

Научная статья

УДК 614.841.2.001.2; DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-33-41

НАУЧНО ОБОСНОВАННАЯ МЕТОДИКА ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ

✉ Мокряк Анна Васильевна;

Королева Людмила Анатольевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ mokryakanna@mail.ru

Аннотация. Рассматривается одна из ключевых задач в сфере пожарно-технической экспертизы: разработка научно обоснованной дифференциации повреждений алюминиевых проводников. Основная цель работы – создание точной методики для четкого разграничения дефектов, вызванных аварийными режимами эксплуатации электрооборудования, такими как короткое замыкание, перегрузка по току, плохой контакт, и повреждений, образовавшихся под воздействием внешнего пожара.

Для достижения поставленной цели были выполнены эксперименты. На подготовленных образцах смоделированы разнообразные аварийные и термические воздействия. Анализ полученных повреждений проводился с использованием современных инструментальных методов: сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа и металлографии.

В ходе исследования был разработан комплекс диагностических критериев для разных типов воздействия, а также создана пошаговая экспертная методика. Эта методика определяет строгую последовательность проведения исследований – от первичного визуального осмотра до детального микроструктурного анализа. Практическая значимость данного подхода заключается в его способности значительно повысить точность, объективность и доказательную силу экспертных выводов при установлении электротехнических причин возгорания.

Ключевые слова: алюминиевые проводники, пожарно-техническая экспертиза, дифференциация повреждений, короткое замыкание, сверхток, большое переходное сопротивление, сканирующая электронная микроскопия, металлографический анализ, методика, типы кабелей

Для цитирования: Мокряк А.В., Королева Л.А. Научно обоснованная методика дифференциации повреждений алюминиевых проводов и кабелей после пожаров // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 4. С. 33–41. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-33-41.

Scientific article

A SCIENTIFICALLY SUBSTANTIATED METHODOLOGY FOR DIFFERENTIATING DAMAGE IN ALUMINUM WIRES AND CABLES AFTER FIRES

✉ Mokryak Anna V.;

Koroleva Lyudmila A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ mokryakanna@mail.ru

Abstract. This study addresses one of the key challenges in the field of fire-technical examination: the development of a scientifically grounded classification of damage in aluminum conductors. The main objective of the work is to create an accurate methodology for clearly distinguishing defects caused by emergency operating conditions of electrical equipment, such as short circuit, current overload, and poor contact, from damage resulting from external fire exposure.

To achieve this objective, experiments were conducted. Various fault and thermal exposures were simulated on prepared samples. Analysis of the resulting damage was performed using modern instrumental methods: scanning electron microscopy, X-ray fluorescence analysis, and metallography.

During the study, a set of diagnostic criteria for different types of exposure was developed, and a step-by-step expert methodology was created. This methodology defines a strict sequence of investigations—from initial visual inspection to detailed microstructural analysis.

The practical significance of this approach lies in its ability to significantly enhance the accuracy, objectivity, and evidentiary weight of expert conclusions when determining the electrical causes of ignition.

Keywords: aluminum conductors, fire technical expertise, damage differentiation, short circuit, overcurrent, high transient resistance, scanning electron microscopy, metallographic analysis, methodology, cable types

For citation: Mokryak A.V., Koroleva L.A. A scientifically substantiated methodology for differentiating damage in aluminum wires and cables after fires // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 4. P. 33–41. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-33-41.

Введение

Алюминиевые проводники широко применяются в энергетике благодаря своей легкости, коррозионной стойкости и экономичности. Однако их повышенная чувствительность к перегреву, по сравнению с медью, создаёт дополнительные риски возгорания. Согласно статистике ВНИИПО МЧС России [1–5], неисправности электрооборудования остаются одной из основных причин пожаров, причём их количество продолжает расти.

Пожары на объектах топливно-энергетического комплекса имеют крайне серьёзные последствия. Они не только вызывают значительные прямые убытки, но и приводят к значительным социально-экономическим потрясениям. В период с 2019 по 2024 гг. на таких объектах произошло около 643 пожаров, включая несколько наиболее заметных инцидентов.

К ним относится авария на ТЭЦ-3 в г. Новосибирске (2019 г.) – крупное происшествие в распределительном устройстве, сопровождавшееся мощным возгоранием и взрывом. Результатом стали веерные отключения электроэнергии в нескольких районах города,

нарушение работы транспорта и систем жизнеобеспечения. Расследование показало, что причиной послужило короткое замыкание в силовом трансформаторе, вызванное дефектом изоляции, вероятно, существовавшим с момента изготовления оборудования.

Еще одним случаем стали пожары в Курганской обл. в 2023 г. Причиной возникновения пожаров стал перехлест проводов воздушных линий электропередачи. Сильный ветер привел к схлестыванию проводов, что вызвало короткое замыкание и интенсивное искрообразование. Горящие частицы, падая на сухую траву, моментально инициировали новые очаги возгорания на обширной территории.

Схожим по значимости инцидентом стал пожар на ТЭЦ в Приморском крае (2024 г.). Возгорание на этой ключевой подстанции, обеспечивающей электроснабжение большого р-на г. Владивостока и других населенных пунктов, привело к прекращению электроснабжения десятков тысяч человек и объектов инфраструктуры. Причиной аварии стала перегрузка оборудования в период аномально холодной погоды, когда температуры опускались ниже -20°C . Резкий рост энергопотребления из-за массового использования обогревателей привел к перегрузке и последующему возгоранию одного из силовых трансформаторов.

Ключевой проблемой в этой области является установление причинно-следственной связи: стал ли аварийный режим работы электросети причиной возгорания или его следствием. Решение этой задачи осложняется тем, что существующие методики экспертного исследования в значительной степени ориентированы на анализ медных проводников, в то время как диагностика повреждений алюминиевых проводов и кабелей разработана недостаточно [6–9]. Это связано с физико-химическими свойствами алюминия: его низкая температура плавления (660°C), склонность к интенсивному окислению и формированию сложных микроструктур при термическом воздействии приводят к тому, что традиционные визуальные методы зачастую не позволяют провести надежную дифференциацию [10–12].

Особую сложность представляет многообразие типов алюминиевых кабелей и соединений, используемых в энергетике, каждый из которых обладает уникальными конструктивными особенностями. К ним относятся соединительные муфты и контактные соединения, самонесущие изолированные провода (СИП), бронированные кабели, кабельные наконечники, омедненные алюминиевые проводники, а также соединения алюминия с медью. Поведение этих объектов в аварийных режимах и характер формирующихся на них повреждений существенно различаются, что до сих пор не находило системного отражения в методической литературе. Отсутствие единого подхода, учитывающего эти нюансы, затрудняет работу экспертов и снижает достоверность выводов.

Таким образом, данная работа направлена на создание комплексной научно-обоснованной методики. Её задача – обеспечить надежное разграничение дефектов алюминиевой кабельной продукции, возникших из-за внутренних аварийных процессов (короткое замыкание, перегрузка, плохой контакт), и повреждений, причинённых внешним источником огня. Методика учитывает конструктивные особенности разных типов проводов, кабелей и соединений.

Методология исследования

В основу исследования положен комплексный подход, объединяющий три ключевых направления: теоретический анализ, натурное моделирование аварий и последующую диагностику. Для обеспечения объективности выводов в эксперименте были использованы наиболее типичные для электроэнергетики алюминиевые проводники [13–16]. В их число вошли:

- провода сечением от 2 до 25 мм²;
- многопроволочные жилы СИП;
- образцы бронированных кабелей;
- различные виды соединений (болтовые наконечники, биметаллические омеднённые проводники, контактные пары «алюминий–медь»).

Моделирование аварийных режимов проводилось на специализированном электротехническом стенде, который обеспечивает высокую точность измерений и позволяет воссоздавать широкий диапазон нештатных ситуаций:

– сверхток: на образцы подавались токи величиной от 60 до 600 А с фиксацией времени до разрушения, типа повреждений и распределения температур.

– короткое замыкание (КЗ): было смоделировано дуговое короткое замыкание (металлическое КЗ) на разных участках кабельных линий, включая зоны соединений (рис. 1);



Рис. 1. Эксперимент по моделированию сверхтока и КЗ

– большое переходное сопротивление (БПС): в болтовых соединениях, клеммах и зонах контакта «жила-наконечник» намеренно создавали условия плохого контакта и пропускали через них сверхтоки для моделирования развития электроэрозии (рис. 2);



Рис. 2. Эксперимент по моделированию большого переходного сопротивления

– тепловое воздействие: проводники и кабели в различной изоляции (поливинилхлорид, СИП) нагревали в муфельной печи и открытым пламенем горелки для имитации условий внешнего пожара (рис. 3).



Рис. 3. Эксперимент по моделированию внешнего теплового воздействия пожара

Для анализа образцов использовали комплекс взаимодополняющих методик, адаптированных под специфику каждого типа проводников и соединений:

– визуальный осмотр и макрофотосъемка использовались для определения общих тенденций и особенностей повреждений;

– сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с высоким разрешением до 4000х использовалась для детального изучения морфологии поверхности (SE-режим), а также для визуализации различий в составе материала по атомному весу (BSE-режим). При наличии в материале образца неоднородности состава его изображение будет иметь хорошо различимые области с четкими границами между ними. Так, светлые области будут соответствовать материалу с более высоким атомным номером;

– рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) в составе СЭМ применялся для определения элементного состава в зонах повреждений. Этот метод играет ключевую роль в подтверждении явления массопереноса в соединениях разнородных металлов;

– металлографический анализ использовался для исследования изменений микроструктуры металла, таких как размер и форма зёрен, с особым акцентом на переходные зоны.

Результаты и обсуждение

В результате исследований были не только определены общие диагностические критерии аварийных режимов, представленные в таблице, но и выявлены специфические особенности, характерные для различных типов алюминиевых кабелей и их соединений. Это имеет важное значение для экспертной практики.

Таблица

Диагностические критерии аварийных режимов для алюминиевых проводников

Аварийный режим/ вид воздействия	Макроскопические (визуальные) признаки	Микроскопические признаки (СЭМ, металлография)
Номинальный ток (нормальный режим)	–	Мелкозернистая структура. Преобладает α -Al матрица. Равномерно распределённые вторичные фазы

Аварийный режим/ вид воздействия	Макроскопические (визуальные) признаки	Микроскопические признаки (СЭМ, металлография)
Сверхток (перегрузка)	Зависят от кратности и времени: 1,5–3 кр. (150–600 с): оплавление изоляции изнутри; 4–8 кр. (8–50 с): поверхность проводника окисленная и матовая; >9 кр. (<8 с): хрупкий излом или локальные оплавления	Универсальный признак: ячеистая структура на торце излома (1000 х). Металлография: – рост среднего размера зерна с 12,6 мкм при токе 60 А до максимального значения 23,7 мкм при 328 А; – резкое уменьшение размера зерна до 7,2 мкм при 600 А
КЗ	Локальные оплавления на концах	КЗ до пожара: ячеистая структура с порами. КЗ во время пожара: плотная структура без пор, примеси продуктов горения
БПС	Локальное оплавление в зоне контакта. Признаки диффузии металлов (например, желтые пятна меди на алюминии)	Углубления полусферической формы (лунки). Обнаружение посторонних элементов (Zn, Fe, Cu, Sn) на алюминии – доказательство массопереноса
Внешнее тепловое воздействие	Тепловое расширение, трещины. Волнообразные наплывы	Отсутствие ячеистой структуры. Рельефные элементы (полосы, складки) на изломе. Зёрна плотные, без пор

Специфические диагностические признаки для различных типов объектов:

– соединительные муфты и контактные соединения: ключевые критерии – массоперенос элементов (Fe, Zn, Cu на алюминии, выявляемый РФЛА) и наличие лунок полусферической формы на поверхности, свидетельствующих о локальном высокотемпературном воздействии, аналогичном дуге КЗ, но в условиях плохого контакта;

– СИП: на отдельных проволоках СИП при сверхтоке также формируется ячеистая структура в зоне разрыва. Анализ изоляции критически важен: карбонизация с внутренней стороны указывает на перегрев от сверхтока, в то время как внешнее тепловое воздействие приводит к иному характеру повреждения;

– бронированные кабели: броня обладает тепловой инерцией, что необходимо учитывать при оценке термического воздействия на жилы. Исследование самой брони на предмет локального перегрева может служить индикатором очага;

– кабельные наконечники и соединения алюминия с медью: доказательством БПС является массоперенос. Обнаружение меди на алюминиевой жиле и алюминия на медном наконечнике в зоне контакта с помощью РФЛА – признак аварийного режима. При внешнем тепловом воздействии образуется гетерогенная структура интерметаллидов.

На основе выявленного комплекса общих и специфических диагностических критериев была разработана научно обоснованная методика экспертного исследования, представляющая собой последовательных действий, представленный на рис. 4.

Данная методика регламентирует путь от макроскопического осмотра до применения инструментальных методов анализа с учетом типа исследуемого кабельного изделия, что обеспечивает комплексный и объективный подход к установлению причины повреждения.

Эффективность методики обусловлена ее научной базой, комплексным подходом и применением взаимодополняющих методов. Учет специфики различных типов кабелей и соединений повышает ее дифференцирующую способность и практическую ценность. Внедрение методики в практику экспертов стандартизирует процесс исследования, снижает субъективность и значительно увеличивает достоверность выводов.

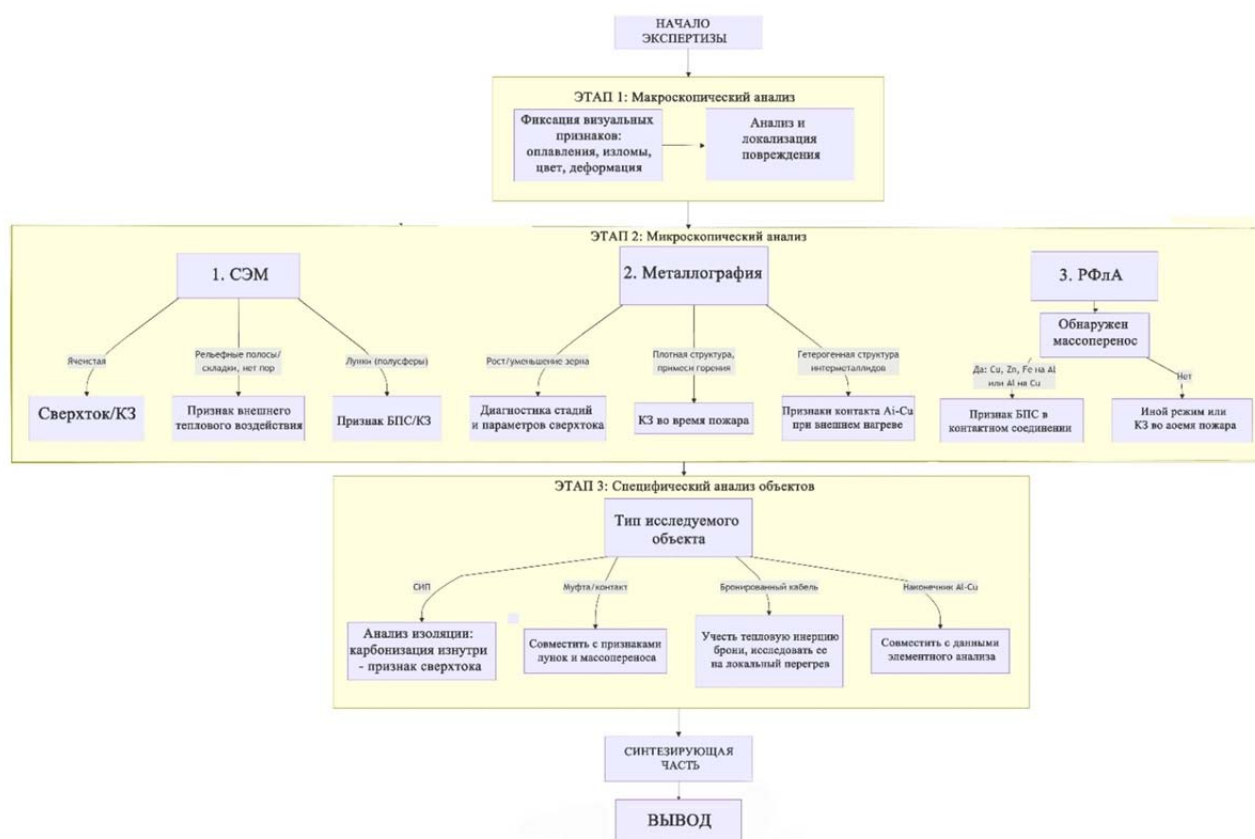


Рис. 4. Блок-схема методики дифференциации повреждений алюминиевых проводов и кабелей после пожаров

Заключение

В ходе исследования создан методика дифференциации повреждений алюминиевых проводов и кабелей после пожаров, которая служит эффективным средством для различения повреждений алюминиевых проводников, возникших из-за аварийных режимов работы сети и теплового воздействия пожара.

Разработаны и систематизированы общие диагностические критерии (макро- и микроскопические, металлографические, элементные). Также детально проработаны ключевые критерии для различных типов кабельной продукции и соединений: соединительных муфт, СИП, бронированных кабелей, наконечников, биметаллических проводников и алюминиевых медных контактов.

Предлагаемая методика устанавливает чёткий порядок проведения экспертного исследования, что гарантирует его комплексность, объективность и учёт конструктивных особенностей объекта на всех этапах – от отбора проб до формулирования выводов. В её основу впервые внедрён дифференцированный подход к анализу широкого ассортимента алюминиевых кабелей и соединений.

Результаты работы вносят существенный вклад в повышение достоверности пожарно-технических экспертиз, что напрямую способствует повышению пожарной безопасности объектов энергетики, и создают основу для дальнейших исследований в данной области.

Список источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО. 2020. 125 с.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО. 2021. 112 с.

3. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО. 2022. 114 с.
4. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО. 2023. 80 с.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО. 2024. 110 с.
6. Мокряк А.В. Обзор и пожарная опасность алюминиевых проводников // Наукосфера. 2023. № 8-2. С. 67–70. EDN NTHFCO.
7. Мокряк А.В. Визуальное исследование следов больших переходных сопротивлений в контактных узлах алюминиевых проводников // Наукосфера. 2023. № 3-2. С. 199–202. EDN EZRVJM.
8. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М.: ООО «КАБЕЛЬ», 2009. 328 с.
9. Мокряк А.Ю., Мокряк А.В. Исследование металлических и электротехнических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: монография. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. 212 с.
10. Analysis on Fire Risk of Aluminium Conductors under Electrical Faults in Low Voltage Circuit / X. Wang [et al.] // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. P. 408–412. DOI:10.1016/j.proeng.2013.02.161
11. Черкасов В.Н., Харламенков А.С. Почему в настоящее время медные проводники предпочтительнее алюминиевых? // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 7. С. 76–77. EDN WUIRUV.
12. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия: Методические рекомендации / Л.С. Митричев [и др.]. М.: ВНИИ МВД СССР, 1986.
13. Comprehensive identification technology about electric fire / G. Pan [et al.] // Journal of Fire Science and Technology. 2005. Vol. 24 (4). P. 495–497.
14. Влияние короткого замыкания и термического воздействия на микроструктуру медных и алюминиевых проводников / И.В. Тихонова [и др.] // Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твердых телах. Тула: Тульский государственный университет, 2007. С. 49. EDN YQLKLH.
15. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия. М.: Техносфера, 2008. 232 с.
16. Pariyskaya A.Yu., Mokryak A.V., Pyankova L.A. Comprehensive study of changes in the phase composition of copper-aluminum conductors during heating // Journal of Physics: Conference Series : III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 32018. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/3/032018.

References

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2019 godu: statisticheskij sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO. 2020. 125 s.
2. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2020 godu: statisticheskij sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO. 2021. 112 s.
3. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: statisticheskij sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO. 2022. 114 s.
4. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2022 godu: statisticheskij sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO. 2023. 80 s.
5. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2023 godu: statisticheskij sbornik / pod obshch. red. D.M. Gordienko. M.: VNIPO. 2024. 110 s.
6. Mokryak A.V. Obzor i pozharnaya opasnost' alyuminievyh provodnikov // Naukosfera. 2023. № 8-2. S. 67–70. EDN NTHFCO.

7. Mokryak A.V. Vizual'noe issledovanie sledov bol'shikh perekhodnykh soprotivlenij v kontaktnykh uzlah alyuminievykh provodnikov // Naukosfera. 2023. № 3-2. S. 199–202. EDN EZRVJM.
8. Smelkov G.I. Pozharnaya bezopasnost' elektroprovodok. M.: ООО «KABEL'», 2009. 328 s.
9. Mokryak A.Yu., Mokryak A.V. Issledovanie metallicheskih i elektrotekhnicheskikh ob"ektov sudebnoj požarno-tekhnicheskoj ekspertizy: monografiya. SPb.: Sankt-Peterburgskij universitet GPS MChS Rossii, 2022. 212 s.
10. Analysis on Fire Risk of Aluminium Conductors under Electrical Faults in Low Voltage Circuit / X. Wang [et al.] // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. P. 408–412. DOI:10.1016/j.proeng.2013.02.161
11. Cherkasov V.N., Harlamenkov A.S. Pochemu v nastoyashchee vremya mednye provodniki predpochtitel'nee alyuminievyh? // Pozharovzryvbezopasnost'. 2017. T. 26. № 7. S. 76–77. EDN WUIRUV.
12. Issledovanie mednykh i alyuminievykh provodnikov v zonah korotkogo zamykaniya i termicheskogo vozdejstviya: Metodicheskie rekomendacii / L.S. Mitrichev [i dr.]. M.: VNII MVD SSSR, 1986.
13. Comprehensive identification technology about electric fire / G. Pan [et al.] // Journal of Fire Science and Technology. 2005. Vol. 24 (4). R. 495–497.
14. Vliyanie korotkogo zamykaniya i termicheskogo vozdejstviya na mikrostrukturu mednykh i alyuminievykh provodnikov / I.V. Tihonova [i dr.] // Vzaimodejstvie defektov i neuprugie yavleniya v tverdykh telah. Tula: Tul'skij gosudarstvennyj universitet, 2007. S. 49. EDN YQLKLH.
15. Rid S.Dzh.B. Elektronno-zondovyj mikroanaliz i rastrovaya elektronnaya mikroskopiya. M.: Tekhnosfera, 2008. 232 s.
16. Pariyskaya A.Yu., Mokryak A.V., Pyankova L.A. Comprehensive study of changes in the phase composition of copper-aluminum conductors during heating // Journal of Physics: Conference Series : III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 32018. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/3/032018.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.10.2025; одобрена после рецензирования: 06.12.2025; принята к публикации: 08.12.2025

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 18.10.2025; approved after review: 06.12.2025; accepted for publication: 08.12.2025

Информация об авторах:

Мокряк Анна Васильевна, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: mokryakanna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6630-4045>, SPIN-код: 8987-0146

Королева Людмила Анатольевна, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN-код: 6101-9772

Information about authors:

Mokryak Anna V., researcher of the department of calculative methods and informational technologies in the fire expertise Fire Expertise Research Centre of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: mokryakanna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6630-4045>, SPIN: 8987-0146

Koroleva Lyudmila A., professor of the department of fire, emergency rescue equipment and automobile economy of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN: 6101-9772