

Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа

Оксана Владимировна Беззапонная ✉

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью работы является оценка температуры воздействия на исследуемый материал по результатам синхронного термического анализа. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи: исследовать процесс термоокислительной деструкции исследуемого материала, разработать критерии для оценки степени термического воздействия и получить уравнения для определения температуры воздействия на него.

Материалы и методы. Исследованы образцы гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND, часто применяемой для внутренней отделки стен зданий и помещений. Перед испытаниями образцы шпаклевки подвергались предварительному термическому воздействию: 200, 300, 400, 500, 600, 700 и 800 °С в течение 30 мин. Испытания проводились методом синхронного термического анализа (Netzsch STA 449 F5 Jupiter) при скорости нагрева 20 °С/мин, в корундовых тиглях, с расходом воздуха 75 мл/мин.

Результаты исследования и их обсуждение. Установлено, что в качестве критериев для оценки температуры воздействия на гипсовую шпаклевку методами термического анализа целесообразно использовать такие термоаналитические характеристики, как потеря массы при температуре 200 °С и зольный остаток при температуре 900 °С. Получены уравнения для расчета температуры воздействия на гипсовый шпаклевочный состав по термоаналитическим характеристикам для образцов проб шпаклевки.

Выводы. Показана возможность применения метода синхронного термического анализа для определения температуры воздействия на исследуемый материал, что весьма важно при анализе особенностей развития пожара в помещении.

Ключевые слова: пожарно-техническая экспертиза; диагностика очага пожара; критерии оценки; температура воздействия; термоаналитические характеристики

Для цитирования: Беззапонная О.В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32

✉ Беззапонная Оксана Владимировна, e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Using synchronous thermal analysis to study characteristic features of a developing fire

Oksana V. Bezzaponnaya ✉

Ural Institute of the State Fire Service EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the work is to estimate the temperature of impact on the material under study using the results of synchronous thermal analysis. This task is solved to achieve the pre-set purposes: studying the process of the thermal-oxidative destruction of the material under study, developing thermal impact assessment criteria, and deriving equations to determine the temperature of impact.

Materials and methods. Specimens of ROTBAND gypsum finishing putty, frequently used for the interior decoration of walls of buildings and premises, have been studied. Before testing, putty samples were subjected to the preliminary thermal impact of 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 800 °C for 30 min. The tests were carried out using the method of synchronous thermal analysis (Netzsch STA 449 F5 Jupiter) in corundum crucibles at a heating rate of 20 °C/min and with an air flow rate of 75 ml/min.

Research results and discussion. Mass loss at a temperature of 200 °C and ash residue at a temperature of 900 °C can be expediently used as the criteria for assessing the temperature of impact on the gypsum putty using thermal analysis methods. Equations are obtained to calculate the temperature of impact on the gypsum putty composition according to the thermos-analytical characteristics of putty specimens.

Conclusions. The study demonstrates that synchronous thermal analysis can be applied to determine the temperature of impact on the material under study, which is vital for the analysis of a developing indoor fire.

Keywords: fire investigation; fire seat diagnostics; assessment criteria; impact temperature; thermos-analytical characteristics

For citation: Bezzaponnaya O.V. Using synchronous thermal analysis to study characteristic features of a developing fire. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):26-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32 (rus).

✉ Oksana Vladimirovna Bezzaponnaya, e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Введение

При производстве пожарно-технической экспертизы решается ряд важных задач: определяется механизм и место возникновения пожара, пути распространения горения, устанавливается причина пожара. Решению этих задач помогает информация о степени термического поражения строительных материалов. Оценка степени термического воздействия на материал предполагает исследование закономерностей его термоокислительной деструкции.

В качестве исследуемого материала был выбран финишный шпаклевочный состав на гипсовой основе, часто применяемый при финишной отделке стен, являясь важным объектом исследования для получения исходной информации для анализа особенностей развития пожара. Толщина нанесения данного материала составляет от 0,2 до 5,0 мм.

Метод термического анализа является одним из самых информативных и точных методов, применяемых для оценки степени термического воздействия на исследуемый материал. В данной работе приведены результаты исследований гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND методом синхронного термического анализа (СТА) для установления температуры воздействия на нее.

В настоящее время накоплен уже значительный экспериментальный материал исследования процесса термоокислительной деструкции различных строительных материалов [1–4], что весьма ценно для использования полученных результатов в целях пожарно-технической экспертизы. Изменение термоаналитических характеристик исследуемых материалов при повышении температуры воздействия на них позволяет не только охарактеризовать процесс термоокислительной деструкции материала, но и определить зависимость этих характеристик от температуры воздействия, что очень важно для оценки степени термического воздействия на исследуемый материал. Методом термического анализа исследованы такие строительные материалы как бетон [5–8], цементный камень [9, 10], гипс [11, 12], древесина [13–15], получены результаты, позволяющие оценить степень термического поражения материала. Большое число публикаций посвящено исследованию процесса термоокислительной деструкции лакокрасочных покры-

тий [16] и огнезащитных составов интумесцентного типа [17–24], часто применяемых для огнезащиты металлоконструкций.

В качестве критериев для определения температуры воздействия на исследуемый материал необходимо использовать термоаналитические характеристики, которые имеют с ней высокую корреляционную связь. Безусловно, для материалов разной химической природы это будут разные термоаналитические характеристики. В данной статье будет рассмотрен термолиз гипсовой шпаклевки и выбор критериев для расчета температуры воздействия на данный материал.

Результаты исследования и их обсуждение

Для подготовки образцов проб и проведения исследований методом синхронного термического анализа (СТА) гипсовая финишная шпаклевка ROTBAND была нанесена на полимерную подложку для полного высыхания. Исследование образцов материала проводили на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter в среде воздуха, в корундовых тиглях, в интервале температур, характерном для стандартного (целлюлозного) режима пожара (25–900 °С). При проведении испытаний фиксировались следующие термоаналитические зависимости: термогравиметрическая (ТГ) кривая; дифференциально-термогравиметрическая (ДТГ) кривая; кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Термограмма гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND, полученная при скорости нагрева 20 °С/мин в корундовых тиглях и расходе воздуха 75 мл/мин, представлена на рис. 1.

Процесс термической деструкции исследуемого материала начинается при температуре 129 °С с интенсивной потерей массы в интервалах температур 100–200 °С и 700–900 °С. Анализ ТГ и ДТГ кривых свидетельствует о 2-стадийном процессе термолиза образцов шпаклевки (две ступени на ТГ кривой и два ДТГ пика на ДТГ кривой). Максимум первого ДТГ пика приходится на температуру 147,1 °С, второго ДТГ пика — на температуру 795,4 °С.

Первая стадия потери массы обусловлена термической деструкцией гипса, входящего в состав шпаклевки. Скорость потери массы на этой стадии

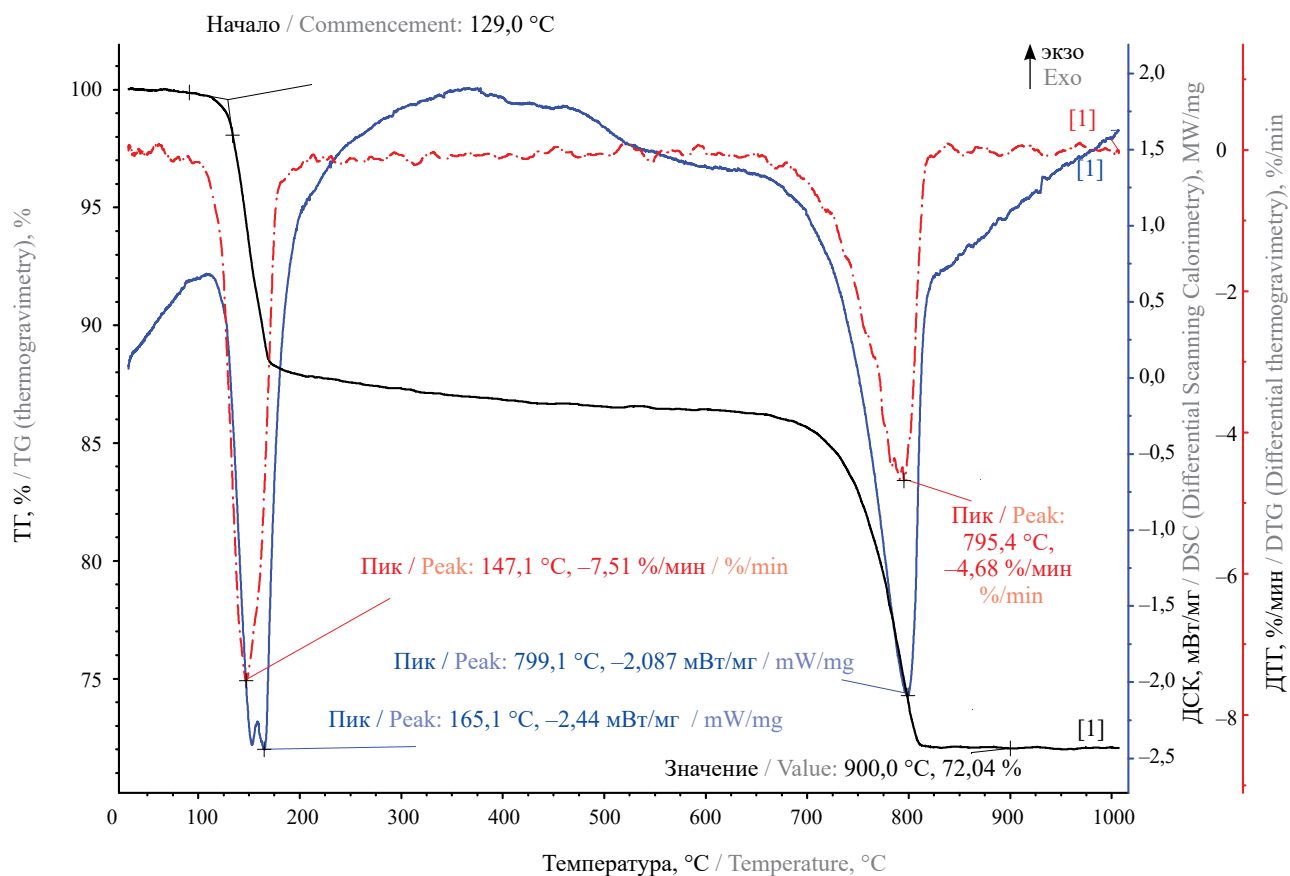


Рис. 1. Термограмма исходной (нативной) гипсовой шпаклевки ROTBAND

Fig. 1. Thermogram of original (native) ROTBAND gypsum putty

достигает 7,51 %/мин. Скорость потери массы на второй стадии, обусловленной разложением карбоната кальция, составила 4,68 %. Зольный остаток анализируемой шпаклевки составил 72,04 %.

На ДСК кривой наблюдаются два эндотермических пика, свидетельствующие о термодеструкции компонентов исследуемого материала. Комплексный эндотермический пик в интервале температур 100–200 °C можно объяснить ступенчатой дегидратацией гипса, основным компонентом которого является сульфат кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Эндотермический пик при температуре 799,1 °C свидетельствует о термическом разложении карбоната кальция с выделением углекислого газа, что подтверждается результатами масс-спектрального анализа [11].

Для анализа изменений, происходящих с исследуемым материалом при воздействии высоких температур пожара, проведены исследования образцов гипсовой шпаклевки, предварительно подвергнутых термическому воздействию при температурах 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 °C в течение 30 мин. Термограммы образцов шпаклевки, полученные после предварительного нагрева, представлены на рис. 2.

В качестве критериев для определения температуры воздействия на материал выбираются термоаналитические характеристики, для которых

зависимость от температуры воздействия на материал описывается высоким значением коэффициента аппроксимации. При разработке критериев для оценки температуры воздействия на шпаклевочный состав рассматривались такие термоаналитические характеристики, как потеря массы при разных

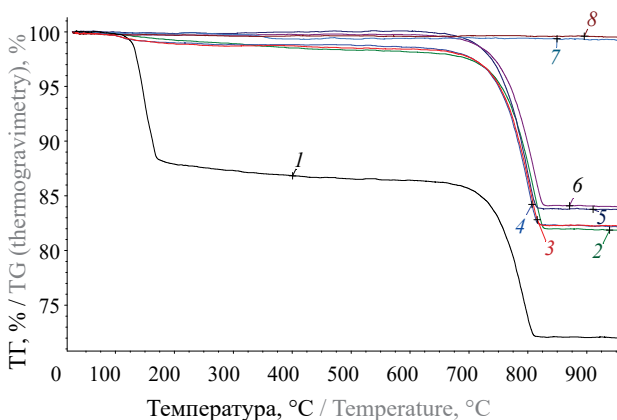


Рис. 2. Термограмма гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND после предварительного теплового воздействия: 1 — 25 °C; 2 — 200 °C; 3 — 300 °C; 4 — 400 °C; 5 — 500 °C; 6 — 600 °C; 7 — 700 °C; 8 — 800 °C

Fig. 2. Thermogram of ROTBAND gypsum finishing putty after preliminary thermal exposure: 1 — 25 °C; 2 — 200 °C; 3 — 300 °C; 4 — 400 °C; 5 — 500 °C; 6 — 600 °C; 7 — 700 °C; 8 — 800 °C

температурах, зольный остаток, скорость потери массы при разных температурах, температуры максимумов ДСК пиков, тепловые эффекты фазовых переходов. Наиболее высокие значения коэффициентов аппроксимации показали такие термоаналитические характеристики, как зольный остаток при температуре 900 °С и потеря массы при температуре 200 °С. Для остальных термоаналитических характеристик удовлетворительных зависимостей не получено. График, демонстрирующий влияние температуры на величину зольного остатка, приведен на рис. 3.

Зависимость температуры воздействия от величины зольного остатка удовлетворительно ($R^2 = 0,938$) описывается уравнением полиномиальной зависимости 3-го порядка, по которому можно рассчитать температуру воздействия t , при известном значении зольного остатка анализируемых проб гипсовой финишной шпаклевки ROTBAND с места пожара:

$$t = 143,94 \cdot x^3 - 35\,860 \cdot x^2 + 3 \cdot 10^6 x - 8 \cdot 10^7, \quad (1)$$

где x — зольный остаток финишной гипсовой шпаклевки ROTBAND при температуре 900 °С, %.

График, демонстрирующий влияние температуры на величину потери массы при температуре 200 °С, приведен на рис. 4.

Получено уравнение степенной зависимости для определения температуры воздействия t при известной потере массы при температуре 200 °С образцов гипсовой шпаклевки ($R^2 = 0,9632$):

$$t = 253,43 \cdot x^{-0,883}, \quad (2)$$

где x — потеря массы образца шпаклевки при температуре 200 °С, %.

Для определения итоговой температуры воздействия на исследуемый материал рассчитыва-

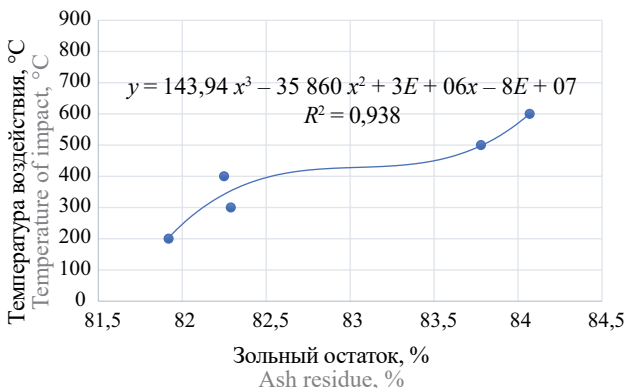


Рис. 3. Влияние температуры воздействия на зольный остаток шпаклевки ROTBAND при 900 °С

Fig. 3. Influence of the temperature of impact on the ash residue of ROTBAND putty at 900 °С

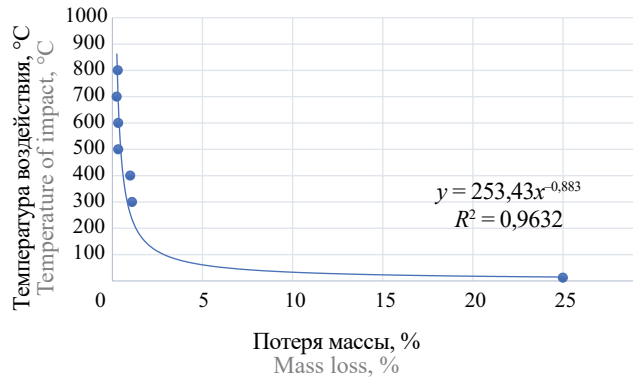


Рис. 4. Влияние температуры воздействия на потерю массы гипсовой шпаклевки ROTBAND при 200 °С

Fig. 4. The effect of temperature on the ROTBAND gypsum putty mass loss at 200 °С

ется среднее арифметическое значение, полученное по уравнениям (1) и (2).

После оценки степени термического воздействия в разных зонах помещения по максимальной температуре воздействия определяется зона с наибольшей температурой, что дает ценную информацию для решения важных задач пожарно-технической экспертизы.

Проверка достоверности результатов определения температуры воздействия на материал показала, что относительная погрешность определения не превышает 5 %.

Выводы

Анализ результатов исследований позволил сделать следующие выводы:

- в качестве критериев оценки температурного воздействия на гипсовые шпаклевочные составы целесообразно рассматривать термоаналитические характеристики, имеющие высокие значения коэффициента аппроксимации зависимостей от температуры предварительного воздействия: зольный остаток при температуре 900 °С, потеря массы при температуре 200 °С;
- получены уравнения, позволяющие рассчитать температуру воздействия на материал при известной потере массы и зольного остатка;
- погрешность определения температуры воздействия на исследуемый материал не превышает 5 %.

Полученная информация позволит пожарно-техническому эксперту определить зоны термических поражений шпаклевки на гипсовой основе и проанализировать особенности развития пожара в помещении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ключников В.Ю., Дашко Л.В., Довбня А.В., Плотникова Г.В. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 7. С. 47–51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17853455>
2. Varma A., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Hwang S. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications // Advances in chemical engineering. 1998. Vol. 24. Pp. 79–226. DOI: 10.1016/S0065-2377(08)60093-9
3. Hertawan H., Hadiyanto H., Sunaryo S., Kholil A. Analysis of thermal performance of wood and exposed stone-walled buildings in mountainous areas with building envelop variations // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Vol. 17. Issue 3. Pp. 321–332. DOI: 10.5937/jaes17-20617
4. Дашко Л.В., Довбня А.В., Ключников В.Ю., Плотникова Г.В. Применение методов термического анализа при производстве пожарно-технических экспертиз // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2012. № 1 (60). С. 59–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23638887>
5. Флегонтов Д.В., Акулова М.В., Петров А.В., Потемкина О.В. Методика комплексного исследования бетонов, подвергшихся термическому воздействию на пожаре // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 36–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37288098>
6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol 21. Issue 12. Pp. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601
7. Корзанов В.С., Красновских М.П. Влияние термического воздействия на прочность бетона // Вестник Пермского университета. Серия: химия. 2020. Т. 10. Вып. 3. С. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284
8. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire // IABSE Conference, Rotterdam 2013: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Rotterdam, Netherlands. 2013. Pp. 112–113. DOI: 10.2749/222137813806474417
9. Дашко Л.В., Синюк В.Д., Плотникова Г.В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32
10. Плотникова Г.В., Дашко Л.В., Ключников В.Ю., Синюк В.Д. Применение методов термического анализа при исследовании цементного камня // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. 2013. № 2 (65). С. 47–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272420>
11. Беззапонная О.В., Акулов А.Ю., Порхачев М.Ю. Исследование термостойкости современных строительных материалов методом синхронного термического анализа // Техносферная безопасность. 2017. № 1 (14). С. 3–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28857749>
12. Наймушин Е.В., Дементьев Ф.А., Минкин Д.Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для целей установления температурного режима нагрева // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 6(52). Ст. 9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182>
13. Беззапонная О.В. Оценка температуры воздействия на древесину в условиях пожара методами термического анализа // Техносферная безопасность/Technosphere safety. 2020. № 3 (28). С. 70–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44023010>
14. Candelier K., Thevenon M.-F., Petrisans A., Dumarcay S., Gerardin P., Petrisans M. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review // Annals of Forest Science. 2016. Vol. 73. Issue 3. Pp. 571–583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x
15. Сивенков А.Б. Влияние физико-химических характеристик древесины на ее пожарную опасность и эффективность огнезащиты : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2015. 289 с.
16. Принцева М.Ю., Лобатова О.В. Определение степени термического поражения лакокрасочных покрытий методом синхронного термического анализа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 2. С. 131–136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48699715>
17. Беззапонная О.В., Пискашева А.С., Ефимов И.А., Выгузова Е.В., Глухих П.А. Диагностика температуры воздействия пожара на огнезащитные покрытия интумесцентного типа методами термического анализа // Техносферная безопасность/Technosphere safety. 2019. № 4 (25). С. 73–81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41752965>
18. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Kinetic analysis of the thermal degradation of an epoxy-based intumescent coating // Polymer Degradation and Stability. 2009. Vol. 94. Issue 3. Pp. 404–409. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.021
19. 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
20. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane // *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 605. Pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
 21. Palacios A., Gracia A., Haurie L., Cabeza L.F., Fernández A.I., Barrenech C. Study of the thermal properties and the fire performance of flame retardant-organic PCM in bulk form // *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 117. DOI: 10.3390/ma11010117
 22. 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
 23. Fateha T., Guillaume E., Joseph P. An experimental study of the thermal performance of a novel intumescent fire protection coating // *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 92. Pp. 132–141. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.021
 24. Ustinov A., Babikova A., Zybina O., Lobov D., Printseva M., Klapyuk I. u òp. Improvement of methodology for assessing fire-protective efficiency of intumescent coatings applied on metal constructions // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 320. P. 02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202132002009

REFERENCES

1. Klyuchnikov V.Yu., Dashko L.V., Dovbnya A.V., Plotnikova G.V. Application of methods of the thermal analysis in production of fire investigations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(7):47-51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17853455> (rus).
2. Varma A., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Hwang S. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. *Advances in Chemical Engineering*. 1998; 24:79-226. DOI: 10.1016/S0065-2377(08)60093-9
3. Hermawan H., Hadiyanto H., Sunaryo S., Kholil A. Analysis of thermal performance of wood and exposed stone-walled buildings in mountainous areas with building envelop variations. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; 17(3):321-332. DOI: 10.5937/jaes17-20617
4. Dashko L.V., Dovbnya A.V., Klyuchnikov V.Yu., Plotnikova G.V. Application of thermal analysis methods in the production of fire-technical examinations. *Vestnik of the East Siberian Institute of the MIA of Russia*. 2012; 1(60):59-64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23638887> (rus).
5. Flegontov D.V., Akulova M.V., Petrov A.V., Potemkina O.V. Technique of complex research of concretes, exposed to thermal exposure to fire. *Modern Problems of Civil Protection*. 2019; 1(30):36-43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37288098> (rus).
6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016; 21(12): 1-20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601
7. Korzanov V.S., Krasnovskikh M.P. The effect of thermal exposure on the strength of concrete. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2020; 10(3):277-284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284 (rus).
8. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire. *LABSE Conference, Rotterdam 2013: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures*. Rotterdam, Netherlands, 2013; 112-113. DOI: 10.2749/222137813806474417
9. Dashko L.V., Sinyuk V.D., Plotnikova G.V. Expert study of cement paste after exposure to high temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):22-32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32 (rus).
10. Plotnikova G.V., Dashko L.V., Klyuchnikov V.Yu., Sinyuk V.D. Application of methods of thermal analysis in the study of the cement stone. *Vestnik of the East Siberian Institute of the MIA of Russia*. 2013; 2(65): 47-54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272420>
11. Bezzaponnaya O.V., Akulov A.Yu., Porkhachev M.Yu. The study of the thermal stability of modern building materials by the method of synchronous thermal analysis. *Tekhnosfernaya bezopasnost/Technosphere safety*. 2017; 1(14):3-12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28857749> (rus).
12. Naymushin E.V., Dementyev F.A., Minkin D.Yu. The study of the thermal stability of modern building materials by the method of synchronous thermal analysis. *Technology of Technosphere Safety*. 2013; 6(52):9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21487182> (rus).
13. Bezzaponnaya O.V. Evaluation of exposure temperature on wood under fire conditions by thermal analysis methods. *Tekhnosfernaya bezopasnost/Technosphere safety*. 2020; 3(28):70-80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44023010> (rus).
14. Candelier K., Thevenon M.-F., Petrissans A., Dumarçay S., Gerardin P., Petrissans M. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*. 2016; 73(3): 571-583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x
15. Sivenkov A.B. Influence of physical and chemical characteristics of wood on its fire hazard and fire

- protection efficiency : dissertation of the Doctor of Physical and mathematical Sciences. Moscow, 2015; 289. (rus).
16. Printseva M.Yu., Lobatova O.V. Determination of the degree of thermal damage to paint coatings by synchronous thermal analysis. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*. 2022; 11(2): 131-136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48699715> (rus).
 17. Bezzaponnaya O.V., Piskasheva A.S., Efimov I.A., Vyuzova E.V., Glukhikh P.A. Diagnostic of fire exposure temperature on fire protective coatings of an intumescent type by methods of thermal analysis. *Tekhnosfernaya bezopasnost/Technosphere safety*. 2019; 4(25):73-81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41752965> (rus).
 18. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Kinetic analysis of the thermal degradation of an epoxy-based intumescent coating. *Polymer Degradation and Stability/Polymer Degradation and Stability*. 2009; 94:404-409. DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2008.11.021
 19. 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).
 20. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane. *Thermochimica Acta*. 2015; 605:28-36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
 21. Palacios A., De Gracia A., Haurie L., Cabeza L.F., Fernández A.I., Barrenech C. Study of the thermal properties and the fire performance of flame retardant-organic PCM in bulk form. *Materials*. 2018; 11:117. DOI: 10.3390/ma11010117
 22. 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
 23. Fateha T., Guillaume E., Joseph P. An experimental study of the thermal performance of a novel intumescent fire protection coating. *Fire Safety Journal*. 2017; 92:132-141. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.021
 24. Ustinov A., Babikova A., Zybina O., Lobov D., Printseva M., Klaptyuk I. et al. Improvement of methodology for assessing fire-protective efficiency of intumescent coatings applied on metal constructions. *E3S Web of Conferences*. 2021; 320:02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202132002009

Поступила 20.07.2022, после доработки 13.09.2022;
принята к публикации 19.09.2022

Received July 20, 2022; Received in revised form September 13, 2022;
Accepted September 19, 2022

Информация об авторах

БЕЗЗАПОННАЯ Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 119257; ResearcherID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnaya@mail.ru

Information about the authors

Oksana V. BEZZAPONNAYA, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Associate Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise, Ural Institute of the of 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, 620062, Russian Federation; ID RISC: 119257; ResearcherID: R-8727-2019; Scopus Author ID: 6504618195; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnaya@mail.ru