https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.06.18-28
УДК 656.13;614.84;517.958:539:3(6)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

О физической основе локальной токовой перегрузки в автомобильной электрической сети

© **А. И. Недобитков**✉, **Б. М. Абдеев**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет
(Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19)

РЕЗЮМЕ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют о том, что проблема повышения пожарной безопасности автотранспортных средств очень актуальна. Целью статьи является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, имеющего признаки локальной токовой перегрузки, для установления причины его повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.
Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения медного проводника подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.
Теоретические основы (теория и расчеты). Разработана уточненная модель предельного напряженно-деформированного состояния неупругого чистого изгиба медного стержня, имеющего круглое поперечное сечение. Решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность изгибаемых одиночных медных проводников. На конкретном примере показана применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы.
Результаты и обсуждение. Приведены примеры пожаров транспортных средств, возникновение которых обусловлено критическим изгибом жгута проводов. Экспериментальными данными подтверждено, что оплавление медного проводника под действием токовой перегрузки происходит на участке критического изгиба. Обоснована необходимость уточнения формулировки термина “локальная токовая перегрузка”.
Заключение. Предложен метод определения критического изгиба медного проводника, при котором может произойти его оплавление под действием электрического тока. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и в конечном счете причины пожара автомобиля.

Ключевые слова: пожар; медный проводник; короткое замыкание; сверхток; медь; растровая электронная микроскопия; напряженно-деформированное состояние; изгиб; диагностический признак; пожарно-техническая экспертиза.

Для цитирования: *Недобитков А. И., Абдеев Б. М.* О физической основе локальной токовой перегрузки в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 6. — С. 18–28. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.18-28.

✉ *Недобитков Александр Игнатьевич*, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

On physical basis of local current overload in vehicle electric mains

© **Alexandr I. Nedobitkov**✉, **Boris M. Abdeev**

D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University
(Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The data presented in the article indicate that the problem of improving fire safety of vehicles is very topical. The aim of the article is to develop a scientifically based method for studying a copper conductor with signs of local current overload in order to establish the cause of its damage during a fire-technical examination.
Materials and methods. The studies were carried out with a JSM-6390LV scanning electron microscope with an add-on device for energy dispersive microanalysis. The fracture surfaces of the copper conductor were analyzed without preliminary sample preparation.
Theoretical foundations (theory and calculations). An updated model of ultimate stress-strain state of inelastic pure bending of a copper rod of circular cross section has been developed. The solution has been reduced to simple rating formulas that allow us to evaluate the bearing capacity of flexible single copper conductors. The applicability of the developed mathematical model during the fire-technical examination is shown by a specific example.
Results and discussion. Examples of vehicle fires caused by critical bending of the wiring harness are given in the article. Experimental data confirmed that the copper conductor under current overload melts in the critical bend area. The need to clarify the wording of the term “local current overload” is justified.

Conclusion. A method for determining the critical bending of a copper conductor at which its melting can occur under electric current has been proposed. The data presented in the article can be used by experts in an expert study of copper conductors from fire sites to establish the mechanism of their damage and, ultimately, the cause of a vehicle fire.

Keywords: fire; copper conductor; short circuit; overcurrent; copper; scanning electron microscopy; stress-strain state, bending, diagnostic signs; fire technical expertise.

For citation: A. I. Nedobitkov, B. M. Abdeev. On physical basis of local current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 6, pp. 18–28 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.18-28.

✉ *Alexandr Ignatyevich Nedobitkov*, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Введение

Авторами работ [1–3] наглядно и убедительно проиллюстрировано, что пожары наносят значительный ущерб экономике государства. Большую часть среди них занимают пожары на автотранспортных средствах (далее — АТС). Необходимо отметить, что на современном этапе автомобилестроения доля электромобилей в общем числе АТС неуклонно растет. Например, в Норвегии она составляет 49,14 % от общего количества проданных транспортных средств. В связи с этим выводы авторов работ [4–13] о том, что отдельные элементы электрической системы автомобиля могут служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи, являются вполне обоснованными.

В частности, авторы работы [6], обосновывая необходимость классификации аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей, подчеркивают, что при исследовании сгоревшего автомобиля практически всегда рассматривается так называемая “электрическая” версия возникновения пожара.

В работах [10, 11], посвященных поведению медных проводников под действием токовой перегрузки, указывается на сложность визуальной дифференциации их оплавлений. Этот вывод в той или иной форме поддерживается авторами [6, 7, 9, 13], а также такими исследователями, как V. Babrauskas, Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen и др., которые предлагают как новые методы исследования, так и уточнение существующих [14–24]. В частности, авторами [6, 11] было введено понятие локальной токовой перегрузки (далее — ЛТП).

В настоящей работе на основе исследований [6, 9, 10, 11, 13, 24] предпринята попытка обосновать математическую модель, применение которой позволит идентифицировать причину разрушения медного проводника под действием токовой перегрузки.

Целью работы является теоретическое обоснование физической природы локальной токовой перегрузки на примере изгиба одиночного медного проводника.

В статье поставлены следующие задачи:

- разработать уточненную модель предельного напряженно-деформированного состояния неупругого чистого изгиба медного стержня с круглым поперечным сечением;
- довести решение до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность изгибаемых одиночных медных проводников;
- экспериментально подтвердить оплавление в области изгиба медного одиночного проводника при протекании тока перегрузки;
- на конкретном примере показать применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы;
- показать необходимость уточнения формулировки термина “локальная токовая перегрузка”.

Материалы и методы исследования

Как и в работе [13], исследования проводились в Центре опережающего развития “Veritas” Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. По аналогии с [13] поверхности разрушения медного проводника подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

В целях максимальной простоты и наглядности эксперимента объектом лабораторного исследования был выбран одножильный медный проводник без изоляционного покрытия длиной 44 см, сечением 1,76 мм^2. Проводник предварительно изгибали под углом 90°, закрепляли на установке У-1134М и пропускали через него ток. Согласно справочным данным максимально допустимая сила тока для медного проводника такого сечения составляет порядка 23 А.

Теоретические основы

Новизна предлагаемой модели заключается в том, что зависимость между нормальным напряжением σ и относительной продольной деформацией ε аппроксимируется двумя несимметричными функциональными выражениями и общим начальным

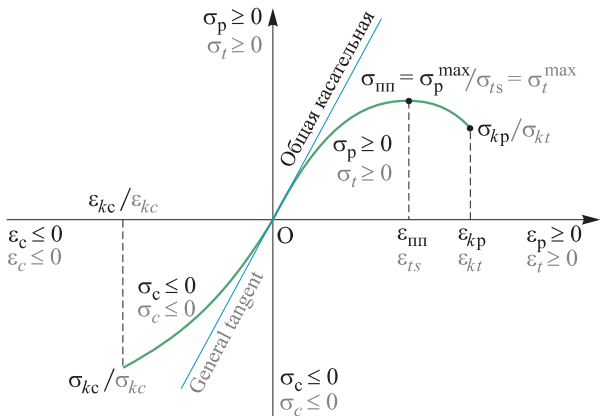

Рис. 1. Диаграмма, построенная на основе выражений (1) и (2)
Fig. 1. Diagram based on expressions (1) and (2)

модулем упругости E [25], описывающими интенсивность внутренних сил и деформаций пластичного материала (рис. 1):

- при растяжении в виде кубической параболы, имеющей экстремум, равный известному пределу прочности $\sigma_{пп}$, и нисходящий участок, оканчивающийся напряжением $\sigma_{kp} < \sigma_{пп}$ и характеризующий повышение пластичности на внешней границе изгибаемого элемента [25]:

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon_p) = E\varepsilon_p - A_p\varepsilon_p^3 \geq 0, \quad 0 \leq \varepsilon_p \leq \varepsilon_{kp}; \qquad (1)$$

- в виде кривой второй степени, возрастающей в пределах сжатой области сечения:

$$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c) = E\varepsilon_c + A_c\varepsilon_c^2 \leq 0, \quad -\varepsilon_{kc} \leq \varepsilon_c \leq 0, \qquad (2)$$

где σ_p — нормальное напряжение в растянутой области изгибаемого проводника;
σ_c — нормальное напряжение, действующее в сжатой зоне изгибаемого проводника;
ε_p — относительная линейная растягивающая деформация, соответствующая σ_p;
ε_c — относительная линейная деформация сжатия, соответствующая σ_c;
σ_{kc}, σ_{kp}, ε_{kc}, ε_{kp} — соответственно напряжения и линейные относительные деформации в крайних точках (индекс “k”) круглого поперечного сечения изгибаемого проводника;
A_p, A_c — искомые коэффициенты; $A_p = \text{const}$; $A_c = \text{const}$.

Необходимо указать, что эмпирическая кривая (1) имеет широкое распространение в практических приложениях [25].

В основу решаемой статической физико-математической задачи положены классические допущения прикладной механики деформируемого твердого тела в условиях нормального температурного градиента [25–27]:

1) материал однородный, сплошной, изотропный;
2) в процессе изгиба стержня (рис. 2):
– форма и диаметр его поперечного сечения d не изменяются:
– радиус кривизны ρ геометрической оси остается постоянным, т. е.

$$\rho = \text{const}; \qquad (3)$$

– координатная ось симметрии x совпадает с центром тяжести O круглого сечения и является нейтральной, если

$$\varepsilon_p = \varepsilon_c = 0, \quad \sigma_p = \sigma_c = 0; \qquad (4)$$

3) соблюдается гипотеза плоских сечений:

$$\varepsilon = \varepsilon y = y/\rho; \quad -d/2 \leq y \leq d/2. \qquad (5)$$

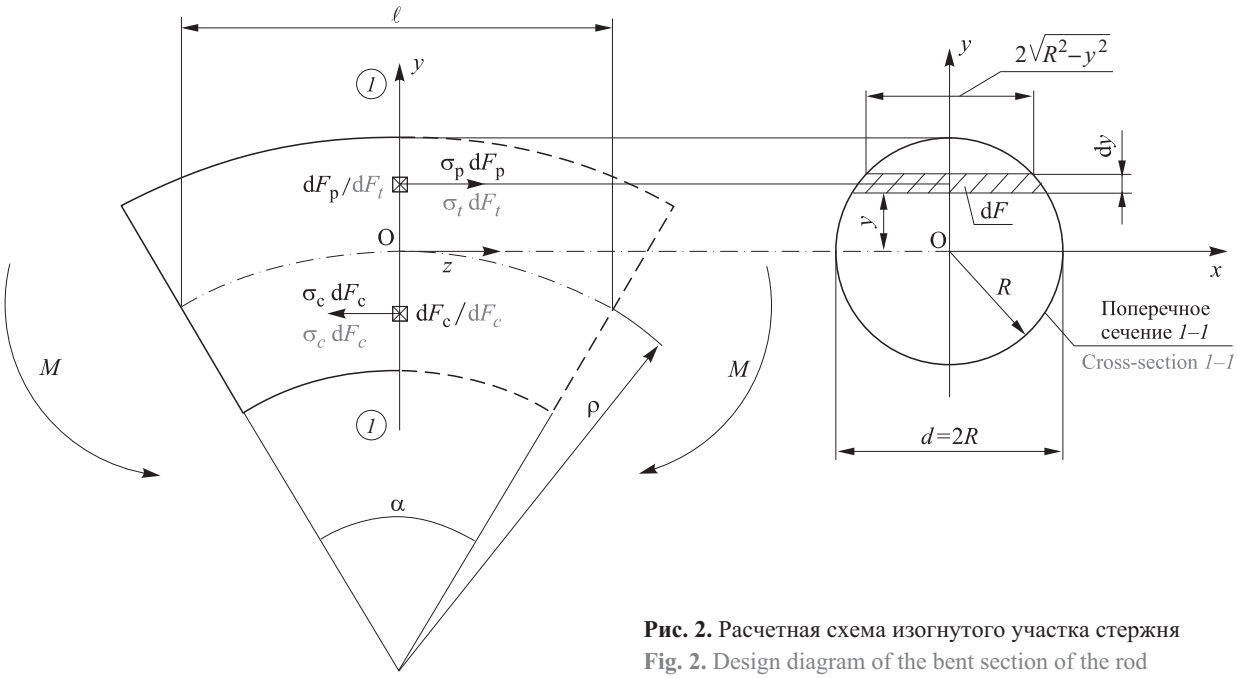

Рис. 2. Расчетная схема изогнутого участка стержня
Fig. 2. Design diagram of the bent section of the rod

Следует отметить, что прямо пропорциональное соотношение (5) между ε и y, широко используемое в механике, было выведено на основании чисто геометрических соображений и поэтому совершенно не связано со свойствами материала и видом графика зависимости напряжения σ от деформации ε [25, 26] (см. рис. 1).

Формулируем с учетом допущений (1), (2) и (5) первое необходимое условие равновесия:

$$N = \int_F \sigma \mathrm{d}F = 0, \tag{6}$$

которое эквивалентно отсутствию равнодействующей внутренней силы N, перпендикулярной плоскости любого радиального сечения и обусловленной напряжениями $\sigma_р$ и $\sigma_с$ [25, 26] (см. рис. 2):

$$\int_F \sigma \mathrm{d}F = \int_{F_р} \sigma_р \mathrm{d}F + \int_{F_с} \sigma_с \mathrm{d}F = \\ = 2\int_0^{0,5d} \sigma_р \sqrt{\frac{d^2}{4} - y^2}\mathrm{d}y + 2\int_{-0,5d}^{0} \sigma_с \sqrt{\frac{d^2}{4} - y^2}\mathrm{d}y = 0, \tag{7}$$

где F, $F_р$, $F_с$ — общая площадь всего сечения и аналогичные геометрические характеристики соответственно его растянутой и сжатой частей; $F_р = F_с$.

Вторым уравнением связываем функцию изгибающего момента M с кривизной бруса $1/\rho = \mathrm{const}$ [25, 26] (см. рис. 2):

$$M = M\left(\frac{1}{\rho}\right) = \int_F \sigma y \mathrm{d}F = \int_{F_р} \sigma_р y \mathrm{d}F + \int_{F_с} \sigma_с y \mathrm{d}F = \\ = 2\int_0^{0,5d} \sigma_р y\sqrt{\frac{d^2}{4} - y^2}\mathrm{d}y + 2\int_{-0,5d}^{0} \sigma_с y\sqrt{\frac{d^2}{4} - y^2}\mathrm{d}y = 0. \tag{8}$$

Для получения экстремума $\sigma_р^{max} = \sigma_{пп}$ функции $\sigma_р(\varepsilon_{пп})$, свидетельствующего о наличии требуемой нисходящей ветви на графике $\sigma_р(\varepsilon_{пп})$ (см. рис. 1), преобразуем выражение (1) по методике [25]:

$$\left[\frac{\mathrm{d}\sigma_р}{\mathrm{d}\varepsilon_р}\right]_{\varepsilon=\varepsilon_{пп}} = E_к = E - 3A_р\varepsilon_{пп}^2 = 0; \tag{9}$$

$$\varepsilon_{пп} = \sqrt{\frac{E}{3A_р}}; \quad A_р = \frac{E}{3\varepsilon_{пп}^2}, \tag{10}$$

где $E_к$ — касательный модуль [25, 26].

Заменяя $\varepsilon_р$ на $\varepsilon_{пп}$ в (1) при $\sigma_р(\varepsilon_{пп}) = \sigma_{пп}$, получаем требуемое выражение для определения физико-механической константы $A_р$:

$$A_р = \frac{4E^3}{27\sigma_{пп}^2}. \tag{11}$$

Постоянную $A_с$ вычисляем из статического равенства (7) при условии $0,5d = R$. После подстановки (1), (2) с учетом (5), (11) и раскрытия интегралов с помощью таблиц [28] получаем:

$$\int_0^R \left[E\frac{y}{\rho} - A_р\left(\frac{y}{\rho}\right)^3\right]\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y + \\ + \int_{-R}^{0} \left[E\frac{y}{\rho} - A_с\left(\frac{y}{\rho}\right)^2\right]\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = 0. \tag{12}$$

Для определения значений интегральных выражений, входящих в алгебраическое уравнение (12), воспользуемся двумя общими справочными формулами [28, 29]:

$$\int y^n \sqrt{(R^2 - y^2)}\mathrm{d}y = -\frac{y^{n-1}\sqrt{(R^2 - y^2)^3}}{n+2} + \\ + \frac{(n-1)R^2}{n+2}\int y^{n-2}\sqrt{(R^2 - y^2)}\mathrm{d}y; \tag{13}$$

$$\int \sqrt{(R^2 - y^2)}\mathrm{d}y = \frac{1}{2}\left(y\sqrt{(R^2 - y^2)} + R^2 \arcsin\frac{y}{R}\right), \tag{14}$$

где $n = 1, 2, 3$; $R = 0,5d$ (см. рис. 2).

В итоге получаем:

- при $n = 1$

$$\int_0^R y\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = \frac{R^3}{3} = \frac{d^3}{24}; \tag{15}$$

$$\int_{-R}^{0} y\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = -\frac{R^3}{3} = -\frac{d^3}{24}; \tag{16}$$

- при $n = 2$

$$\int_{-R}^{0} y^2\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = \frac{\pi R^4}{16} = \frac{\pi d^4}{256}; \tag{17}$$

- при $n = 3$

$$\int_{-R}^{0} y^3\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y = \frac{2R^5}{15} = \frac{d^5}{240}. \tag{18}$$

Подставляем (15)–(18) в соотношение (12), исключаем $A_р$ с помощью (11) и в результате получаем

$$A_с = \frac{64E^3 d}{405\pi\sigma_{пп}^2}\left(\frac{1}{\rho}\right). \tag{19}$$

Далее, используя интегральную сумму (8) и формулы (1), (2), (5), (11), (19) и учитывая со знаком “минус” (17) и (18), находим изгибающий момент M в зависимости от кривизны $1/\rho$ деформированной оси стержня (см. рис. 2):

$$M = M\left(\frac{1}{\rho}\right) = 2E\left(\frac{1}{\rho}\right)\int_0^R y^2\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y - \\ - \frac{8E^3}{27\sigma_{пп}^2}\left(\frac{1}{\rho}\right)^3\int_0^R y^4\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y + \\ + 2E\left(\frac{1}{\rho}\right)\int_{-R}^{0} y^2\sqrt{R^2 - y^2}\mathrm{d}y +$$

$$+\frac{128E^3d}{405\pi\sigma_{\text{пп}}^2}\left(\frac{1}{\rho}\right)^3\int_{-R}^{0}y^3\sqrt{R^2-y^2}\,\mathrm{d}y=$$

$$=\left[\frac{1}{\rho}-\frac{64E^2d^2}{\pi\sigma_{\text{пп}}^2}\left(\frac{8}{405\pi\cdot 15}+\frac{\pi}{27\cdot 256}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right)^3\right]=$$

$$=\frac{\pi d^4E}{64}\left[\frac{1}{\rho}-0{,}0178\frac{E^2d^2}{\sigma_{\text{пп}}^2}\left(\frac{1}{\rho}\right)^3\right];$$

$$0\le\frac{1}{\rho}\le\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max},\qquad(20)$$

где дополнительный интеграл $\int_0^R y^4\sqrt{R^2-y^2}\,\mathrm{d}y$ вычисляется на основе формулы (13) при $n = 4$, с учетом (17) и при замене $R = 0{,}5d$:

$$\int_0^R y^4\sqrt{R^2-y^2}\,\mathrm{d}y=\frac{\pi d^6}{8\cdot 256}=\frac{\pi d^6}{2048}.\qquad(21)$$

Дифференцируя (20) по параметру $1/\rho$ и приравнивая производную нулю, получаем расчетные аналитические зависимости для наибольшей кривизны $(1/\rho)_{\max}$ и минимального (предельного) радиуса $\rho_{\min}$, соответствующие $M_{\max}$:

$$\left[\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\left(\frac{1}{\rho}\right)}\right]_{\frac{1}{\rho}=\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max}}=\frac{\pi d^4E}{64}\times$$

$$\times\left[1-0{,}0534\frac{E^2d^2}{\sigma_{\text{пп}}^2}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2_{\max}\right]=0.\qquad(22)$$

Отсюда следует, что

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)^2_{\max}=4{,}327\frac{\sigma_{\text{пп}}}{Ed},\quad \rho_{\min}=0{,}231\frac{Ed}{\sigma_{\text{пп}}},\qquad(23)$$

а функция (20) достигает экстремума:

$$M_{\max}=M\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max}=0{,}1416d^3\sigma_{\text{пп}}.\qquad(24)$$

Руководствуясь зависимостью

$$\sigma_{\text{р}}=\sigma_{\text{р}}(y)=E\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max}y-A_{\rho}\left(\frac{1}{\rho}\right)^3_{\max}y^3,\qquad(25)$$

основанной на (1), (5) и (23), а также [25], определяем ординату y_m, соответствующую максимальному значению $\sigma_{\text{р}}^{\max}=\sigma_{\text{пп}}$ (см. рис. 1 и 2):

$$\left[\frac{\mathrm{d}\sigma_{\text{р}}}{\mathrm{d}y}\right]_{y=y_m}=E\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max}-3A_{\rho}\left(\frac{1}{\rho}\right)^3_{\max}y_m^2=0;\qquad(26)$$

$$y_m=\rho_{\min}\sqrt{\frac{E}{3A_{\rho}}}=0{,}231\frac{Ed}{\sigma_{\text{пп}}}\sqrt{\frac{27E\sigma_{\text{пп}}^2}{12E^3}}=$$
$$=0{,}3465d=0{,}693R.\qquad(27)$$

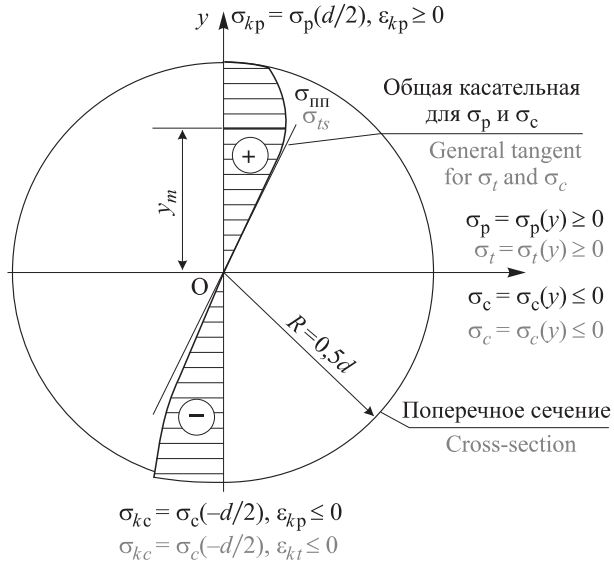

Рис. 3. Эпюры напряжений в плоскости поперечного сечения круглого стержня, соответствующие экстремумам $\sigma_{\text{пп}}$, $\rho_{\min}$ и $M_{\max}$

Fig. 3. Stress plots in the cross-sectional plane of a round rod corresponding to extremes σ_{ts}, $\rho_{\min}$, $M_{\max}$

Напряжения $\sigma_{k\text{р}}$ и $\sigma_{k\text{c}}$ в крайних волокнах $y = \pm d/2$ исследуемого поперечного сечения (см. рис. 1 и 2) определяются подстановкой в формулы (2) и (25) констант $A_{\text{р}}$ и A_{c}, полученных в (11) и (19), и предельных значений относительных деформаций (см. рис. 1):

$$\varepsilon_{k\text{р}}=\varepsilon_{\text{р}}\left(\frac{d}{2}\right)=\frac{d}{2}\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max};$$
$$\varepsilon_{k\text{c}}=\varepsilon_{\text{c}}\left(-\frac{d}{2}\right)=-\frac{d}{2}\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\max}.\qquad(28)$$

Таким образом, согласно (5) и (23) (см. рис. 2) имеем:

$$\sigma_{k\text{р}}=\sigma_{\text{р}}\left(\frac{d}{2}\right)=0{,}6635\sigma_{\text{пп}};$$
$$\sigma_{k\text{c}}=\sigma_{\text{c}}\left(-\frac{d}{2}\right)=-1{,}14471\sigma_{\text{пп}}.\qquad(29)$$

Численные значения, полученные из (19)–(27), полностью согласуются с обобщенной графической иллюстрацией эпюр внутренних силовых факторов (рис. 3).

По значению $\rho_{\min}$, вычисленному по (23), можно определить радиус закругления проводника на участке перегиба длиной l с центральным углом α (см. рис. 2) [29]:

- в случае $l \ge l_{\min}$

$$l_{\min}=\frac{\alpha\pi\rho_{\min}}{180},\quad 0\le\alpha\le 180°;\qquad(30)$$

- в случае $\alpha \le \alpha_{\max}$

$$\alpha_{\max}=\frac{180l}{\pi\rho_{\min}}.\qquad(31)$$

Очевидно, что для проведения расчетов должен быть известен один из параметров — α или l.

Расчеты

Для определения физико-геометрических характеристик $(1/\rho)_{max}$, ρ_{min}, M_{max}, y_m, σ_{kp} и σ_{kc} приведем пример апробации выведенных формул (23), (24), (27) и (29) на примере одиночного медного проводника диаметром 1 мм, имеющего начальный модуль упругости $E = 13000$ кгс/мм^2 и предел прочности $\sigma_{пп} = 50$ кгс/мм^2:

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_{max} = 4{,}32\frac{\sigma_{пп}}{Ed} = 4{,}327\frac{50}{13000\cdot 1} = 0{,}0166 \text{ мм}^{-2};$$

$$\rho_{min} = 1/0{,}0166 = 60{,}2 \text{ мм};$$

$$M_{max} = 0{,}1416d^3\sigma_{пп} = 7{,}08 \text{ кгс·мм};$$

$$y_m = 0{,}693R = 0{,}3465 \text{ мм};$$

$$\sigma_{kp} = 0{,}6635\sigma_{пп} = 33{,}18 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\sigma_{kc} = -1{,}1447\sigma_{пп} = -57{,}24 \text{ кгс/мм}^2.$$

Таким образом, изгиб медного проводника диаметром 1 мм с радиусом закругления 60 мм с точки зрения напряженно-деформированного состояния уже будет являться предельно допустимым. Это не означает, что проводник под действием этих напряжений разрушится в обычных условиях. Расчет наглядно демонстрирует, что сжимающие напряжения в поверхностном слое превышают предел прочности, в то время как растягивающие напряжения еще не достигли критического значения. В частности, если по такому медному проводнику с критическим радиусом закругления будет пропущен сверхток даже небольшой кратности, например 1,8–2,0, то через какой-то промежуток времени именно на этом участке произойдет оплавление проводника. Вполне очевидно, что оплавление проводника является пожароопасным режимом. Необходимо напомнить, что в работе [10] экспериментально установлено, что при 3–4-кратной токовой перегрузке в приповерхностном слое проводника имеет место оплавление границ зерен, повышенная концентрация пор и общее поверхностное оплавление. Таким образом, результаты расчета согласуются с экспериментальными данными [10].

Результаты и их обсуждение

По мнению авторов [6, 11], локальная токовая перегрузка — это аварийный пожароопасный режим работы электросети, возникающий вследствие локального уменьшения площади сечения жилы электропроводника.

В работах [6, 11] отмечается, что в специальной технической литературе режим ЛТП не выделяют среди прочих аварийных пожароопасных электрических режимов, отсутствует также анализ его пожарной опасности и методика установления причастности к возникновению пожара. Таким образом, авторы [6, 11] сделали один из первых шагов в данном направлении. При этом они прямо указывают, что отличительной особенностью ЛТП является то, что сила тока для всей цепи не изменяется. Это означает, что устройство автоматической защиты (автомат защиты, предохранитель), реагирующее на рост тока при КЗ или обычной токовой перегрузке, не отключит электросеть от источника питания, в результате чего выделение тепла на локальном участке будет происходить неконтролируемо [6, 11].

В настоящей статье, помимо основной задачи, предпринята попытка показать, что формулировка термина ЛТП, предложенная авторами [6, 11], требует уточнения.

Следует напомнить, что согласно п. 3.1.11 [30] в сетях, защищаемых от перегрузок, проводники следует выбирать по расчетному току, причем таким образом, чтобы по отношению к длительно допустимым токовым нагрузкам аппараты защиты имели кратность не более 80–100 % от величины номинального тока. Иначе говоря, аппарат защиты не будет срабатывать при кратности тока перегрузки менее 1,8–2,0.

В работе [13] экспериментально доказано, что медный проводник при токовой перегрузке в первую очередь подвергается разрушению в местах, в которых возникает предварительное напряжение вследствие пластической деформации.

Кроме того, согласно п. 2.3.20 [30] “радиусы внутренней кривой изгиба кабелей должны иметь по отношению к их наружному диаметру кратности не менее указанных в стандартах или технических условиях”.

Например, согласно п. 9.1 ГОСТ 23586–96 (Монтаж электрической радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Технические требования к жгутам и их креплению) “внутренний радиус изгиба укладываемого в аппаратуре жгута диаметром не более 20 мм должен быть не менее трех диаметров жгута”. Практика показывает, что далеко не всегда это требование выполняется. На рис. 4 видно, что для ограничения перемещения двужильный провод был завязан узлом, и это привело к локальному нагреву на данном участке электрической цепи. Только благодаря специфическому запаху нагретой изоляции этот дефект был обнаружен. Если бы дефект не был устранен, то изоляция бы воспламенилась. Указанный случай хорошо подпадает под определение ЛТП, согласно которому устройство автоматической защиты при приведенной в качестве примера токовой перегрузке не отключит электросеть от источника

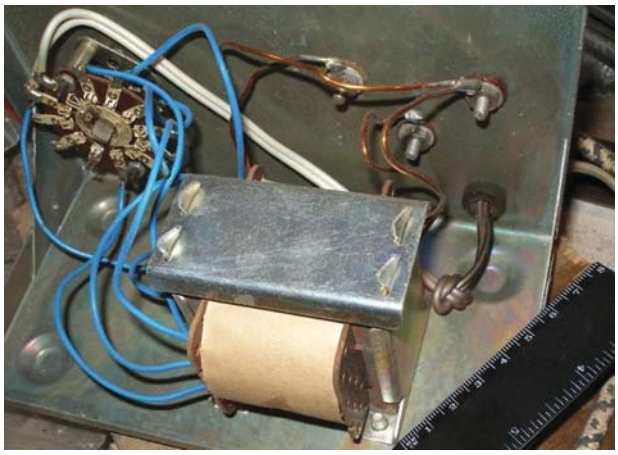

Рис. 4. Изменение цвета изоляции провода на участке, имеющем остаточные механические напряжения

Fig. 4. Changing the color of the wire insulation in the area having residual mechanical stresses

питания и выделение тепла на локальном участке будет происходить неконтролируемо. Следует подчеркнуть, что уменьшения площади сечения жилы электропроводника в данном случае не наблюдается.

В отношении автомобильной электропроводки следует отметить, что в период 2013–2014 гг. имели место многочисленные случаи возгорания новых автомобилей LADA Granta после установки автомагнитолы Sony (рис. 5).

Очаг пожара располагался в правой части панели приборов в области прокладки антенного кабеля (см. рис. 5,*а*). Штатная глубина отсека для головного устройства у данного автомобиля меньше, чем ширина автомагнитолы Sony, поэтому в процессе установки необходимо было удалить пластиковые элементы панели приборов. В случае некорректного удаления жгут проводов критически изгибался (на угол более 90°), так что касался корпуса магнитолы. При протекании тока по участку критического изгиба провода изоляция оплавлялась, но штатный предохранитель при этом не срабатывал. На рис. 5,*б* видно, что изоляция на плюсовом проводе питания повреждена на участке от соединительного разъема до корпуса адаптера. При контакте корпуса магнитолы с этим плюсовым проводом ток, минуя защитный предохранитель магнитолы (10 А), протекал через экранированную оплетку антенного кабеля на кузов автомобиля, вследствие чего антенный кабель воспламенялся по всей длине (см. рис. 5,*в*). Возможная ссылка на то обстоятельство, что провод оплавился от контакта с радиатором магнитолы, противоречит п. 1.4.16 [30], так как согласно ему кабели и изолированные провода с медными жилами могут иметь температуру нагрева не выше 120–150 °С. Согласно ГОСТ 5960–72 (Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защиты оболочек проводов и кабелей) “температура размягчения изоляции составляет 175–190 °С в зависимости от марки изоляции”. Вполне очевидно, что радиатор автомагнитолы в штатном режиме работы не нагревается до такой температуры. Как следует из этого примера, уменьшения площади сечения жилы электропроводника в данном случае также нет.

В ходе эксперимента по пропусканию тока перегрузки по изогнутому под углом 90° одножильному медному проводнику без изоляции установлено, что в области изгиба имеют место оплавления, которые визуально трудно обнаружить (рис. 6). Следует подчеркнуть, что в месте изгиба уменьшения сечения проводника визуально не наблюдается.

Таким образом, экспериментальные данные полностью соответствуют расчетным, что подтверждает адекватность выбранной математической модели реальным условиям.

Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что специалист, проводящий осмотр сгоревшего транспортного средства в целях установления причины пожара, должен обращать внимание на изгиб элементов электропроводки в очаговой зоне, даже если следы оплавления визуально не обнаруживаются, в том числе из-за применения карбонизированной изоляции и пр. В случае изъятия таких фрагментов для лабораторных исследований необходимо указывать радиус закругления, измерив его циркулем

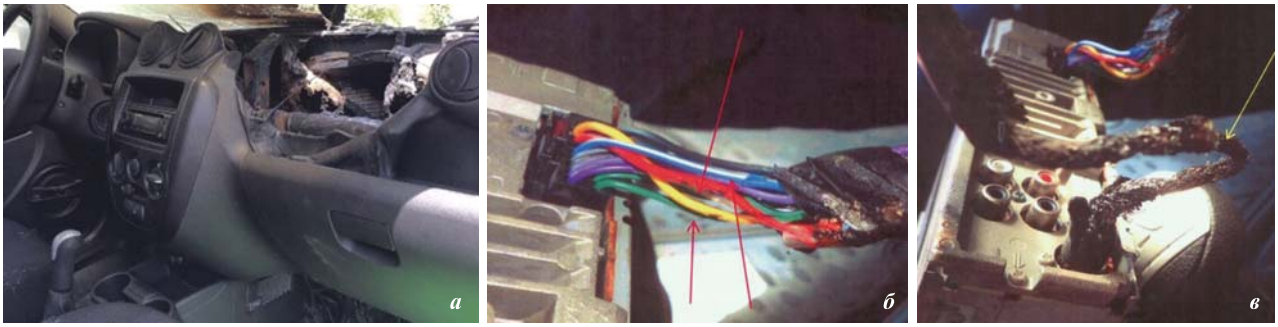

Рис. 5. Пример из практики исследования обстоятельств пожаров: *а* — очаг пожара; *б* — повреждения изоляции провода; *в* — повреждения кабеля антенны

Fig. 5. Example from practice of research of circumstances of fires: *a* — the center of the fire; *b* — damages of the wire insulation; *v* — damages of a cable of the antenna

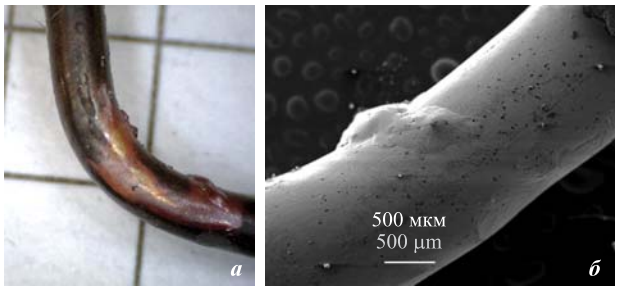

Рис. 6. Оплавление медного проводника на участке изгиба: *а* — увеличение 7×; *б* — увеличение 35×

Fig. 6. Burn-off of copper conductor on the area of bend: *a* — increase of 7×; *b* — increase of 35×

в процессе осмотра. Несомненно, измеренный таким образом радиус изгиба дает лишь общее представление, которое затем проверяется расчетным путем и лабораторными исследованиями. В случае если на изгибе имеют место микрооплавления, а расчеты показывают результат, близкий к критическому радиусу закругления, то вывод о причине пожара очевиден.

В заключение необходимо отметить, что в работе [8] было подчеркнуто, что использование результатов инструментальных исследований в судебно-экспертном исследовании причины пожара даже в качестве "промежуточного этапа" не снижает их ценности как важнейшего источника объективной информации, без которой выводы о причине пожара будут малоубедительными.

Заключение

Примерами из практики наглядно проиллюстрировано, что в местах критического изгиба медных проводников имеет место оплавление изоляции, вызванное токовой перегрузкой, которая не фиксируется приборами защиты.

Экспериментально подтверждено оплавление в области критического изгиба медного одиночного проводника при протекании через него тока перегрузки.

Разработана уточненная модель предельного напряженно-деформированного состояния неупругого чистого изгиба медного стержня с круглым поперечным сечением.

Уточненная модель доведена до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность изгибаемых одиночных медных проводников.

На конкретном примере показана применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы.

Настоящим исследованием установлена необходимость уточнения формулировки термина "локальная токовая перегрузка". В частности, термин ЛТП может быть дополнен фразой: "возникающий вследствие локального сокращения площади сечения жилы электропроводника или уменьшения его несущей способности".

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установления механизма их повреждения и в конечном счете причины пожара транспортного средства. В свою очередь, знание технической причины пожара даст возможность разработать профилактические мероприятия и технические решения, направленные на ее устранение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П.* Человечество и пожары. — М. : ООО "ИПЦ Маска", 2007. — 142 с.
2. *Quintiere J. G.* Fundamentals of fire phenomena. — England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd., 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. *Beyler C., Carpenter D., Dinenno P.* Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook. — 20th ed. — Quincy : National Fire Protection Association, 2008.
4. *Severy D., Blaisdell D., Kerkhoff J.* Automotive collision fires // SAE Technical Paper 741180, 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. *Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki.* Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. — 2009. — Vol. 44, No. 3. — P. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. *Чешко И. Д., Скодтаев С. В., Теплякова Т. Д.* Классификация аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей и схема выявления их следов после пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2019. — № 1(49). — С. 107–115.
7. *Богатищев А. И.* Комплексные исследования пожароопасных режимов в сетях электрооборудования автотранспортных средств : дис. … канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. — 269 с.
8. *Чешко И. Д.* Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). — 2-е изд., стереотип. — СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. — 562 с.

9. *Чешко И. Д., Мокряк А. Ю., Скодтаев С. В.* Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2015. — № 1. — С. 41–46.
10. *Мокряк А. Ю.* Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики : дис. … канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. — 140 с.
11. *Скодтаев С. В.* Механизм и морфологические признаки аварийных пожароопасных процессов в электросетях автомобилей : дис. … канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. — 144 с.
12. *Смелков Г. И., Чешко И. Д., Плотников В. Г.* Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2017. — № 3. — С. 121–128.
13. *Недобитков А. И.* Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 42–50. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.
14. *Смелков Г. И.* Пожарная безопасность электропроводок. — М. : ООО “Кабель”, 2009. — 328 с.
15. *Babrauskas V.* Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? // Journal of Fire Protection Engineering. — 2004. —Vol. 14, No. 2. — P. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
16. *Delplace M., Vos E.* Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. — 1983. — Vol. 19, No. 3. — P. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698.
17. *Wright S. A., Loud J. D., Blanchard R. A.* Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? // Fire Technology. — 2015. — Vol. 51, No. 5. — P. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
18. *Babrauskas V.* Arc mapping: a critical review // Fire Technology. — 2018. — Vol. 54, Issue 3. — P. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
19. *Hoffmann D. J., Swonder E. M., Burr M. T.* Arc faulting in household appliances subjected to a fire test // Fire Technology. — 2016. — Vol. 52, Issue 6. — P. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0.
20. *Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou.* Microstructural study on oxygen permeated arc beads // Journal of Nanomaterials. — 2015. — Article ID 373861. — 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
21. *Lewis K. H., Templeton B.* Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating // Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology. — Sarasota : National Association of Fire Investigators, 2008. — P. 183–195.
22. *Murray I., Ajersch F.* New metallurgical techniques applied to fire investigation // Fire & Materials '2009. — London : Interscience Communications, Ltd., 2009. — P. 857–869.
23. *Carey N. J.* Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. diss. — Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
24. *Roby R. J., McAllister J.* Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire // Final Technical Report for Award No. 239052. — Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
25. *Лукаш П. А*. Основы нелинейной строительной механики. — М. : Стройиздат, 1978. — 204 с.
26. *Тимошенко С. П., Гере Дж.* Механика материалов / Пер. с англ. — 2-е изд. — СПб. : Лань, 2002. — 672 с.
27. *Филин А. П.* Прикладная механика твердого деформируемого тела. — М. : Наука, 1975. — Т. 1. — 832 с.
28. *Смолянский М. Л.* Таблицы неопределенных интегралов. — М. : Физматгиз, 1963. — 112 с.
29. *Бронштейн И. Н.*, *Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — 13-е изд., исправл. — М. : Наука, Физматгиз, 1986. — 544 с.
30. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. — Новосибирск : Норматика, 2018. — 462 с.

REFERENCES

1. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, P. Wagner. *Chelovechestvo i pozhary* [Humaniti and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p. (in Russian).

2. J. G. Quintiere. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. C. Beyler, D. Carpenter, P. Dinenno. *Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook*. 20th ed. Quincy, National Fire Protection Association, 2008.
4. D. Severy, D. Blaisdell, J. Kerkhoff. Automotive collision fires. *SAE Technical Paper 741180*, 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, no. 3, pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. I. D. Cheshko, S. V. Skodtayev, T. D. Teplyakova. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2019, no. 1(49), pp. 107–115 (in Russian).
7. A. I. Bogatishchev. *Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2002. 269 p. (in Russian).
8. I. D. Cheshko. *Ekspertiza pozharov* (*obyekty, metody, metodiki issledovaniya*) [Examination of fire (objects, methods, methods of research)]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation Publ., 1997. 562 p. (in Russian).
9. I. D. Cheshko, A. Yu. Mokryak, S. V. Skodtaev. Formation mechanism of excess currents passage traces in copper conductors. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 1, pp. 41–46 (in Russian).
10. A. Yu. Mokryak. *Determination of the nature of melting of copper conductors and brass current-carrying products in the examination of fires at power facilities*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2018. 140 p. (in Russian).
11. S. V. Skodtaev. *Mechanism and morphological features of emergency fire-dangerous processes in electric networks of cars.* Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2019. 144 p. (in Russian).
12. G. I. Smelkov, I. D. Czeshko, V. G. Plotnikov. Experimental modeling of fire-alarm emergency modes in electrical wires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2017, no. 3, pp. 121–128 (in Russian).
13. A. I. Nedobitkov. Peculiarities of current overload in the car electric network. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety,* 2019, vol. 28, no. 4, pp. 42–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.
14. G. I. Smelkov. *Pozharnaya bezopasnost elektroprovodok* [Fire safety of wirings]. Moscow, Cable LLC. Publ., 2009. 328 p. (in Russian).
15. V. Babrauskas. Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? *Journal of Fire Protection Engineering*, 2004, vol. 14, no. 2, pp. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
16. M. Delplace, E. Vos. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. *Fire Technology*, 1983, vol. 19, no. 3, pp. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698.
17. S. A. Wright, J. D. Loud, R. A. Blanchard. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? *Fire Technology*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
18. V. Babrauskas. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*, 2018, vol. 54, issue 3, pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
19. D. J. Hoffmann, E. M. Swonder, M. T. Burr. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, issue 6, pp. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0.
20. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads. *Journal of Nanomaterials*, 2015, article ID 373861. 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
21. K. H. Lewis, B. Templeton. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. Sarasota, National Association of Fire Investigators, 2008, pp. 183–195.
22. I. Murray, F. Ajersch. New metallurgical techniques applied to fire investigation. In: *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications, Ltd., 2009, pp. 857–869.

23. N. J. Carey. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping*. Ph. D. diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
24. R. J. Roby, J. McAllister. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. In: *Final Technical Report for Award No. 239052*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
25. P. A. Lukash. *Osnovy nelineynoy stroitelnoy mekhaniki* [Fundamentals of nonlinear structural mechanics]. Moscow, Stroyizdat, 1978. 204 p. (in Russian).
26. J. V. Gere, S. P. Timoshenko. *Mechanics of materials.* 3rd ed. London, Chapman & Hall, 1991. 807 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-3124-5 (Russ. ed.: S. P. Timoshenko, J. V. Gere. Mekhanika materialov. 2nd ed. Saint Petersburg, Lan Publ., 2002. 672 p.).
27. A. P. Filin. *Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruyemogo tela* [Applied mechanics of a solid deformable body]. Moscow, Nauka Publ., 1975. Vol. 1, 832 p. (in Russian).
28. M. L. Smolyanskiy. *Tablitsy neopredelennykh integralov* [Tables of indefinite integrals]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 112 p. (in Russian).
29. I. N. Bronshteyn, K. A. Semendyaev. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Mathematics handbook for engineers and students in higher technical education]. 13th ed. Moscow, Nauka Publ., Fizmatgiz Publ., 1986. 544 p. (in Russian).
30. *Pravila ustroystva elektroustanovok. Vse deystvuyushchiye razdely shestogo i sedmogo izdaniy s izmeneniyami i dopolneniyami* [Rules of arrangement of electrical installations]. Novosibirsk, Normatika Publ., 2018. 462 p. (in Russian).

Поступила 06.10.2019, после доработки 18.11.2019;
принята к публикации 25.11.2019

Received 6 October 2019; Received in revised form 18 November 2019;
Accepted 25 November 2019

Информация об авторах

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский государственный технический университет, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

АБДЕЕВ Борис Масгутович, канд. техн. наук, профессор кафедры “Профессиональное обучение”, Восточно-Казахстанский государственный технический университет, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

Information about the authors

Alexandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Boris M. ABDEEV, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department Vocational training, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru