

Повышение безопасности объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования огнезащитных составов

Екатерина Валерьевна Головина¹, Андрей Владимирович Калач^{2,3}✉,
Оксана Владимировна Беззапнная¹, Александр Сергеевич Крутолапов⁴,
Сергей Владимирович Шарапов⁴

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

⁴Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из способов снижения пожарной опасности промышленных объектов является нанесение вспучивающихся огнезащитных покрытий. Известно, что огнезащитные интумесцентные составы являются многокомпонентными композиционными материалами, эффективность которых обусловлена сложными химическими превращениями между компонентами исследуемого огнезащитного материала при воздействии высоких температур. В связи с этим проблема исследования физико-химических процессов и теплофизических характеристик огнезащитных терморасширяющихся материалов является востребованной и актуальной.

Целью настоящей статьи является анализ теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся составов на водной и акриловой основах для повышения безопасности объектов нефтегазового комплекса.

Для реализации данной цели были решены следующие задачи:

- исследование методами термического анализа огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе акриловой дисперсии;
- анализ огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе водной дисперсии методами термического анализа;
- сравнительный анализ термоокислительной деструкции исследуемых огнезащитных материалов.

Методы. При проведении исследования основными методами были выбраны термогравиметрический анализ, дифференциально-термогравиметрический анализ, дифференциально-сканирующая калориметрия, метод квадрупольной масс-спектрометрии.

Результаты. В результате исследований методами синхронного термического анализа огнезащитных составов интумесцентного типа на акриловой и водной основах обнаружено сходство протекающих физико-химических процессов: наличие четырех основных этапов потери массы и высокий экзотермический эффект. Высокое значение теплового эффекта реакции свидетельствует о высокой горючести исследуемых огнезащитных материалов.

Выводы. На основании проведенного анализа сделан вывод, что огнезащитные составы интумесцентного типа на основе акриловой винилацетатной эмульсии и на основе водной дисперсии начинают утрачивать необходимые для огнезащитного материала эксплуатационные качества при достижении температуры ~600 °С.

Ключевые слова: пассивная огнезащита; вспучивающийся огнезащитный состав; промышленный объект; термогравиметрический анализ; дифференциально-термогравиметрический анализ; дифференциально-сканирующая калориметрия; метод квадрупольной масс-спектрометрии

Для цитирования: Головина Е.В., Калач А.В., Беззапнная О.В., Крутолапов А.С., Шарапов 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

✉ Калач Андрей Владимирович, e-mail: a_kalach@mail.ru

Improving the safety of oil and gas facilities by improving flame retardants

Ekaterina V. Golovina¹, Andrey V. Kalach^{2,3} ✉, Oksana V. Bezzaponnaya¹, Alexander S. Krutolapov⁴, Sergey V. Sharapov⁴

¹ 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, Yekaterinburg, Russian Federation

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

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

⁴ Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the ways to reduce the fire hazard at industrial facilities is the application of intumescent coatings. It is known that intumescent compositions are multicomponent composite materials, whose effectiveness is due to complex chemical transformations of the components of the studied flame retardant exposed to high temperatures. In this regard, the problem of studying the physicochemical processes and thermophysical characteristics of flame retardant thermal expansion materials is in demand and relevant.

The purpose of this article is to analyze the thermophysical properties of water- and acrylic compound-based intumescent flame retardants to improve the safety of oil and gas facilities.

To accomplish this purpose, the following objectives were attained:

- studying acrylic dispersion-based intumescent flame retardant materials using methods of thermal analysis;
- analyzing aqueous dispersion-based intumescent flame retardant materials using methods of thermal analysis;
- making a comparative analysis of the thermo-oxidative degradation of the studied flame retardant materials.

Methods. During the study, thermogravimetric analysis, differential thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, and quadrupole mass spectrometry were chosen as the main methods.

Results. As a result of the studies performed using methods of synchronous thermal analysis of water- and acrylic compound-based intumescent flame retardants, the similarity of ongoing physicochemical processes was identified, including the presence of four main stages of mass loss and a high exothermic effect. This high thermal effect has proven high flammability of the studied flame retardant materials.

Conclusions. Following the analysis, the authors have concluded that intumescent flame retardants, containing acrylic vinyl acetate emulsion and aqueous dispersion, begin to lose their performance characteristics, necessary for a flame retardant material, when the temperature reaches approximately ~600 °C.

Keywords: passive fire protection; intumescent flame retardant; industrial facility; thermogravimetric analysis; differential thermogravimetric analysis; differential scanning calorimetry; quadrupole mass spectrometry method

For citation: 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):24-33. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.24-33 (rus).

✉ Andrey Vladimirovich Kalach, e-mail: a_kalach@mail.ru

Введение

Одним из способов снижения пожарной опасности промышленных объектов нефтегазового комплекса является нанесение вспучивающихся огнезащитных покрытий.

Для снижения разрушительных последствий пожаров современным исследователям необходимо постоянно расширять знания о теплофизических характеристиках огнезащитных материалов, прежде всего о теплопроводности, теплоемкости, термостойкости, тепловых эффектах физико-химических процессов.

В связи с этим проблема исследования физико-химических процессов и теплофизических характеристик огнезащитных терморасширяющихся

материалов является востребованной и актуальной. Огнезащитные интумесцентные составы являются многокомпонентными композиционными материалами, эффективность которых обусловлена сложными химическими превращениями между компонентами исследуемого огнезащитного материала при воздействии высоких температур.

Эффективным методом исследования теплофизических свойств огнезащитных материалов является метод синхронного термического анализа в связи с тем, что для проведения испытаний данным методом требуется малое количество исследуемого материала, быстрота получения результатов, точность проведенных исследований и относительно малая экономическая стоимость [1].

Целью настоящей статьи является анализ теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся составов на водной и акриловой основах для повышения безопасности объектов нефтегазового комплекса.

Для реализации данной цели были решены следующие задачи:

- исследование методами термического анализа огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе акриловой дисперсии;
- анализ огнезащитных материалов интумесцентного типа на основе водной дисперсии методами термического анализа;
- сравнительный анализ термоокислительной деструкции исследуемых огнезащитных материалов.

Материалы и методы

При проведении исследования основными методами были термогравиметрический анализ (ТГ), дифференциально-термогравиметрический анализ (ДТГ), дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), метод квадрупольной масс-спектрометрии [2–6].

Испытания методами синхронного термического анализа проводились с помощью синхронного термического анализатора STA 449 F 5 Jupiter («Netzsch» Германия), который внесен в Государственный

реестр средств измерений и имеет сертификат об утверждении типа средств измерений. Исследования проводились в платиновых тиглях (Pt/Rh), в среде воздуха (скорость подачи газа 75 мл/мин), со скоростью нагрева 20 °С/мин, ДСК держатель с сенсором S типа. Обработка полученных результатов проводилась с использованием программного обеспечения NETSCH Proteus Thermal Analysis.

Испытания методом масс-спектрометрии проводились с помощью квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 D Aëlos («Netzsch» Германия), интегрированного через нагреваемый адаптер с синхронным термическим анализатором. Снятие масс-спектров проводили в режиме Scan bargraf. Для идентификации спектров пользовались библиотекой спектров NIST Chemistry WebBook.

Объектами исследования выбраны огнезащитные вспучивающиеся составы на водной и акриловой основах [7–11].

Результаты и их обсуждение

Огнезащитные составы на основе акриловой дисперсии используются для повышения собственного предела огнестойкости металлоконструкций [12, 13].

В соответствии с данными термогравиметрического анализа, исследуемый огнезащитный материал характеризуется четырьмя основными этапами потери массы (рис. 1) [14, 15].

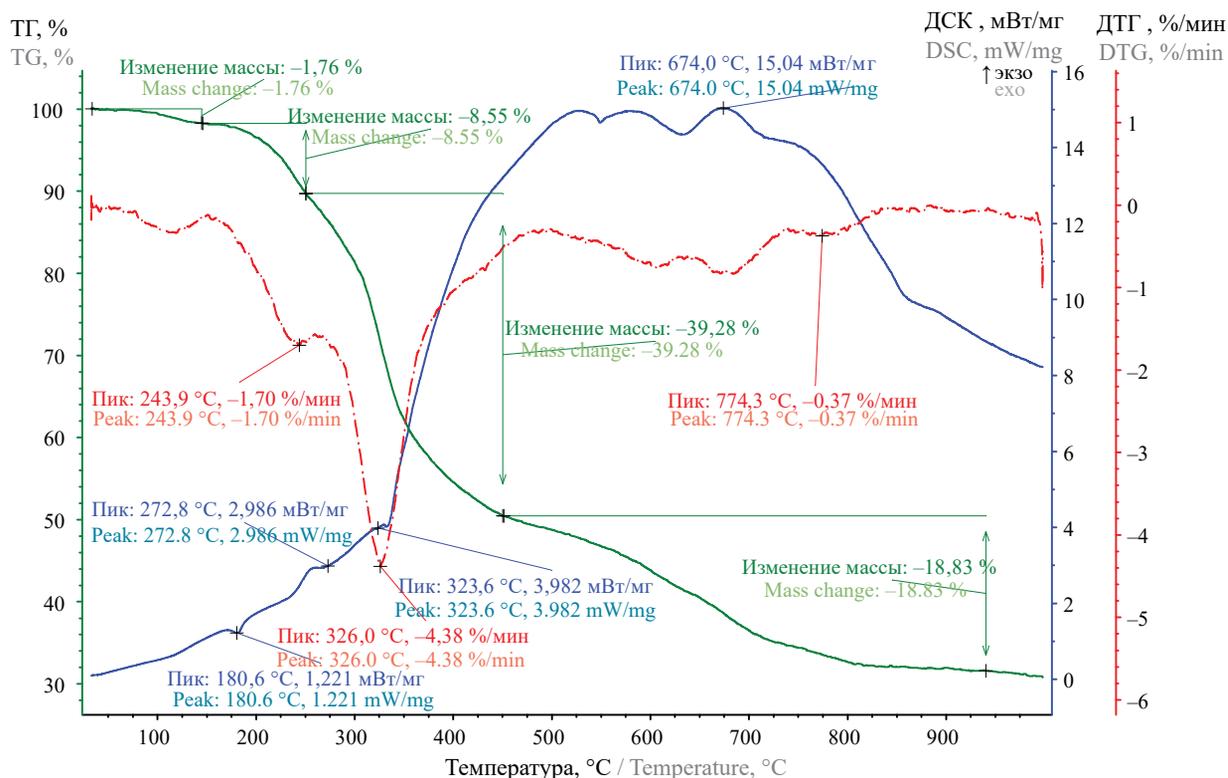


Рис. 1. Термограмма огнезащитного покрытия на основе акриловой дисперсии (среда испытания — воздух, скорость нагрева 20 °С/мин)

Fig. 1. Thermogram of an aqueous dispersion-based flame retardant (testing environment: air, heating rate: 20 °C/min)

Первые две ступени потери массы свидетельствуют о незначительных теплофизических изменениях. Наиболее сильная потеря массы наблюдается в интервале температур 250–450 °С и составляет 39,28 %.

Именно в этом температурном интервале происходят основные процессы интумесценции и формирование коксообразующих структур [16, 17]. Причем, четвертый этап потери массы (18,83 %) является результатом процесса горения пенококкса.

На рис. 2–5 приведены данные исследуемого вспучивающегося огнезащитного материала методом квадрупольной масс-спектрометрии.

Зависимость ионного тока с массовыми числами $m/z = 44$ а.е.м. демонстрирует выделение CO_2 и характеризуется тремя пиками. Наиболее ярко выраженный пик наблюдается при температуре 380,8 °С.

Кривая ионного тока с массовыми числами $m/z = 30$ а.е.м. свидетельствует также о выделении NO (рис. 3).

При этом максимум ионного тока наблюдается при температуре 383,8 °С, именно при данной температуре в исследуемом огнезащитном материале происходит вспучивание и формирование коксообразующих структур.

При исследовании методом квадрупольной масс-спектрометрии в интервале температур 250–440 °С наблюдается выделение аминов с массовыми числами 55, 56 и 57 а.е.м. (рис. 4) и азолов (изоксазол, оксазол, триазол) с массовыми числами 68, 69 и 70 а.е.м. (рис. 5), которые также участвуют в процессе интумесценции и формировании пенококсовой структуры.

При исследовании огнезащитного вспучивающегося покрытия на акриловой основе методом

ДСК наблюдается резкое увеличение выделяемого тепла (экзотермический эффект) с ярко выраженным пиком при температуре 674,0 °С. Высокое значение теплового эффекта свидетельствует о высокой горючести исследуемого огнезащитного материала [18–20].

Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемый материал на основе акриловой дисперсии начинает утрачивать необходимые для огнезащитного состава эксплуатационные качества при достижении температуры ~600 °С.

Огнезащитные вспучивающиеся материалы на основе водной дисперсии

Огнезащитные вспучивающиеся материалы на основе водной дисперсии применяются для нанесения на стальные строительные конструкции с целью повышения их предела огнестойкости [18].

Термограмма анализируемого огнезащитного материала (рис. 6) свидетельствует о наличии трех основных этапов потери массы с наиболее интенсивной потерей массы (36,2 %) в интервале температур 250–450 °С.

Аналогично с огнезащитным составом на акриловой основе данный температурный интервал характеризуется процессом интумесценции с выделением азотсодержащих веществ.

В результате дифференциально-термогравиметрического анализа можно выделить четыре основных ДТГ пика. Наиболее ярко выраженным является ДТГ пик при температуре 326,2 °С, что согласуется с данными термогравиметрического анализа об интенсивности формирования пенококкса.

В результате исследования огнезащитного материала методом ДСК установлен значительный экзотермический эффект, резкий рост которого наблюда-

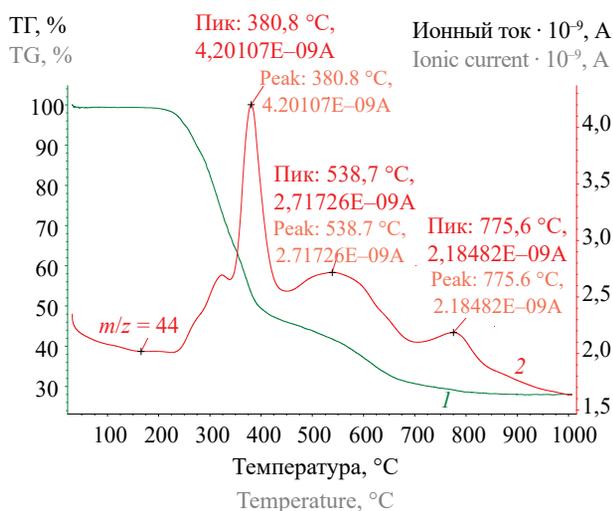


Рис. 2. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 44$ а.е.м.

Fig. 2. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 44$ u

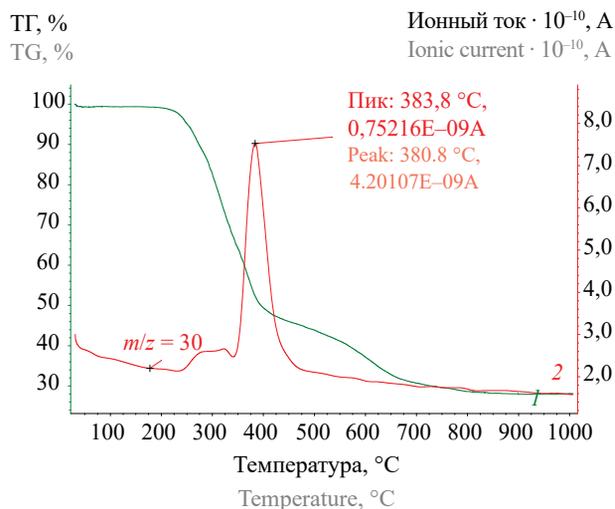


Рис. 3. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 30$ а.е.м.

Fig. 3. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 30$ u

ется при температуре 335,9 °С, свидетельствующий о высокой горючести исследуемого материала [12].

При проведении анализа методом масс-спектрометрии установлено, что максимальные значения

ионного тока наблюдаются при массовых числах: 17, 18 и 44 а.е.м. (рис. 7, 8).

Данный факт свидетельствует о процессе выделения паров воды, аммиака и углекислого газа

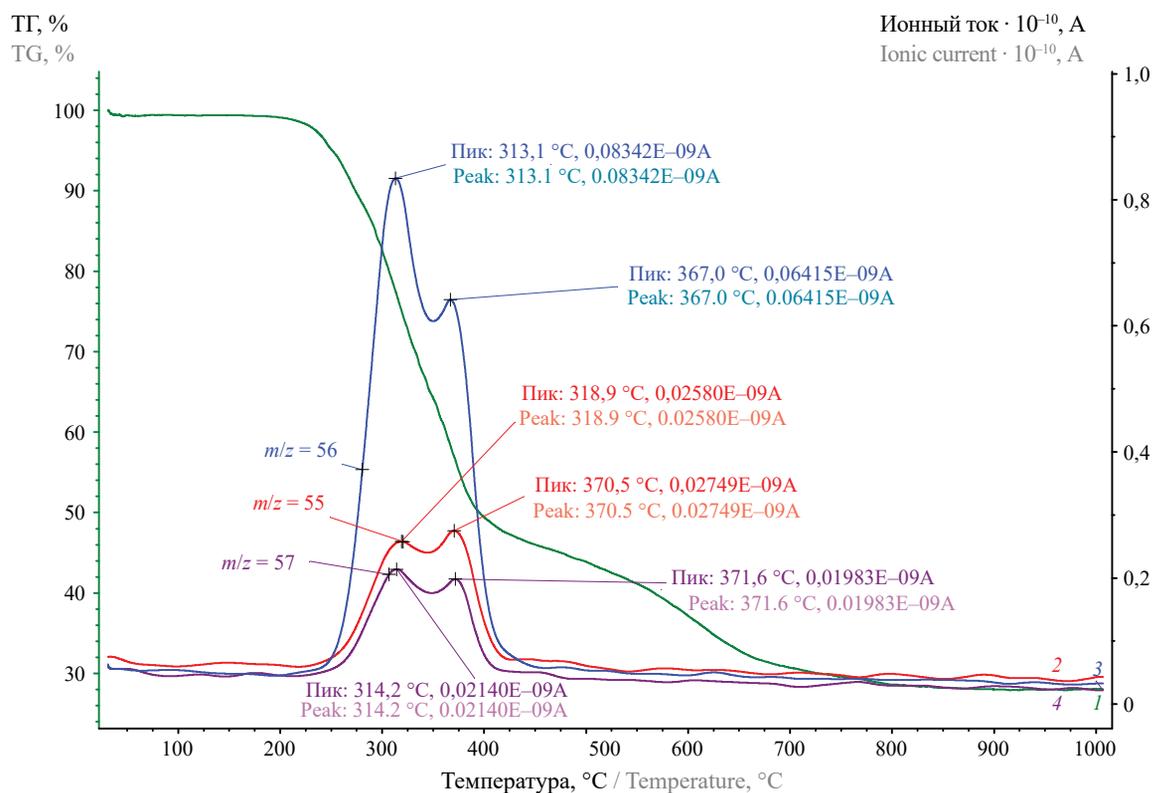


Рис. 4. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 55$ а.е.м., $m/z = 56$ а.е.м., $m/z = 57$ а.е.м.

Fig. 4. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 55$ u, $m/z = 56$ u, $m/z = 57$ u

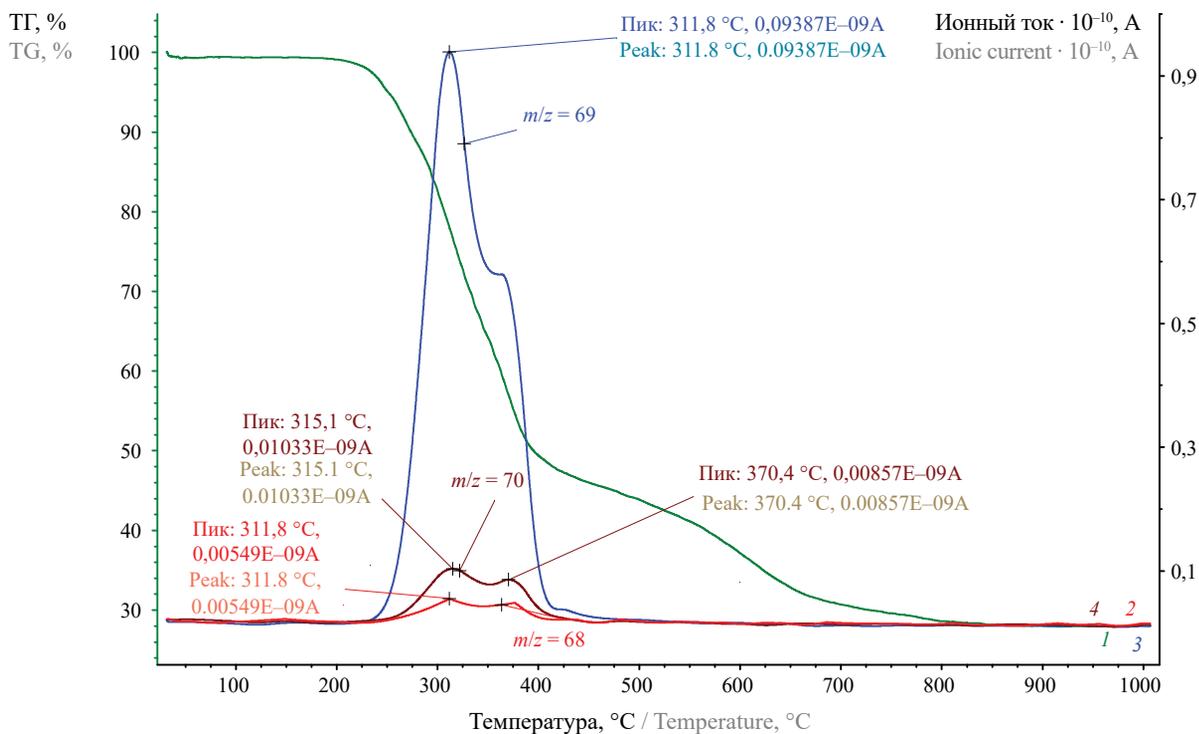


Рис. 5. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 57$ а.е.м., $m/z = 68$ а.е.м., $m/z = 69$ а.е.м., $m/z = 70$ а.е.м.

Fig. 5. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 57$ u, $m/z = 68$ u, $m/z = 69$ u, $m/z = 70$ u.

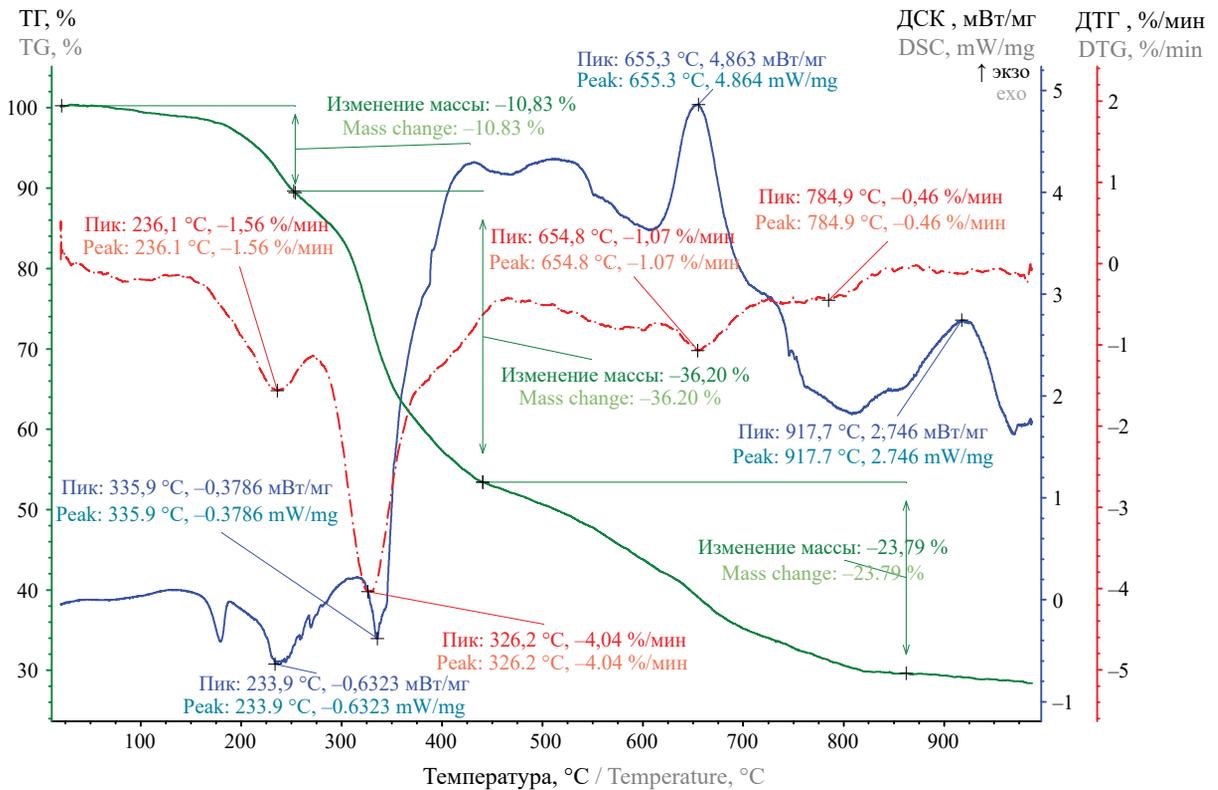


Рис. 6. Термограмма огнезащитного покрытия на основе водной дисперсии (среда испытания — воздух, скорость нагрева 20 °C/мин)

Fig. 6. Thermogram of an aqueous dispersion-based flame retardant (testing environment: air, heating rate: 20 °C/min)

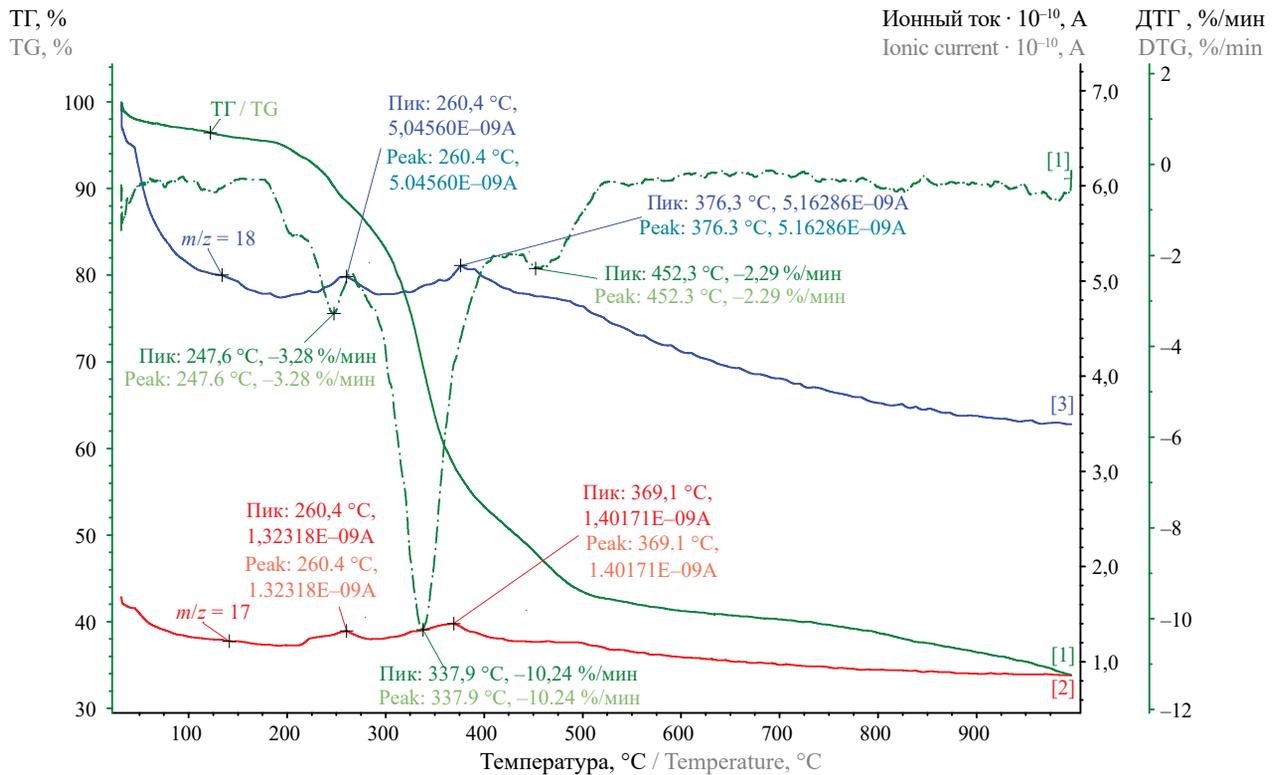


Рис. 7. Кривые ионного тока с массовыми числами $m/z = 17$ а.е.м. и $m/z = 18$ а.е.м.

Fig. 7. Ionic current curves having mass numbers $m/z = 17$ u and $m/z = 18$ u

как результат образования пенококса и дальнейшей термодетрукции огнезащитного покрытия.

Выводы

В результате анализа теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся составов на водной и акриловой основах можно сделать вывод о схожести протекающих термических процессов у анализируемых материалов. Результаты анализа методами синхронного термического анализа свидетельствуют о низкой термостойкости анализируемых огнезащитных материалов, о чем свидетельствует высокая потеря массы и значительный экзотермический эффект.

Установлено, что огнезащитные составы интумесцентного типа на основе акриловой винилацетатной эмульсии и на основе водной дисперсии начинают утрачивать необходимые для огнезащитного материала эксплуатационные качества при достижении температуры ~600 °С.

Таким образом, опираясь на результаты исследований методами термического анализа,

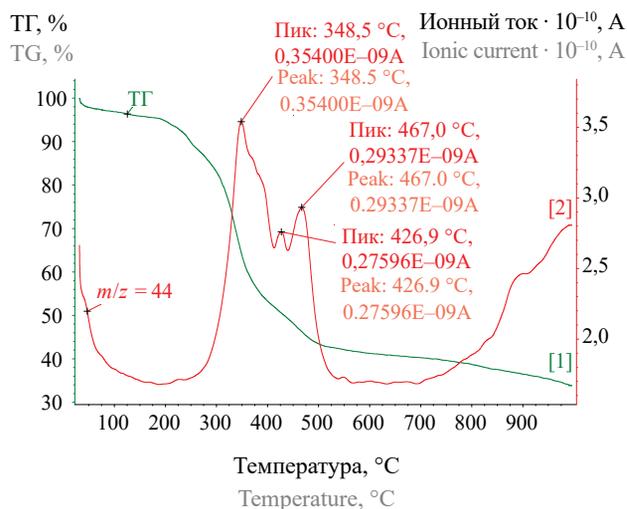


Рис. 8. Кривые ионного тока с массовым числом $m/z = 44$ а.е.м.

Fig. 8. Ionic current curves having mass number $m/z = 44$ u

делаем вывод, что данные составы не в полной мере обладают огнезащитными функциями для применения на объектах нефтегазового комплекса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Наймушин Е.В., Дементьев Ф.А., Минкин Д.Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для оценки температурного режима нагрева // Технологии техносферной безопасности (электронное издание). 2013. № 6 (52). Ст. 9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182>
2. Debbabi H., Mokni R., Jlassi I., Falconieri D., Piras A., Mastouri M. et al. Gas chromatography combined with mass spectrometry and flame ionization detection for identifying the organic volatiles from *Stachys arvensis*, *S. marrubifolia* and *S. ocymastrum* // International Journal of Mass Spectrometry. 2018. Vol. 432. Pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.ijms.2018.07.007
3. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Мансуров Т.Х. Особенности проведения испытаний огнезащитных материалов интумесцентного типа методом термического анализа в условиях углеводородного пожара // Техносферная безопасность. 2017. № 3 (16). С. 57–62.
4. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Мансуров Т.Х., Акулов А.Ю. Применение метода термического анализа для комплексного исследования и совершенствования вспучивающихся огнезащитных составов // Техносферная безопасность. 2017. № 2 (15). С. 3–7.
5. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V. Effect of mineral fillers on the heat resistance and combustibility of an intumescent fireproofing formulation on silicone base // Russian Journal of Applied Chemistry. 2018. Vol. 91. Issue 1. Pp. 96–100. DOI: 10.1134/S1070427218010159
6. Groenewoud W.M. Characterisation of polymers by thermal analysis. Elsevier Science, 2001. 396 p.
7. Ravindra G. Puri, Khanna A.S. Intumescent coatings: A review on recent progress // Journal of Coatings Technology and Research. 2016. Vol. 14. Issue 1. Pp. 1–20. DOI: 10.1007/s11998-016-9815-3
8. Weil E.D. Fire-protective and flame-retardant coatings — A state-of-the-art review // Journal of Fire Sciences. 2011. Vol. 29. Issue 3. Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
9. Chao Zhang. Thermal properties of intumescent coatings in fire // Reliability of Steel Columns Protected by Intumescent Coatings Subjected to Natural Fires. 2015. Pp. 37–50. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6_4
10. 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.2017.26.12.14–24
11. Головина Е.В., Беззапонная О.В., Акулов А.Ю., Мансуров Т.Х. Исследование огнезащитных свойств составов интумесцентного типа при огневых испытаниях в условиях углеводородного горе-

- ния // Техносферная безопасность. 2018. № 4 (21). С. 75–81.
12. Зыбина О.В. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра тех. наук. СПб., 2015. 260 с.
 13. Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance // *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. Issue 5. Pp. 429–434. DOI: 10.1557/s43577-021-00102-7
 14. Treven A., Saje M., Hozjan T. On a planar thermal analysis of intumescent coatings // *Fire and Materials*. 2017. Vol. 42. Issue 2. Pp. 145–155. DOI: 10.1002/fam. 2466
 15. Wladyka-Przybylak M., Kozlowski R. The thermal characteristics of different intumescent coatings // *Fire and Materials*. 1999. Vol. 23. Issue 1. Pp. 33–43. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(199901/02)23:13.0.CO;2-Z
 16. 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>
 17. 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>
 18. Horrocks A.R., Price D. Fire retardant materials. Woodhead Publishing, 2001. 448 p.
 19. Camino G., Costa L., Trossarelli L. Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. Part II: Mechanism of action in polypropylene-ammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures // *Polymer Degradation and Stability*. 1984. Vol. 7. Issue 1. Pp. 25–31. DOI: 10.1016/0141-3910(84)90027-2
 20. Бабкин О.Э., Зыбина О.В., Мнацаканов С.С., Танклевский Л.Т. Механизм формирования пенококса при термоллизе интумесцентных огнезащитных покрытий // *Огнепортал*. URL: <http://www.ogneportal.ru/articles/coatings/2737>

REFERENCES

1. Naymushin E.V., Dement'ev F. A., Minkin D.Yu. Studying of gypsum method of synchronous thermal analysis for estimating temperature regime of heating. *Technology of technosphere safety*. 2013; 6(52):9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182> (rus).
2. Debbabi H., Mokni R., Jlassi I., Falconieri D., Piras A., Mastouri M. et al. Gas chromatography combined with mass spectrometry and flame ionization detection for identifying the organic volatiles from *Stachys arvensis*, *S. marrubiiifolia* and *S. ocymastrum*. *International Journal of Mass Spectrometry*. 2018; 432:59-64. DOI: 10.1016/j.ijms.2018.07.007
3. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Mansurov T.Kh. Features of testing of fire protection materials intumescent type by the method of thermal analysis in the conditions of a hydrocarbon fire. *Technosphere safety*. 2017; 3(16):57-62. (rus).
4. Bezzaponnaya O.V., Golovina Ye.V., Mansurov T. Kh., Akulov A.Yu. Application of the method of thermal analysis for the comprehensive study and improvement of the intumescent flame retardants. *Technosphere safety*. 2017; 2(15):3-7. (rus).
5. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V. Effect of mineral fillers on the heat resistance and combustibility of an intumescent fireproofing formulation on silicone base. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2018; 91(1):96-100. DOI: 10.1134/S1070427218010159
6. Groenewoud W.M. *Characterisation of polymers by thermal analysis*. Elsevier Science, 2001; 396.
7. Ravindra G.P., Khanna A.S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016; 14(1):1-20. DOI: 10.1007/s11998-016-9815-3
8. Wei E. D. I Fire-protective and flame-retardant coatings — A state-of-the-art review. *Journal of Fire Sciences*. 2011; 29(3):259-296. DOI: 10.1177/0734904110395469
9. Chao Zhang. Thermal properties of intumescent coatings in fire. *Reliability of Steel Columns Protected by Intumescent Coatings Subjected to Natural Fires*. 2015; 37-50. DOI: 10.1007/978-3-662-46379-6_4
10. 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. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(12):14-24. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24 (rus).
11. Golovina Ye. V., Bezzaponnaya O.V., Akulov A.Yu., Mansurov T.Kh. Study of fire retardant properties of intumescent compositions during fire tests in hydrocarbon combustion. *Technosphere safety*. 2018; 4(21):75-81. (rus).
12. Zyбина O.V. *Teoreticheskiye printsipy i tekhnologiya ogneshchitnykh vspuchivayushchikhsya materialov: dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2015; 260. (rus).
13. Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*. 2021; 46(5):429-434. DOI: 10.1557/s43577-021-00102-7
14. Treven A., Saje M., Hozjan T. On a planar thermal analysis of intumescent coatings. *Fire and Materials*. 2017; 42(2):145-155. DOI: 10.1002/fam.2466
15. Wladyka-Przybylak M., Kozlowski R. Thermal characteristics of different intumescent coatings. *Fire*

- and Materials*. 1999; 23(1):33-43. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(199901/02)23:13.0.CO;2-Z
16. Khalturinskiy N.A., Krupkin V.G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(10):33-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
 17. 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).
 18. Horrocks A.R., Price D. *Fire retardant materials*. Woodhead Publishing, 2001; 448.
 19. Camino G., Costa L., Trossarely L. Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. part ii: mechanism of action in polypropylene-ammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures. *Polymer Degradation and Stability*. 1984; 7(1):25-31. DOI: 10.1016/0141-3910(84)90027-2
 20. Babkin O.E., Zybina O.V., Mnatsakanov S.S., Tanklevskiy L.T. Mekhanizm formirovaniya penokoksa pri termolize intumestsentnykh ognezashchitnykh pokrytiy. *Ogneportal*. URL: <http://www.ogneportal.ru/articles/coatings/2737>

Поступила 10.03.2022, после доработки 9.05.2022;

принята к публикации 19.05.2022

Received March 10, 2022; Received in revised form May 9, 2022;

Accepted May 19, 2022

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

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

БЕЗЗАПОННАЯ Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, ведущий 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: 119257; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

КРУТОЛАПОВ Александр Сергеевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 357500; ORCID: 0000-0003-0229-8501; e-mail: krutolapov75@inbox.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, Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RISC: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

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

Oksana V. BEZZAPONNAYA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading 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, Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RISC: 119257; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Alexander S. KRUTOLAPOV, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Fire, Rescue Equipment and Automotive Industry, Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 357500; ORCID: 0000-0003-0229-8501; e-mail: krutolapov75@inbox.ru

ШАРАПОВ Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 759428; ORCID: 0000-0002-9053-0085; e-mail: sv.sharapov@inbox.ru

Вклад авторов:

Головина Е. В. — концепция исследования; компоновка результатов; написание исходного текста.

Калач А. В. — научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Беззапонная О. В. — развитие методологии; корректировка текста.

Крутолапов А. С. — подбор и анализ источников литературы.

Шарапов С. В. — сравнительный анализ образцов огнезащитных составов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Sergey V. SHARAPOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Criminology and Engineering Expertise, Saint-Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 759428; ORCID: 0000-0002-9053-0085; e-mail: sv.sharapov@inbox.ru

Contribution of the authors:

Ekaterina V. Golovina — the concept of the study; the layout of the results; writing the source text.

Andrey V. Kalach — scientific guidance; revision of the text; final conclusions.

Oksana V. Bezzaponnaya — methodology development; text correction.

Alexander S. Krutolapov — selection and analysis of literature sources.

Sergey V. Sharapov — comparative analysis of samples of flame retardants.

The authors declare no conflicts of interests.