — analyzed acrylic-based samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 3.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 3.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 3.3

Выводы

Таким образом, экспериментально установлено, что огнезащитный терморасширяющийся материал на основе эпоксидных смол обладает наибольшей огнезащитной эффективностью. В сравнении с силиконовым ОЗС анализируемые эпоксидные составы на 34 % эффективнее покрытий на основе силиконового связующего и на 72 % эффективнее композиций на основе водной дисперсии. Это связано с тем, что в условиях углеводородного режима горения происходит резкий скачок температуры до 1100 °С, в связи с чем матрицы, состоящие из полимеров-термопластов, начинают плавиться, и, как следствие, происходит стекание композиции с защищаемой поверхности, в то время как олигомеры, содержащие эпоксидные группы (эпоксиды), способны создать условия для сохранения огнезащитного состава на металлоконструкции до достижения температуры формирования пенококсового слоя. Именно бла-

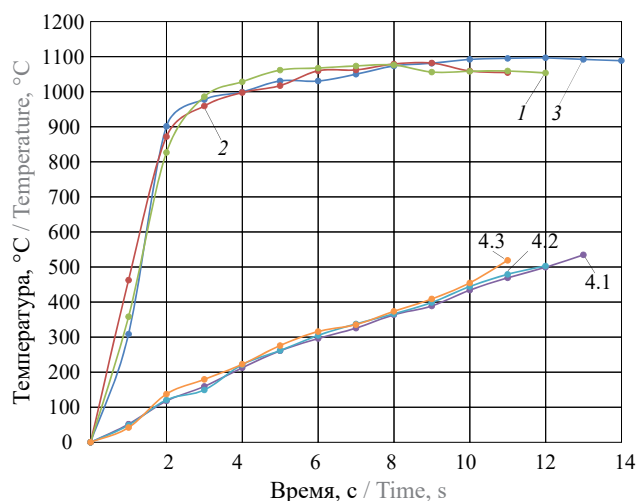


Рис. 4. Результаты испытаний ОЗС на основе водной дисперсии на огнезащитную эффективность: 4.1, 4.2, 4.3 — анализируемые образцы на водной основе; 1 — кривая углеводородного режима для образца 4.1; 2 — кривая углеводородного режима для образца 4.2; 3 — кривая углеводородного режима для образца 4.3

Fig. 4. The results of tests of the FRC based on water dispersion for fire-retardant efficiency: 4.1, 4.2, 4.3 — analyzed water samples; 1 — hydrocarbon mode curve for sample 4.1; 2 — hydrocarbon mode curve for sample 4.2; 3 — hydrocarbon mode curve for sample 4.3

годаря образовавшемуся пенококсу происходит обеспечение необходимого уровня огнезащитной эффективности металлических конструкций промышленных объектов в условиях не только стандартного, но и углеводородного горения.

В соответствии с технической документацией испытуемые ОЗС на основе эпоксидных смол удовлетворяют требованиям, необходимым для применения в условиях Арктического региона, указанных выше (возможность нанесения при отрицательных температурах, сохранение эксплуатационных характеристик в условиях низких температур), а также производитель заявляет о повышенной износостойкости, хорошей адгезии материалов при взаимодействии с осадками.

Таким образом, на объектах нефтегазовой отрасли в условиях Арктической зоны целесообразно применение огнезащитных вспучивающихся составов на основе эпоксидного связующего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Masri A.R. Chemical inhibition of nonpremixed flames of hydrocarbon fuels with CF Br // *Combustion Science and Technology*. 1994. Vol. 96 (4–6). Pp. 189–212. DOI: 10.1080/00102209408935355
2. Wang L., Jiang Y., Qiu R. Experimental study of combustion inhibition by trimethyl phosphate in turbulent premixed methane/air flames using OH-PLIF // *Fuel*. 2021. Vol. 294. P. 120324. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120324
3. Green J. Mechanisms for flame retardancy and smoke suppression : a review // *Journal of Fire Sciences*. 1996. Vol. 14 (6). Pp. 426–442. DOI: 10.1177/073490419601400602

4. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю., Калач А.В., Шаранов С.В., Калач Е.В. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 12. С. 14–24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12
5. Schmitt E. Phosphorus-based flame retardants for thermoplastics // *Plastics Additives and Compounding*. 2007. Vol. 9(3). Pp. 26–30. DOI: 10.1016/S1464-391X(07)70067-3
6. Kahraman M., Kizilcan N. Investigation of flame retardancy properties of polypropylene-colemanite and intumescent flame retardant additive blends // *Synthesis and Sintering*. 2022. Vol. 2. Pp. 110–119. DOI: 10.53063/synsint.2022.2397
7. Isitman N.A., Doğan M., Bayramlı E., Kaynak C. Fire retardant properties of intumescent polypropylene composites filled with calcium carbonate // *Polymer Engineering Science*. 2011. Vol. 51. Pp. 875–883. DOI: 10.1002/pen.21901
8. Steinhäuser M., Ferraro F., Schneider M., Zentgraf F., Greifenstein M., Dreizler A. et al. Effect of flame retardants on side-wall quenching of partially premixed laminar flames // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2022. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.207
9. Liu B.W., Zhao H.B., Wang Y.Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials // *AdvMater*. 2022. Vol. 4 (46). DOI: 10.1002/adma.202107905
10. Eremina T., Korolchenko D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions // *Buildings*. 2020. Vol. 10. P. 185. DOI: 10.3390/buildings10100185
11. Архангельский И.В., Годунов И.А., Яшин Н.В., Нагановский Ю.К., Шорникова О.Н. Кинетика вспенивания терморасширяющихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 71–81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81
12. Головина Е.В., Калач А.В., Беззапонная О.В., Крутолапов А.С., Шаранов С.В. Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов. Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 24–33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33
13. Головина Е.В., Калач А.В. Анализ средств огнезащиты стальных конструкций нефтегазового комплекса для климатических условий Арктического региона : монография. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2023. 122 с.
14. Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al. Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers // *Polymers (Basel)*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/polym14142911
15. Головина Е.В. Оценка эффективности современных средств огнезащиты стальных конструкций для объектов нефтегазовой отрасли в условиях Арктического региона // Техносферная безопасность. 2022. № 2 (35). С. 46–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49053202>
16. Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72
17. Kim J.H., Baeg D.Y., Seo J.K. Numerical investigation of residual strength of steel stiffened panel exposed to hydrocarbon fire // *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2021. Vol. 35. Pp. 203–215. DOI: 10.26748/KSOE.2021.008
18. Cirpici K.B., Wang Y.C., Rogers B.D. An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions // *Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey, September 21–23, 2016. Pp. 1–8.
19. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927>
20. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония : литературный обзор // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209813>

REFERENCES

1. Masri A.R. Chemical inhibition of nonpremixed flames of hydrocarbon fuels with CF Br. *Combustion Science and Technology*. 1994; 96(4-6):189-212. DOI: 10.1080/00102209408935355
2. Wang L., Jiang Y., Qiu R. Experimental study of combustion inhibition by trimethyl phosphate in turbulent premixed methane/air flames using OH-PLIF. *Fuel*. 2021; 294:120324. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120324
3. Green J. Mechanisms for flame retardancy and smoke suppression : a review. *Journal of Fire Sciences*. 1996; 14(6):426-442. DOI: 10.1177/073490419601400602

4. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu., Kalach A.V., Sharapov S.V., Kalach E.V. Ways of improving the fire protecting thermal expanding compositions for use in oil and gas industry. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(12):14-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24 (rus).
5. Schmitt E. Phosphorus-based flame retardants for thermoplastics. *Plastics Additives and Compounding*. 2007; 9(3):26-30. DOI: 10.1016/S1464-391X(07)70067-3
6. Kahraman M., Kizilcan N. Investigation of flame retardancy properties of polypropylene-colemanite and intumescent flame retardant additive blends. *Synthesis and Sintering*. 2022; 2:110-119. DOI: 10.53063/synsint.2022.2397
7. Isitman N.A., Doğan M., Bayramlı E., Kaynak C. Fire retardant properties of intumescent polypropylene composites filled with calcium carbonate. *Polymer Engineering Science*. 2011; 51:875-883. DOI: 10.1002/pen.21901
8. Steinhäuser M., Ferraro F., Schneider M., Zentgraf F., Greifenstein M., Dreizler A. et al. Effect of flame retardants on side-wall quenching of partially premixed laminar flames. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2022. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.207
9. Liu B.W., Zhao H.B., Wang Y.Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials. *AdvMater*. 2022; 4(46). DOI: 10.1002/adma.202107905
10. Eremina T., Korolchenko D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions. *Buildings*. 2020; 10:185. DOI: 10.3390/buildings10100185
11. Arkhangelsky I.V., Godunov I.A., Yashin N.V., Naganovsky Yu.K., Shornikova O.N. Kinetics of foaming of thermally expanding flame retardants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):71-81. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.71-81 (rus).
12. Golovina E.V., Kalach A.V., Bezzaponnaya O.V., Krutolapov A.S., Sharapov S.V. Improving the safety of oil and gas facilities by improving flame retardants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):24-33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33 (rus).
13. Golovina E.V., Kalach A.V. *Analysis of fire protection means of steel structures of the oil and gas complex for climatic conditions of the Arctic region : monograph*. Yekaterinburg, 2023; 122. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50260792> (rus).
14. Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al. Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers. *Polymers (Basel)*. 2022; 14. DOI: 10.3390/polym14142911
15. Golovina E.V. Evaluation of the effectiveness of modern means of fire protection of steel structures for oil and gas industry facilities in the Arctic region. *Technosphere Safety*. 2022; 2(35):46-55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49053202> (rus).
16. Puzach S.V., Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Determination of the actual fire resistance limits of steel structures taking into account the real fire load. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):61-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72 (rus).
17. Kim J.H., Baeg D.Y., Seo J.K. Numerical investigation of residual strength of steel stiffened panel exposed to hydrocarbon fire. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2021; 35:203-215. DOI: 10.26748/KSOE.2021.008
18. Cirpici K.B., Wang Y.C., Rogers B.D. An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions. *Conference: 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*. 2016; 1-8.
19. Khalturinsky N.A., Krupkin V.G. On the mechanism of formation of flame-retardant swelling coatings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(10):33-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
20. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate : review of the literature. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(8):11-58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209813> (rus).

Поступила 14.03.2023, после доработки 25.10.2023;

принята к публикации 02.11.2023

Received March 14, 2023; Received in revised form October 25, 2023;

Accepted November 2, 2023

Информация об авторах

ГОЛОВИНА Екатерина Валерьевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Information about the authors

Ekaterina V. GOLOVINA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Yekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RISC: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

КАЛАЧ Андрей Владимирович, д-р хим. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1а; РИНЦ ID: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Andrey V. KALACH, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh State Technical University, 20th Anniversary of October St., 84, Voronezh, 394006, Russian Federation; Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Irkutskaya St., 1a, Voronezh, 394072, Russian Federation; ID RISC: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

Contribution of the authors: *the authors contributed equally to this article.*
The authors declare no conflicts of interests.