

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 65–76
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):65-76

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК: 656.13;614.84;517.958:539:3(6)

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76>

Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров

Александр Игнатьевич Недобитков✉, Борис Масгутович Абдеев

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют, что проблема повышения пожарной безопасности при эксплуатации розеток очень актуальна. Целью статьи является разработка научно-обоснованного метода исследования гнездовых контактов розетки, имеющих признаки большого переходного сопротивления или изменение геометрической формы, для установления причины повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Объектами исследования являлись розетки типа С (EU Type C) и типа F (EU Type F). Поверхности разрушения контактов розетки подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Теоретические основы (теория и расчеты). Разработана физико-математическая модель предельной несущей способности гнездового контакта розетки, соответствующая реальной конструкции, и на этой основе сформулирован расчетно-практический алгоритм экспертного анализа ее механико-геометрических характеристик. Решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контактов розетки. На конкретном примере показана применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы.

Результаты и обсуждение. Приведены примеры возгораний розеток, возникновение которых обусловлено утратой несущей способности гнездового контакта в процессе эксплуатации. Приведены снимки оксидной пленки на поверхности контакта и ее элементный состав. Экспериментальными данными подтверждено, что оплавление контактов и наличие оксидной пленки, обладающей высоким удельным сопротивлением, являются значимыми криминалистическими признаками при установлении причины пожара.

Выводы. Предложен метод определения несущей способности контактов розетки, на основании которого можно сделать вывод о причастности возгорания розетки к последующему пожару. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании контактов розеток, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия; напряженно-деформированное состояние; пожарно-техническая экспертиза; розетка; контактное давление; механическое напряжение

Для цитирования: Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности гнездовых контактов розетки при экспертизе пожаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 65–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76

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

Evaluation of the bearing capacity of socket contacts within the framework of a fire investigation

Alexandr I. Nedobitkov✉, Boris M. Abddeyev

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction. The data, provided in the article, demonstrate the relevance of the socket fire safety improvement in the course of operation. The purpose of the article is to develop a research-backed method of examining the socket contacts that feature high transient resistance or change in shape. The method can be subsequently used to identify causes of damages in a fire investigation.

Materials and methods. A JSM-6390LV scanning electron microscope with a module designated for the energy dispersive microanalysis is used in the research. The subjects of research are type C (EU Type C) and type F (EU Type F) sockets. The failure surfaces of socket contacts were analyzed without preliminary sample preparation.

Theoretical fundamentals (theory and calculations). A physical and mathematical model of the limit bearing capacity of socket contacts, similar to the real construction, has been developed. The model serves as the framework for a practical computational algorithm of the expert analysis of mechanical and geometrical characteristics. The solution is reduced to short calculation formulas, that can be used to evaluate the bearing capacity of socket contacts. The applicability of the developed mathematical model to fire investigations is proven in a specific example.

Results and discussion. The authors analyze cases of socket fires, caused by the loss of the bearing capacity of socket contacts in the process of operation. Photos of the oxide film on the contact surface and its elemental composition are provided in the article. The experimental data have proven that the fusion of contacts and the presence of an oxide film, featuring high specific resistivity, are a significant criminalistic evidence that helps to identify causes of fire.

Conclusions. The authors propose a method for the identification of the bearing capacity of socket contacts. The method can be used to determine if a subsequent fire is related to the socket ignition. The information, provided in the article, can be used by specialists in the course of an expert examination of socket contacts withdrawn from the site of the fire to identify the failure mechanisms and, ultimately, causes of fire.

Keywords: scanning electron microscopy; stress-strain state; fire investigation; contact stress; mechanical stress

For citation: Nedobitkov A.I., Abdeyev B.M. Evaluation of the bearing capacity of socket contacts within the framework of a fire investigation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):65-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.65-76 (rus).

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

Введение

Авторами работ [1–3] наглядно показано, что пожары наносят значительный ущерб экономике государства. В своих работах V. Vabruskas акцентирует внимание на том, что значительная часть возгораний происходит из-за электрических неисправностей, связанных с проводкой или контактными устройствами, при этом доля розеток в общей статистике причин пожаров в США составляет около 11 % [3–5].

Автор [3–5] отмечает, что проблема заключается не в низкой надежности розеток и высокой вероятности их отказов, а в том, что в застроенной среде их очень много, и каждая под воздействием эксплуатационных факторов может выйти из строя и вызвать пожар.

В работе [6] приведены результаты исследований зависимости таких параметров электрических контактов розетки, как площадь и температура контакта от степени затяжки винтов на клеммах.

Авторами [7, 8] продемонстрированы экспериментальные результаты исследования розеток с целью установления криминалистически значимых признаков их отказов в процессе эксплуатации. В работах [7, 8] наглядно проиллюстрировано влияние широкого диапазона факторов на перегрев контактов розеток, включая момент затяжки винтовых клемм, способ подключения (с обратной или боковой проводкой) и материал корпуса розеток. Необходимо дополнить, что в работе [7] приведены данные по микроструктуре отгоревших медных проводников. Поскольку работа выполнялась в Соединенных Штатах Америки, то исследовались розетки типа А, ко-

торые имеют два плоских, параллельных между собой контакта. Указанный тип используется в большинстве стран Северной и Центральной Америки, а также в Японии.

Розетки типа F (EU Type F), применяемые в Европе и странах Евразийского экономического союза, исследовались в работе [9]. Авторы [9], изменяя крутящий момент винта, моделировали режимы большого переходного сопротивления, вызванные вибрацией окружающей среды или небрежностью установщика. Были испытаны различные типы и сечения медных проводов, а также нагрузки и их продолжительность. Подробно проанализировано влияние этих параметров на температуру контакта и электрическое сопротивление, возникновение искрения и последовательной электрической дуги. Исследователями показано, что деградация контактов вызвана ростом контактного сопротивления, обусловленного образованием оксидов на поверхности контакта. В статье [9] наглядно проиллюстрировано, что значительное снижение температуры контакта мало влияет на сопротивление контакта. Однако каждое повторение процесса нагрева вызывает повышение как контактного сопротивления, так и температуры контакта, обусловленных увеличением толщины оксидной пленки.

В работе [10] рассмотрены эксплуатационные случаи локального электродугового разрушения контактов розетки. Выявлены специфические признаки неаварийного электродугового разрушения штырей электрических вилок шнуров оборудования с импульсным блоком питания. Показаны различия в следовых картинах между аварийным большим переходным

сопротивлением и неаварийным эксплуатационным разрушением контактов розетки. Таким образом, показано, что далеко не каждое повреждение контактов розетки, фиксируемое на месте пожара, фактически приводит к пожару. На важность исследования электрических контактов, в том числе и при исследовании причин пожаров, указывается в работах [11–15]. Необходимо напомнить, что в 1913 г. Гаррис вывел четыре закона, которым подчиняются электрические контакты. Один из них сформулирован следующим образом: «Сопротивление контактов не зависит от величины их площади, а зависит только от полного давления в контакте». Следует указать, что в работе [16] приведены данные, что с уменьшением усилия сжатия в 2 раза переходное сопротивление контакт-деталей в зависимости от их размеров может увеличиться в 4 и более раз.

Таким образом, основополагающим фактором надежности, и соответственно, пожарной безопасности розетки в процессе эксплуатации является обеспечение нормативного контактного давления по ГОСТ Р 51322.1-2011 (МЭК 60884-1:2006) «Соединители электрические штепсельные бытового и аналогичного назначения» и ГОСТ 30988.2.6-2012 «Соединители электрические штепсельные бытового и аналогичного назначения».

В настоящей работе на основе исследований [5–10, 16] предпринята попытка обосновать математическую модель, применение которой позволит облегчить установление причинной связи между повреждением контактов розетки и пожаром.

Целью работы является теоретическое обоснование универсальной с принципиально-технологической точки зрения физико-математической модели оценки предельной несущей способности контактов розетки.

В статье поставлены следующие задачи:

- проанализировать силовое взаимодействие между штырем вилки и гнездовым контактом розетки по всей рабочей криволинейной поверхности в связи со специфическими особенностями конструкции;
- оценить повышенную упругость и малую деформируемость пружинной системы «розетка – вилка», как следствие ее статической неопределимости;
- довести решение до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контактов розетки;
- экспериментально подтвердить изменение геометрической формы контактов розетки и, соответственно, усилия контактного давления в процессе эксплуатации;
- наглядно показать наличие криминалистически значимого признака в виде оксидной пленки на поверхности контакта;

- проиллюстрировать применимость разработанной математической модели для проведения исследования гнездового контакта в рамках пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения контактов розетки подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Объектами исследования являлись розетки типа С (EU Type C) и типа F (EU Type F), согласно стандарту¹ используемые в Европе и странах Евразийского экономического союза.

Теоретические основы

Следует напомнить, что под типом С понимается несколько разновидностей двухконтактных вилок и розеток. Все вилки типа С имеют два круглых штыря диаметром 4 или 4,8 мм и длиной 19 мм, расположенных на расстоянии 19 мм¹. Розетки, соответственно, имеют 2 круглых гнезда. Такие разъемы рассчитаны в основном на 220–250 В. Согласно ГОСТ 30851.2.2-2002 (МЭК 60320-2-2-98), а также Europlug (CEE 7/16) штыри вилок имеют диаметр 4 мм, а согласно CEE 7/4 (Schuko) — 4,8 мм. Но расстояние между штырями вилок одинаковое у вилок обоих стандартов. В итоге при эксплуатации электроприборов возможна комбинация вилок и розеток разных стандартов. Вполне очевидно, что вилка с тонкими штырями (4 мм) не может быть надежно установлена в розетке Schuko, что вызовет искрение или даже оплавление. Также необходимо отметить, что контакты розетки могут быть бронзовыми, лужеными латунными и латунными.

Рассмотрим теорию и методику расчета оптимальных размеров изгибаемой части контактного упругого элемента электрической розетки в виде плоской пружины [17, 18] с целью определения реактивного давления P между взаимодействующими цилиндрическими поверхностями и соответствующего ему минимально допустимого нормируемого усилия $[P_n]$ по ГОСТ Р 51322.1-2011 при номинальном токе до 10 А

$$[P_n] = 40 - 50H, \quad (1)$$

необходимого для размыкания соединения. Как отмечается в [13, 16], силовые характеристики P , $[P_n]$ являются важнейшими физико-механическими па-

¹ IEC TR 60083. Plugs and socket-outlets for domestic and similar general use standardized in member countries of IEC. 2015. 13 p.

раметрами, определяющими стабильность и надежность электрического контакта.

На рис. 1 изображен в упрощенной схематической интерпретации пример конструкции розетки типа С (EU Type C) и типа F (EU Type F), представляющей собой осесимметричную статически неопределимую систему, обладающую повышенной жесткостью и прочностью [19–21].

Следует указать, что конструктивно разъемы F (EU Type F) и C (EU Type C) отличаются только наличием заземления, поэтому с точки зрения математического моделирования контакта «штырь-гнездовой разъем» далее в тексте статьи эти два типа разъемов не разделяются.

Кроме того, представленная расчетная модель (см. рис. 1) применима к любому электрическому разъёмному контактному соединению, то есть является универсальной. На схемах рис. 1 используются следующие буквенные обозначения:

$h_k, b_k, L - l_x$ — размеры деформируемых (изгибаемых) участков розетки;

l_x — длина полухорды окружности радиуса $R_b = 2$ мм штыря вилки диаметром $d_b = 2R_b = 4$ мм и длиной 18 мм;

b_k — линейные размеры поверхности контакта;

f — максимальное перемещение граничных точек А, расположенных на вертикальной оси симметрии, при введении штыря в гнездо розетки, которое тождественно смещению центров С (см. рис. 1, а) двух окружностей, имеющих радиусы R_b ;

P — равнодействующая контактного давления;

$M_o, P/2$ — соответственно, изгибающий момент и опорная реакция в жестко защемленном сечении;

P_ξ — сила трения при скольжении штыря вилки по соприкасающейся контактной части розетки, для определения которой используем формулу [22, 23], широко применяемую в инженерных расчетах:

$$P_\xi = \xi P = 0,1P, \quad (2)$$

где $\xi = 0,1$ — коэффициент трения стали по бронзе [22, 24] при качественно обработанных и гладких поверхностях контакта.

Учитывая, что стандартная вилка имеет два штыря и четыре цилиндрических поверхности силового соприкосновения (см. рис. 1), то следует очевидное соотношение

$$4P_\xi = 4\xi P = [P_H] \Rightarrow P = P_H/4\xi, \quad (3)$$

имеющее определенное численное значение

$$P = 100 - 125 \text{ Н} \quad (4)$$

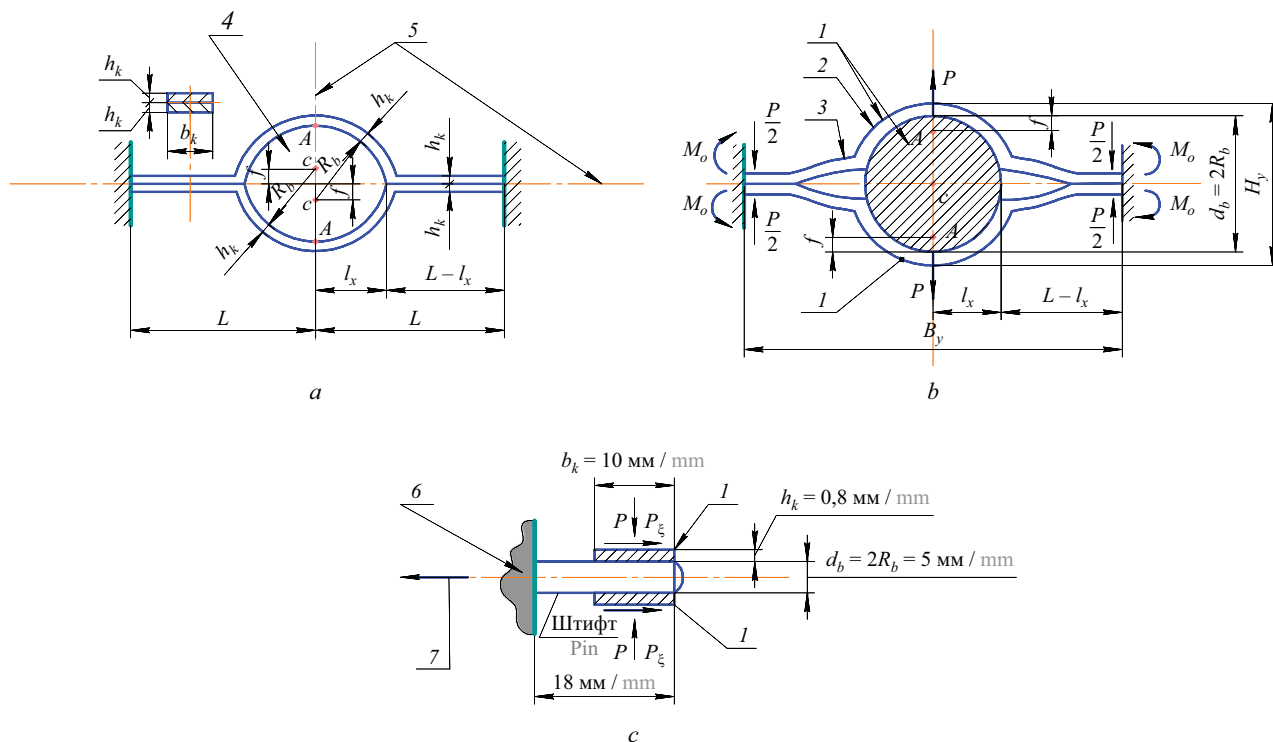


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема гнездового контакта розетки: а — до нагружения силовой равнодействующей P ; б — после включения вилки, когда $P > 0$; в — взаимное расположение штыря и гнездового контакта; 1 — недеформируемые части; 2 — стальной штырь вилки; 3 — изгибаемые прямолинейные участки, включающие четыре плоских пружины; 4 — отверстие для штыря вилки; 5 — оси симметрии; 6 — корпус вилки; 7 — направление извлечения вилки

Fig. 1. Principal design diagram of the socket contact: а — before applying the force equal to P ; б — after inserting the plug, when $P > 0$; в — mutual arrangement of the pin and the socket contact; 1 — non-deformable parts; 2 — the steel plug pin; 3 — bending straight sections, including four flat springs; 4 — the hole for the plug pin; 5 — the axis of symmetry; 6 — the plug case; 7 — direction of the plug extraction

для контактирующей пары «сталь-бронза» согласно (1) и (2).

В основу математической аппроксимации напряженно-деформированного состояния контактирующих деталей гнездового контакта 3 розетки (см. рис. 1) принимаем расчетную статически неопределимую модель с абсолютно жесткой цилиндрической центральной частью 1 (см. рис. 2) и классические предпосылки линейной технической теории малого поперечного изгиба [18, 19, 21, 24, 26, 27].

Принятые допущения:

- 1) деформируемый материал конструкции — однородный, сплошной, изотропный и подчиняется закону Гука, а ее собственный вес пренебрежимо мал;
- 2) геометрические характеристики h_k, b_k, L, l_x, R_b не изменяются при нагружении механической системы (см. рис. 1, 2) реактивной силой P ;
- 3) наибольший прогиб f в сечении $x = L - l_x$ и угол поворота $\theta_{\max}^{\circ}$ при $x = 0,5(L - l_x)$ участков длиной $L - l_x$ находятся в пределах [20, 21, 25]

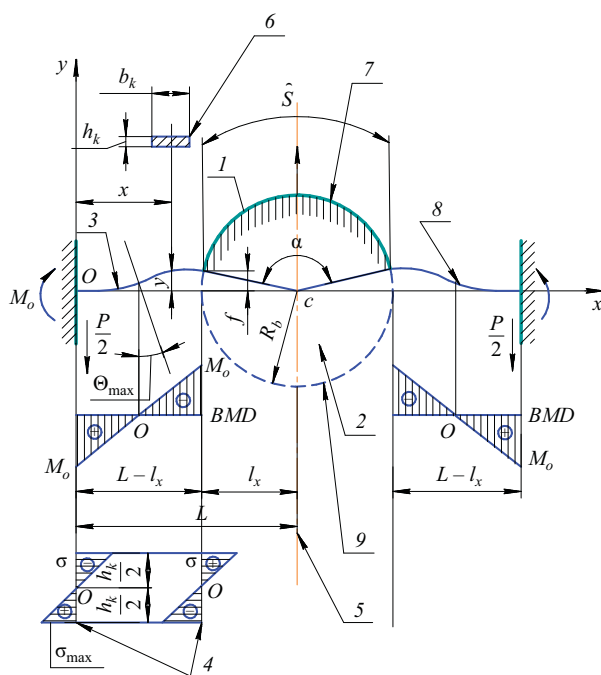


Рис. 2. Расчетная схема оценки несущей способности контактного пружинного элемента 3 розетки: 1 — абсолютно жесткая часть; 2 — недеформируемая область круглого поперечного сечения штыря розетки; 3 — изгибаемые участки; 4 — равноопасные сечения $x = 0$ и $x = L - l_x$; 5 — ось симметрии; 6 — сечение плоской пружины; 7 — недеформируемая дуга длиной S ; 8 — точка перегиба; 9 — абсолютно жесткий периметр штыря вилки

Fig. 2. Design diagram for assessing the bearing capacity of contact spring element 3 of the socket: 1 — the absolutely rigid part; 2 — the non-deformable area of the circular cross-section of the socket pin; 3 — bending sections; 4 — equally dangerous sections $x = 0$ and $x = L - l_x$; 5 — the axis of symmetry; 6 — the section of a flat spring; 7 — the non-deformable arc, having length S ; 8 — the inflection point; 9 — the absolutely rigid perimeter of the plug pin

$$f \leq 0,2(L - l_x), \quad (5)$$

$$\theta_{\max}^{\circ} \leq 20-30^{\circ}, \quad (6)$$

и в результате можно не учитывать горизонтальные перемещения, по сравнению с f . При этом становится очевидным, что для выполнения допущения 2 при соблюдении (5), (6), необходимо ввести дополнительное ограничение

$$f \ll R_b, \quad (7)$$

вытекающее из конструктивных особенностей недеформированной схемы рис. 1, а, соответствующей давлению $P = 0$.

4) соблюдаются два соотношения между линейными размерами h_k, b_k, L, l_x :

$$\frac{h_k}{b_k} \leq \frac{1}{4}, \quad \frac{h_k}{L - l_x} \leq \frac{1}{4}; \quad (8)$$

5) выполняются три балочные гипотезы Кирхгофа — Лява:

- о плоском поперечном сечении до и после деформации;
- о нерастяжимости нейтральной оси, где нормальные напряжения $\sigma = 0$;
- об отсутствии давления между продольными слоями балки-пластинки, параллельными ее срединной плоскости.

Для расчета на жесткость и прочность плоских пружинных пластинок 3 (см. рис. 1, 2) при малых перемещениях (5), (6) и нормальной температуре используем известное в сопротивлении материалов [17, 18, 20] соотношение:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{12(1 - \mu^2) M}{Eb_k h_k^3}; \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{b_k h_k^2} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (10)$$

где $y = y(x)$ — функция вертикальных перемещений; $M = M(x)$ — изгибающий момент в зависимости от x ;

$$M = M(x) = M_o - \frac{P}{2}x, \quad 0 \leq x \leq L - l_x; \quad (11)$$

$M_{\max}, \sigma_{\max}$ — наибольшие абсолютные значения переменных $M(x)$ и нормального напряжения $\sigma = \sigma(x, y)$ в наиболее удаленных от нейтрального

слоя точках $y = \pm \frac{h_k}{2}$ равноопасных сечений $x = 0$,

$x = L - l_x$ (см. рис. 2);

$E, \mu, \sigma_T, n_T = 2$; $[\sigma]$ — соответственно, модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести материала, нормативный минимально до-

пустимый коэффициент запаса прочности, допускаемое напряжение, в пределах которого пружинные элементы 3 розетки (см. рис. 1) будут испытывать только упругие деформации.

Например, для изгибаемых участков 3 (см. рис. 2) из бериллиевой бронзы

$$E = 135\,000 \text{ МПа}, \sigma_T = 1280 \text{ МПа}, \mu = 0,32, \quad (12)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T} = \frac{1280}{2} = 640 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Продолжая решение, интегрируем дважды [27] линейное неоднородное дифференциальное уравнение (9) после подстановки функционального соотношения (11):

$$\frac{d_y}{d_x} = \theta = \frac{12(1-\mu^2)}{Eb_k h_k^3} \left(M_o x - \frac{Px^2}{4} \right) + C_1, \quad (14)$$

$$y = \int \theta dx = \frac{12(1-\mu^2)}{Eb_k h_k^3} \left(M_o \frac{x^2}{2} - P \frac{x^3}{12} \right) + C_1 x + C_2, \quad (15)$$

где $\theta = \theta(x)$ — угол поворота произвольного поперечного сечения x (в радианах);

C_1, C_2, M_o — постоянные, которые вычисляем из кинематических граничных условий (см. рис. 2).

$$\left. \begin{aligned} \theta(0) = 0, &\Rightarrow C_1 = 0, \\ y(0) = 0, &\Rightarrow C_2 = 0, \\ \theta(x)|_{x=L-l_x} = 0, &\Rightarrow M_o = P(L-l_x)/4 = M_{\max}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При $x = 0$ и $x = L - l_x$.

Учитывая результаты (16), представляем в окончательном виде функции $\theta(x), y(x)$ (15), (16) и их экстремумы $\theta_{\max}$ — в радианах, $\theta_{\max}^\circ$ — в градусах для точки $x = 0,5 (L - l_x)$ перегиба кривой $y(x)$ и $f = \max$, когда $x = L - l_x$ (см. рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \theta = \theta(x) &= \frac{3(1-\mu^2)P}{Eb_k h_k^3} (L - l_x - x)x, \\ y = y(x) &= \frac{(1-\mu^2)P}{2Eb_k h_k^3} [3(L - l_x) - 2x]x^2, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\theta_{\max} = \frac{3(1-\mu^2)P}{4Eb_k h_k^3} (L - l_x)^2, \Rightarrow \theta_{\max}^\circ = \theta_{\max} \frac{180}{\pi}. \quad (18)$$

$$f = \frac{(1-\mu^2)P}{2Eb_k h_k^3} (L - l_x)^3. \quad (19)$$

Заменяя $M_{\max}$, согласно (16), в условии прочности (10), записываем его в виде предельного равенства

$$\frac{3P(L-l_x)}{2b_k h_k^2} = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (20)$$

которое позволяет оценивать конструктивные параметры розетки с учетом требований ГОСТ Р 51322.1-2011 и ГОСТ 30988.2.6-2012.

После определения конструктивных характеристик розетки из равенства (20) появляется возможность найти численную величину длины дуги S половины поверхности взаимодействия одного штыря вилки с недеформируемой контактной частью l розетки (см. рис. 1)

$$S = \frac{\pi R_b \alpha}{180} = \frac{\pi R_b}{90} \arccos \frac{f}{R_b}, \quad (21)$$

где α — центральный угол в градусах

$$\alpha = 2 \arccos \frac{f}{R_b}, \quad (22)$$

Также на основании (20) возможно определить общую площадь контакта

$$F_k = 2Sb_k, \quad (23)$$

что представляется важнейшим фактором оценки надежности и безопасности работы розетки в процессе эксплуатации. Вполне очевидно, что из сравнения фактической площади контакта с нормируемой будет получен вывод о безопасности контактного соединения.

Кроме того, можно выразить через угол α длину полухорды l_x (см. рис. 1, 2)

$$l_x = R_b \sin \frac{\alpha}{2} = R_b \sin \left(\arccos \frac{f}{R_b} \right), \quad (24)$$

в зависимости от R_b, f , и в этом случае становится возможным установить ориентировочную величину габаритных размеров (см. рис. 1)

$$B_y = 2L, H_y = 2(R_b + h_k) \quad (25)$$

контактного устройства розетки при подобранных значениях геометрических параметров $L - l_x, h_k$, известном радиусе R_b и заданном экстремальном прогибе f .

Результаты и их обсуждение

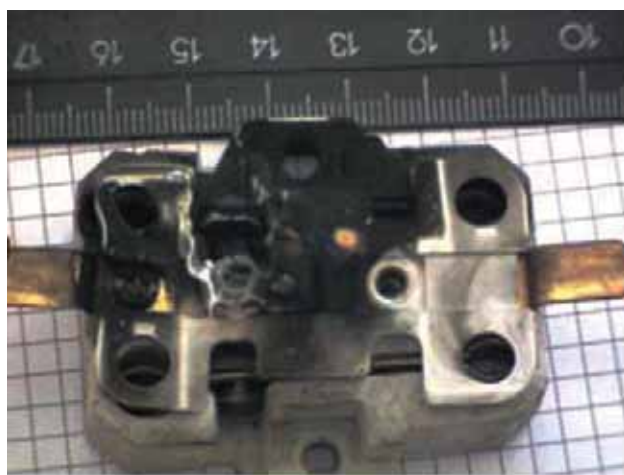
Согласно ГОСТ 25866-83 «Эксплуатация техники. Термины и определения» условия эксплуатации — это совокупность факторов, действующих на изделие при его эксплуатации. К внешним факторам, действующим на изделие в процессе эксплуатации, относятся природные условия, тепловые, химические и ме-

ханические воздействия, запыленность, влажность и т.д. В работе [10] приведены различные примеры повреждений гнездовых контактов розеток. Но далеко не всегда воспламенение розетки сопровождается яркими и очевидными примерами автора [10]. Например, в результате многократного извлечения и вставления вилки в розетку или использования ненадлежащей вилки происходит ослабление контакта или утрата его несущей способности, сопровождающиеся увеличением радиуса гнездового контакта R_b (см. рис. 1, 3, 4, с). Следствием становится нагрев и воспламенение корпуса розетки, вилки, изоляции кабеля (см. рис. 3, а).

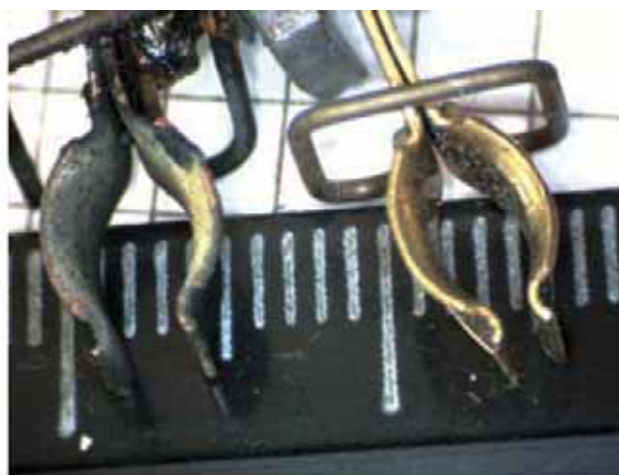
Выше показано, что формула (20) позволяет оценивать конструктивные параметры розетки (см. рис. 1, 2, 4). Например, конструктивно параметр $L - l_x = 3$ мм (см. рис. 4, а), а фактически он больше (см. рис. 4, б). Тогда по формуле (20) получаем, что нормативный минимально допустимый коэффициент запаса прочности не обеспечивается, что свидетель-

ствует об утрате несущей способности гнездового контакта и наличии пожароопасного режима.

Необходимо отметить, что в работах [6, 8, 9] помимо экспериментальных данных о температуре в розетках, достигающей 650–900 °С, указывается на такой фактор, как окисление контактов. На рис. 3, б и 4, с показано наличие на поверхности гнездовых контактов оксидных пленок. Приведем сравнительные данные по поверхности гнездовых контактов розетки, бывшей в эксплуатации и оплавившейся в результате утраты несущей способности одного из контактов (см. рис. 4, с, табл. 1, 2). Следует подчеркнуть, что один из контактов имеет оксидную пленку (см. табл. 2), а второй — нет (см. табл. 1). Необходимо отметить, что на контакте с оксидной пленкой визуально обнаруживаемых повреждений поверхности в виде сквозных проплавлений, капель металла и т.п. нет. Из табл. 1 следует, что контакт выполнен из латуни, при этом содержание меди составляет 57–59 %, а цинка — 35–37 %. Из табл. 2



а



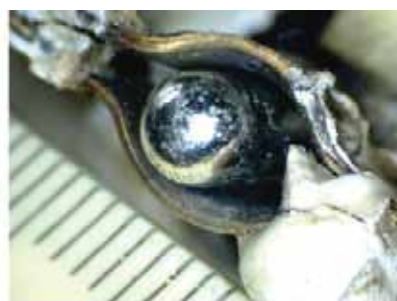
б

Рис. 3. Эксплуатационные повреждения розетки: а — термические повреждения корпуса розетки; б — увеличение радиуса R_b , что обуславливает утрату несущей способности гнездового контакта

Fig. 3. The socket damaged in the course of operation: а — a thermally damaged socket case; б — an increase in radius R_b , which causes the loss of the bearing capacity of the socket contact



а



б



с

Рис. 4. Варианты несущей способности гнездового контакта розетки: а — обеспеченная несущая способность; б — необеспеченная несущая способность; с — сравнительный пример увеличения радиуса R_b

Fig. 4. Options of the bearing capacity of the socket contact: а — available bearing capacity; б — unavailable bearing capacity; с — a comparative example of growing radius R_b

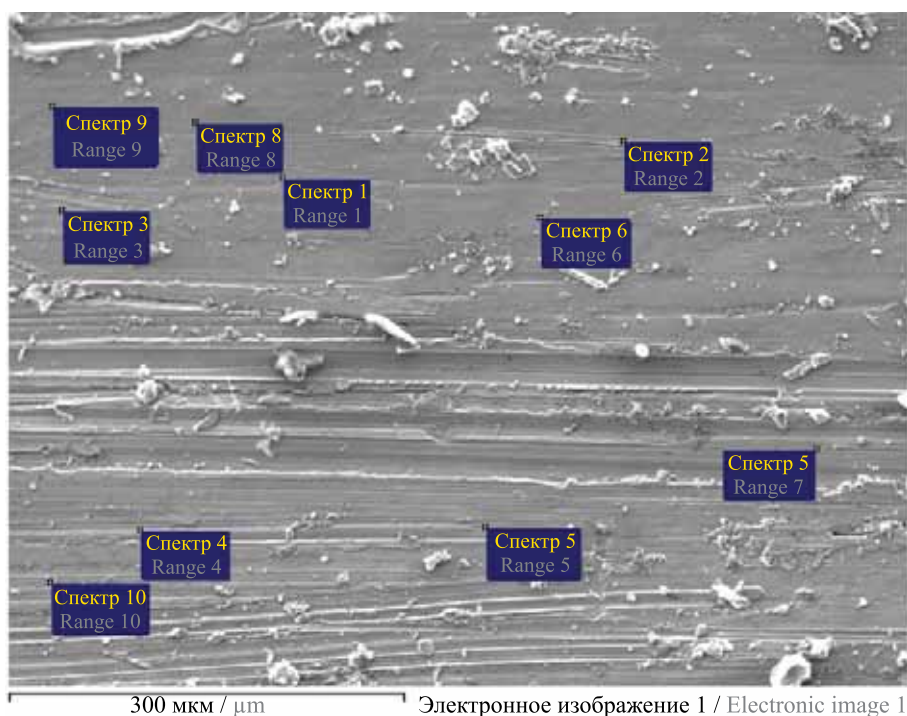


Рис. 5. Точки микроанализа на поверхности контакта без ярко выраженной оксидной пленки
Fig. 5. Points of the microanalysis on the contact surface that has no clearly identified oxide film

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 5
Table 1. Results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, % by mas.			
	O	Cl	Cu	Zn
Спектр 1 / Range 1	3,87	0,83	58,68	36,62
Спектр 2 / Range 2	4,80	1,36	58,13	35,71
Спектр 3 / Range 3	2,62	0,45	59,93	37,00
Спектр 4 / Range 4	7,35	1,53	56,46	34,66
Спектр 5 / Range 5	3,70	1,19	58,57	36,54
Спектр 6 / Range 6	4,78	2,44	57,05	35,73
Спектр 7 / Range 7	3,61	1,08	58,12	37,19
Спектр 8 / Range 8	3,32	0,99	57,77	37,92
Спектр 9 / Range 9	2,55	0,51	58,51	38,42
Спектр 10 / Range 10	3,74	1,65	57,44	37,17

следует, что на поверхности контакта содержание меди падает до 16–21 % при возрастании доли цинка до 40–51 %. Поскольку температуры плавления и кипения цинка составляют, соответственно, 419,5 и 907 °С, то это свидетельствует о выделении металла на поверхность при температуре, близкой к его температуре кипения. Наличие на поверхности контакта железа и марганца свидетельствует о переносе материала со штыря вилки при электродуговом процессе.

В работе [9] приведены данные, что поливинилхлоридная (ПВХ) изоляция начинает терять

изоляционные свойства при 70 °С, пластически деформируется при 92 °С, разлагается при 140 °С и плавится при 160 °С.

Полученные результаты хорошо объясняют статистические данные [4, 5], свидетельствующие, что возгорания шнуров и вилок в США составляют 17,2 % от общего числа пожаров. Но это вполне очевидно, что нагретый до 420–900 °С гнездовой контакт вызовет деградацию изоляции шнура и ее воспламенение.

Необходимо напомнить, что поверхность электрического контакта, покрытая оксидными пленками, обладает большим электрическим сопротивлением,

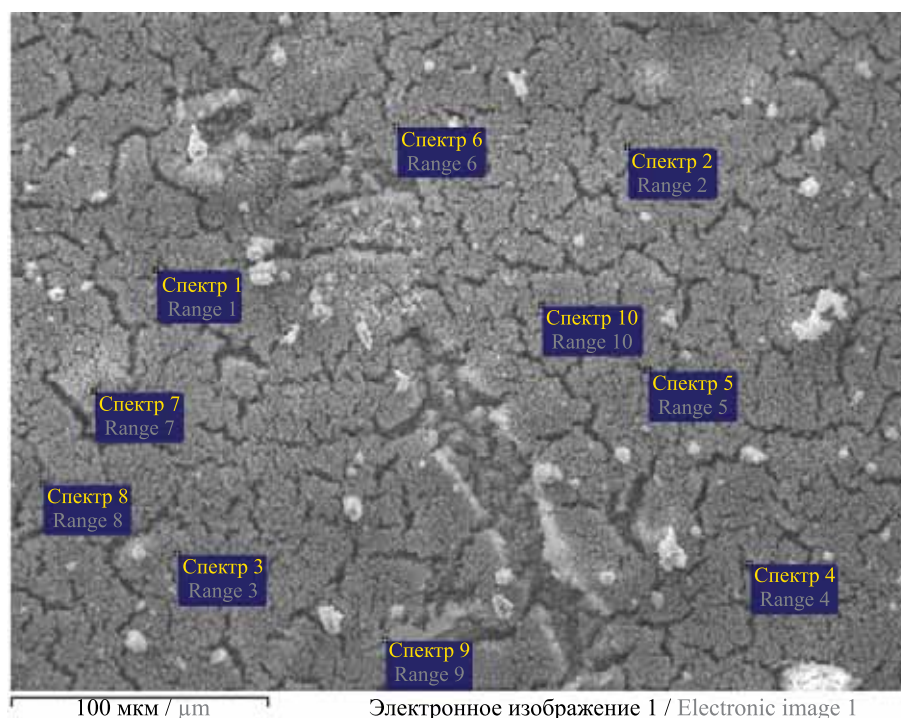


Рис. 6. Точки микроанализа на поверхности контакта с ярко выраженной оксидной пленкой

Fig. 6. Points of the microanalysis on the contact surface that has a clearly identified oxide film

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 6

Table 2. Results of the microanalysis of the section shown in Fig. 6

Точки измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, % by mas.							
	O	Mn	Cl	Si	Fe	Cu	Ca	Zn
Спектр 1 / Range 1	27,97	1,98	2,70	1,53	2,49	16,72	1,53	43,74
Спектр 2 / Range 2	27,44	1,78	1,88	1,05	2,18	22,31	1,56	41,81
Спектр 3 / Range 3	21,38	2,12	1,63	1,06	3,23	16,97	1,27	52,34
Спектр 4 / Range 4	27,31	1,84	2,28	1,32	2,48	16,47	1,73	46,56
Спектр 5 / Range 5	12,66	2,18	2,65	0,81	3,00	24,41	1,88	52,41
Спектр 6 / Range 6	27,16	1,67	2,13	0,96	2,16	23,25	1,30	40,92
Спектр 7 / Range 7	30,94	1,88	2,43	1,17	2,55	16,42	3,29	41,32
Спектр 8 / Range 8	16,86	2,03	2,02	1,27	3,16	16,12	2,10	56,45
Спектр 9 / Range 9	20,23	2,02	1,86	1,45	3,19	19,42	1,69	50,14
Спектр 10 / Range 10	17,25	1,73	2,06	0,76	3,11	21,70	1,83	51,55

поскольку удельное сопротивление оксидов на несколько порядков выше удельного сопротивления чистых металлов [28, 29]. В частности, если для меди удельное электрическое сопротивление при 0 °C составляет $1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, то для оксида меди (CuO) — от 1 до 10 Ом·м, а для закиси меди (Cu₂O) от 10^6 до 10^7 Ом·м. В работе [9] экспериментально доказано, что каждое повторение процесса нагрева контакта вызывает увеличение как контактного сопротивления, так и температуры, что обусловлено ростом толщины оксидной пленки.

Предлагается следующий алгоритм использования предлагаемой математической модели. Получив объект исследования, специалист измеряет параметры ($L - l_x$), b_k , h_k (см. рис. 1), а затем, используя формулы (20), (23), оценивает несущую способность гнездового контакта и потенциальное наличие пожароопасного режима. В случае неудовлетворительной несущей способности следует провести микроанализ на контактных поверхностях с целью фиксации криминалистически значимых признаков пожароопасного режима.

Таким образом, в результате применения расчетного метода и растровой микроскопии при исследо-

вании гнездового контакта розетки можно установить криминалистически значимые признаки, позволяющие установить причинную связь между утратой контактом несущей способности и пожаром.

В заключение необходимо отметить, что, по мнению И.Д. Чешко [14], использование результатов инструментальных исследований в качестве «промежуточного продукта» в экспертном исследовании по пожару не снижает их ценности как важнейшего источника объективной информации, без которой выводы о причине пожара будут малоубедительными.

Выводы

Примерами из практики наглядно проиллюстрировано, что в гнездовых контактах розеток в процессе длительной эксплуатации имеет место утрата несущей способности контакта, что ведет к его нагреву, росту толщины оксидной пленки, и, в конечном счете, к возгоранию вилки, шнура, корпуса розетки.

Проанализировано силовое взаимодействие между штырем вилки и гнездовым контактом розетки

по всей рабочей криволинейной поверхности в связи со специфическими особенностями конструкции.

Дана оценка повышенной упругости и малой деформируемости пружинной системы «розетка – вилка», при этом решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контактов розетки.

Методом растровой микроскопии доказано наличие криминалистически значимого признака в виде оксидной пленки на поверхности контакта.

Проиллюстрирована возможность применения разработанной математической модели для проведения исследования гнездового контакта в рамках пожарно-технической экспертизы.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI:10.18322/PVB.2020.29.01.79-88
2. Quintiere J.G. Front Matter. Fundamentals of fire phenomena. England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd., 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // Fire Technology. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
4. Babrauskas V. Fires originating in branch-circuit NM cables due to installation damage // Journal of Fire Sciences. 2018. Vol. 36. Issue 5. Pp. 438–450. DOI: 10.1177/0734904118785920
5. Babrauskas V. Electrical Fires // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed. New York : Springer, 2016. Pp. 662–704.
6. Ferrino-McAllister J.L., Roby R.J., Milke J.A. Heating at electrical contacts: characterizing the effects of torque, contact area, and movement on the temperature of residential receptacles // Fire Technology. 2006. Vol. 42. Issue 1. Pp. 49–74. DOI: 10.1007/s10694-005-3734-7
7. Korinek C.W., Korinek T.C., Lopez H.F. Pre and post-flashover characteristics of an electrically overheated poor connection between copper and steel // Fire and Materials, San Francisco, CA, 2013.
8. Benfer M., Gottuk D. Electrical receptacles — Overheating, arcing, and melting // Fire Safety Science. 2014. Vol. 11. Pp. 1010–1023. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-1010
9. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M. The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017. Vol. 7. Issue 10. Pp. 1644–1654. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2720421
10. Егоров А.А. Отличие между эксплуатационным и аварийным разрушением электрических штепсельных контактов при экспертизе пожаров // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2020. № 4. С. 21–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430191>
11. Shea J.J. Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits // Fire and Materials. 2011. Vol. 35. Issue 1. Pp. 19–42. DOI: 10.1002/fam.1033
12. Müller P., Tenbohlen S., Maier R. Current characteristics of serial and parallel low current arc faults in distribution networks // Proc. CIREN. Frankfurt, Germany, 2011. P. 0181.
13. Kharin S.N. Mathematical models of phenomena in electrical contacts : monograph. A.P. Ershov Institute of Informatics system, Siberian Branch of RAS, 2017. 193 p. URL: https://www.iis.nsk.su/files/book/file/Kharin_math_models.pdf

14. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России. Кн. 1. СПб. : Типография «Береста», 2010. 708 с.
15. Сметков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М. : Кабель, 2009. 328 с.
16. Волкова О.Г., Жорняк Л.Б. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей сильнотоочных разрывных контактов // Электротехника і Електромеханіка. 2016. № 1. С. 12–16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02
17. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов / под ред. В.И. Феодосьева. М. : Машгиз, 1962. 456 с.
18. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М. : Машиностроение, 1980. 326 с.
19. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости (регулирование, синтез, оптимизация) / под ред. Н.П. Абовского. М. : Стройиздат, 1978. 189 с.
20. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов / пер. с англ. 2-е изд. СПб. : Лань, 2002. 672 с.
21. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов : учеб. пособие. М. : Наука, 1986. 560 с.
22. Стрелков С.П. Механика. М. : Наука, 1975. 560 с.
23. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин : справочник. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
24. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности : учеб. пособие для инженерно-строительных специальностей вузов. М. : Высшая школа, 1970. 288 с.
25. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М. : Наука, 1986. 296 с.
26. Серенсен С.В., Козаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие / под ред. С.В. Серенсена. М. : Машиностроение, 1975. 488 с.
27. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправл. М. : Наука, 1986. 544 с.
28. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. Новосибирск : Норматика, 2018. 462 с.
29. Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. Heating of high current electric contacts under short-circuit shock currents // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013. Vol. 49. Issue 5. Pp. 433–439. DOI: 10.3103/S1068375513050025

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus).
2. Quintiere J.G. *Front Matter. Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*. 2018; 54(3):749-780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
4. Babrauskas V. Fires originating in branch-circuit NM cables due to installation damage. *Journal of Fire Sciences*. 2018; 36(5):438-450. DOI: 1177/0734904118785920
5. Babrauskas V. Electrical Fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed.* New York, Springer, 2016; 662-704.
6. Ferrino-McAllister J.L., Roby R.J., Milke J.A. Heating at electrical contacts: characterizing the effects of torque, contact area, and movement on the temperature of residential receptacles. *Fire Technology*. 2006; 42(1):49-74. DOI: 10.1007/s10694-005-3734-7
7. Korinek C.W., Korinek T.C., Lopez H.F. Pre and Post-flashover characteristics of an electrically overheated poor connection between copper and steel. *Fire and Materials*. San Francisco, CA, 2013.
8. Benfer M., Gottuk D. Electrical receptacles — Overheating, arcing, and melting. *Fire Safety Science*. 2014; 11:1010-1023. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-1010
9. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M. The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2017; 7(10):1644-1654. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2720421
10. Egorov A.A. The difference between operational and emergency destruction of electrical plug contacts during the examination of fires. *Monitoring and expertise in safety engineering*. 2020; 4:21-29. (rus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44430191>
11. Shea J.J. Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits. *Fire and Materials*. 2011; 35(1):19-42. DOI: 10.1002/fam.1033

12. Müller P., Tenbohlen S., Maier R. Current characteristics of serial and parallel low current arc faults in distribution networks. *Proc. CIGRE*. Frankfurt, Germany, 2011; 0181.
13. Kharin S.N. *Mathematical models of phenomena in electrical contacts : monograph*. A.P. Ershov Institute of Informatics system, Siberian Branch of RAS, 2017; 193. URL: https://www.iis.nsk.su/files/book/file/Kharin_math_models.pdf
14. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. Analysis of expert versions of fire occurrence. *SPbF FGU VNIPO EMERCOM of Russia*. Book 1. St. Petersburg, Beresta LLC Publ., 2010; 708. (rus).
15. Smelkov G.I. *Fire safety of wirings*. Moscow, Cable LLC. Publ., 2009; 328. (rus).
16. Volkova O.G., Zhornyak L.B. Study of the nature of the mechanical interaction of the working surfaces of high-current breaking contacts. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2016; 1:12-16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02 (rus).
17. Andreeva L.E. *Elastic elements of devices*. V.I. Feodosyev (ed.). Moscow, Mashgiz Publ., 1962; 456. (rus).
18. Ponomarev S.D., Andreeva L.E. *Calculation of elastic elements of machines and devices*. Moscow Mashinostroyeniye Publ, 1980; 326. (rus).
19. *Selected problems in structural mechanics and elasticity theory (regulation, synthesis, optimization)*. N.P. Abovsky (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ, 1978; 189. (rus).
20. Gere J.V., Timoshenko S.P. *Mechanics of materials*. 3rd ed. London, Chapman & Hall, 1991; 807. DOI: 10.1007/978-1-4899-3124-5
21. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Resistance of Materials : A Tutorial*. Moscow, Nauka Publ, 1986; 560. (rus).
22. Strelkov S.P. *Mechanics*. Moscow, Nauka Publ, 1975; 560. (rus).
23. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Strength calculation of machine parts : Handbook*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ, 1979; 702. (rus).
24. Samul V.I. *Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity : Textbook for engineering and construction specialties of universities*. Moscow, Vysnaya shkola Publ, 1970; 288. (rus).
25. Popov E.P. *Theory and calculation of flexible elastic rods*. Moscow, Nauka Publ., 1986; 296. (rus).
26. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. *Bearing capacity and strength calculations of machine parts : Manual and reference manual*. S.V. Serensen (ed.). Moscow, Mashinostroyeniye Publ, 1975; 488. (rus).
27. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Mathematics handbook for engineers and students in higher technical education. 13th ed*. Moscow, Nauka Publ., Fizmatgiz Publ., 1986; 544. (rus).
28. *Rules of arrangement of electrical installations*. Novosibirsk, Normatika Publ., 2018; 462. (rus).
29. Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. Heating of high current electric contacts under short-circuit shock currents. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013; 49(5):433-439. DOI: 10.3103/S1068375513050025

Поступила 21.10.2021, после доработки 15.11.2021; принята к публикации 01.12.2021
Received October 21, 2021; Received in revised form November 15, 2021; Accepted December 1, 2021

Информация об авторах

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

АБДЕЕВ Борис Масгутович, канд. техн. наук, профессор «Школы архитектуры, строительства и дизайна», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

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

Information about the authors

Alexandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Boris M. ABDEYEV, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Architectural and Civil Engineering Department, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0002-7188-7599; e-mail: m.abdeeva@mail.ru

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