

Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи

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 автотранспортных средств очень актуальна. Целью статьи является разработка научно-обоснованного метода исследования контактного соединения полюсного вывода свинцовой стартерной батареи, имеющего признаки большого переходного сопротивления или изменение геометрической формы, для установления причины повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

Материалы и методы. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Объектами исследования являлись полюсные выводы свинцовой батареи европейского типа (EU) и их наконечники. Контактные поверхности наконечников подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Теоретические основы (теория и расчеты). Разработана физико-математическая модель предельной несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи, 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 контакта. На конкретном примере показана применимость разработанной математической модели для проведения пожарно-технической экспертизы.

Результаты и обсуждение. Приведены примеры возгораний автомобилей, возникновение которых обусловлено утратой несущей способности в контакте полюсных выводов аккумуляторной батареи с наконечниками проводов в процессе эксплуатации. Приведены снимки результата большого переходного сопротивления на поверхности контакта и его элементный состав. Экспериментальными данными подтверждено, что перенос материала полюсного вывода на наконечники проводов в виде капель свинца и его наслоений является значимым криминалистическим признаком при установлении причины пожара.

Выводы. Предложен метод определения несущей способности контакта полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи с наконечником провода, на основании которого можно сделать вывод о причастности большого переходного сопротивления в контакте к последующему пожару. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании наконечников проводов свинцовых аккумуляторных батарей, 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; полюсные выводы; наконечник провода; контактное давление

Для цитирования: Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 18–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.18-32

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

Assessment of bearing capacity of pole connection of lead-acid storage battery terminal

Alexandr I. Nedobitkov ✉, Boris M. Abdeev

East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction. The data given in the article show that the problem of increase of fire safety at operation of vehicles is actual. The main purpose of the article is to develop a scientifically based method of examination of contact connections of pole terminals of starter batteries, which have signs of high transient resistance or change in geometrical shape in order to find out the reason of damage in the course of fire-technical expertise.

Materials and methods. The researches were carried out with the use of a scanning-electron microscope JSM-6390LV with an attachment for energy-dispersive microanalysis. The objects of research were pole terminals of a lead-acid storage battery of European type and their tips. Contact surfaces of the tips were analyzed without preliminary sample preparation.

Theoretical background (theory and calculations). A physical and mathematical model of ultimate load-bearing capacity of lead battery terminal, which corresponds to real design, has been developed. On this basis, there is formulated a computational and practical algorithm for expert analysis of its mechanical and geometrical characteristics. The solution has been simplified to short calculating formulas, allowing to estimate the contact load-bearing capacity. The applicability of the developed mathematical model to carrying out fire-technical examinations is shown by a concrete example.

Results and discussion. Examples are given of car fires, which were caused by loss of load-bearing capacity in the contact of battery terminals with wire-end terminals during in the process of operation. Pictures of the result of high transient resistance on the contact surface and its elemental composition are given. Experimental data confirmed that the transfer of the material of the pole leads to the tips of wires in the form of drops of lead and its layers is a significant forensic feature in determining the cause of the fire.

Conclusions. The method of determination of load-bearing capacity of contact of a lead battery pole to the wire end, on the basis of which it is possible to draw a conclusion about participation of great transient resistance in the contact to the subsequent fire, is offered. The data given in the article may be used by specialists during an expert examination of lead battery terminals, seized from places of fires, in order to establish the mechanism of their damage and, finally, the cause of a fire.

Keywords: scanning-electron microscopy; stress-strained state; fire-technical expert examination; pole terminals; wire-tip; contact pressure

For citation: Nedobitkov A.I., Abdeev B.M. Assessment of bearing capacity of pole connection of lead-acid storage battery terminal. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):18-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.18-32 (rus).

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

Введение

В работах [1–5] доказательно демонстрируется, что пожары наносят значительный ущерб экономике государства. Статистические сведения, приведенные в работах многих исследователей [4, 6–27], говорят о том, что пожары в автотранспортных средствах по их числу и материальным потерям сегодня постоянно занимают вторую строчку после пожаров, произошедших в жилом секторе. В частности, в работе [20] указывается, что в Российской Федерации пожары, произошедшие на автотранспорте, составляют около 15 % от общего их количества. При этом автором [20] подчеркивается, что в некоторых регионах страны темпы роста числа пожаров на автотранспорте примерно в два раза опережают темпы расширения автомобильного парка, при этом в судебно-экспертных учреждениях ФПС МЧС России сгоревшие автомобили являются одним из основных объектов исследования. Кроме того, для стран Евразийского экономического союза является характерным обстоятельство, что постоянно эксплуатируются автомобили, произведенные 10–30 лет назад. Электропроводка таких автомобилей имеет признаки деградации и часто является причиной пожара. Именно по этой причине И.Д. Чешко в работе [25] ссылается на статистические данные, согласно которым электрические аварийные режимы составляют 30–40 % от общего числа причин пожаров автотранспортных средств.

Актуальность данной работы связана со следующими двумя аспектами. Во-первых, имеет место

весомая доля числа пожаров на автомобильном и промышленном транспорте, связанная со свинцовыми аккумуляторными батареями (АКБ). Например, известен пожар на борту автобуса Nöegh Xiamen в Джексонвилле, штат Флорида, в июне 2020 г., при котором судно и весь его груз были уничтожены с причинением ущерба на сумму 40 млн долларов. Причиной пожара явилась свинцовая аккумуляторная батарея одного из автомобилей, находившегося на борту. Также, по данным NFU Mutual, перегруженные клеммы свинцовых аккумуляторной батареей являются «основным фактором» роста числа возгораний тракторов в Великобритании, при этом страховщик за год выплатил по этой причине почти 19 млн фунтов стерлингов по искам владельцев сельскохозяйственных машин.

Следует напомнить, что в 2021 г. Национальное управление безопасности дорожного движения (NHTSA) начало расследование в отношении 1,9 млн автомобилей Toyota RAV4 2013–2018 гг. выпуска после жалоб на возгорание 12-вольтовой батареи.

Также в 2021 г. Ford отозвал более 30 000 новых пикапов F-150 в Канаде, потому что неправильно прикрепленный зажим аккумуляторной батареи мог привести к остановке двигателя, отказу усилителя тормозов или даже к пожару. Кроме того, отзывная компания затронула 135 000 автомобилей F-150 2019 и 2020 модельных годов в США.

По сообщениям портала «SpeedMe» около 322 тысяч автомобилей моделей Ford Mondeo, Ford S-Max и Ford Galaxy, выпущенные с февраля 2014 г. по февраль 2019 г., будут отозваны из-за утечки

электролита из аккумуляторных батарей, попадание которого на отрицательную клемму вызывает отказ датчика системы контроля АКБ, перегрев батареи и ее возгорание.

Вторым аспектом является мнение авторов [24], которые констатируют, что в настоящее время по-прежнему научное обеспечение исследования пожаров на автотранспортных средствах является недостаточно сформированным и в значительной степени затрудняет работу пожарно-технических экспертов. И это вполне оправданно, поскольку автомобиль является достаточно специфическим объектом как с точки зрения места возникновения пожара, так и источника зажигания, а также особенностей распространения пожара. Именно этим фактором объясняется то обстоятельство, что, несмотря на большое количество проведенных экспериментальных и теоретических работ [6–27], в ряде случаев сложно установить техническую причину пожара автомобиля. Например, в работе [27] приведены криминалистически значимые признаки повреждения латунных наконечников проводов массы автомобиля при большом переходном сопротивлении в контакте, но момент затяжки резьбового соединения не исследовался.

Необходимо уточнить, что в работах [28–30] подробно описано устройство современных свинцовых АКБ и воздействие на них эксплуатационных факторов. В свою очередь, авторами [31–34] предпринята попытка обоснования версии о причастности плохого контакта на полюсном выводе АКБ автомобиля к возникновению пожара. Указанные работы [31–34], а также [25] содержат некоторые криминалистически значимые признаки и условия, но практически не отражают влияние момента затяжки резьбового соединения наконечника полюсного вывода аккумуляторной батареи на возникновение пожароопасного режима.

Автор [5] напомнил, 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» [5]. Кроме того, в работе [35] 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 контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации является обеспечение нормативного контактного давления.

В частности, согласно п. 2.2.3 ГОСТ 10434–82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования» электрическое сопротивление контактных соединений (кроме сварных и паяных), прошедших испытание на соответствие требованиям стандартов и другой технической документации по методике, указанной в ГОСТ 17441, не должно превышать начальное значение более чем в 1,5 раза. Электрическое сопротивление сварных и паяных контактных соединений должно оставаться неизменным. Необходимость обязательного применения моментных индикаторных ключей должна быть указана в стандартах или технических условиях на электротехнические устройства конкретных видов.

В настоящей работе предпринята попытка обосновать математическую модель, применение которой позволит облегчить установление причинной связи между эксплуатационным состоянием контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи и пожаром.

Целью работы является теоретическое обоснование физико-математической модели оценки предельной несущей способности контактного соединения полюсного вывода стартерной свинцовой аккумуляторной батареи.

В статье поставлены следующие задачи:

- разработать уточненную по сравнению с существующей упрощенной методикой расчета прикладную математическую модель для оценки работоспособности аккумуляторного клеммового соединения, учитывающую физико-механические характеристики материала и равномерно распределенное контактное давление q между соприкасающимися поверхностями наконечника и полюсного вывода;
- показать, что полученный расчетно-теоретический алгоритм позволяет варьировать, контролировать и обеспечивать требуемый гарантированный натяг δ с помощью создания необходимого крутящего момента затяжки $M_{кл}$ (момента на ключе) в пределах упругости σ_y , то есть без появления недопустимых остаточных (пластических) деформаций, при которых клеммовое соединение полностью выйдет из строя, вследствие чрезмерного ослабления болтового крепления наконечника и нарушения электрического контакта с последующим большим переходным сопротивлением;
- довести решение до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контакта полюсного вывода АКБ и наконечника провода;
- наглядно показать наличие криминалистически значимого признака в виде переноса материала

полюсного вывода на поверхность наконечника провода;

- экспериментально-теоретически показать, что опасно применять латунные и свинцовые (без стальной пружины) наконечники проводов для полюсных выводов стартерной свинцовой аккумуляторной батареи по причине физической нелинейности материала ЛС59-1 при любом моменте на ключе $M_{кл}$ и малой величины упругой константы $\sigma_y = 0,25 \text{ кг/мм}^2$ у свинцово-сурьмянистого сплава $PbSb_2$;
- проиллюстрировать применимость разработанной математической модели для проведения исследования наконечников полюсных выводов АКБ 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. Объектами исследования являлись полюсные выводы свинцовых аккумуляторных батарей и наконечники их проводов европейского типа (EU). Поверхности разрушения подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Теоретические основы

Согласно ГОСТ Р МЭК 60095-2-2010 «Батареи стартерные свинцово-кислотные. Размеры батарей и размеры и маркировка выводов» аккумуляторные батареи могут быть европейского типа (EU), североамериканского типа (AM) и восточно-азиатского типа (AS). В настоящей работе рассматривались только полюсные выводы аккумуляторных батарей европейского типа (EU). В общем случае наконечники полюсных выводов изготавливаются из свинцовистой латуни ЛС59-1, свинцового сплава $PbSb_2$ и меди [32]. Согласно технологической документации наконечник (клемма) затягивается на полюсном выводе посредством болтового соединения. Необходимо отметить, что конструктивно свинцовый наконечник должен иметь внутреннюю стальную пружину, но на рынке автомобильных запасных частей встречаются подделки без нее.

Необходимо указать, что известный прикладной метод расчета подобных болтовых соединений [36] является предельно упрощенным, поскольку:

1) при определении соотношения между сосредоточенной нагрузкой P , сжимающей болтом 2 элементы клеммы 1, и равнодействующей Q_r распределенного контактного давления q момент этих сил M_c относи-

тельно точки C принимается равным нулю (рис. 1), то есть:

$$M_c = \left(l + \frac{d}{2} \right) - Q_r \cdot \frac{d}{2} = 0, \quad (1)$$

отсюда следует, что:

$$P = Q_r \cdot \frac{d}{2 \left(l + \frac{d}{2} \right)}, \quad (2)$$

где l — расстояние от оси болта 2 до центра полюсного вывода 4;

d — внутренний диаметр клеммного наконечника, равный диаметральному размеру элемента 4;

2) в формуле (2) не учитываются физико-механические характеристики материалов, так как силовая система, изображенная на рис. 1, предполагает ее статическую определенность [37, 38], что в принципе не соответствует реальному напряженно-деформированному состоянию клеммового соединения;

3) в той же идеализированной зависимости (2) не предусматривается характер распределения граничного контактного напряжения q , возникающего между цилиндрическими поверхностями деформируемых тел 1 и 4, а принимается во внимание только его равнодействующая Q_r без учета упругих свойств конкретных материалов взаимодействующих деталей; однако предпосылку $M_c = 0$ можно допустить в первом приближении, учитывая конструктивные особенности клеммового крепления, о чем отмечено в [36].

Перечисленные недостатки инженерно-теоретической модели [36] применительно к автомобильной аккумуляторной батарее не обеспечивают:

1) надлежащую математическую модель контроля и регулирования нормативного натяга, то есть

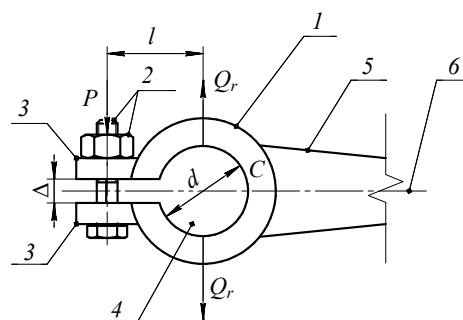


Рис. 1. Расчетная схема клеммового соединения, рекомендуемая [36]: 1 — клемма; 2 — болт с гайкой; 3 — консольные части клеммы; 4 — полюсный вывод; 5 — рычаг; 6 — ось симметрии

Fig. 1. The calculated diagram of the terminal connection recommended [36]: 1 — terminal; 2 — bolt with a nut; 3 — console parts of the terminal; 4 — pole conclusion; 5 — rod; 6 — axis of symmetry terminal

коэффициент Пуассона:

$$\mu = 0,44; \quad (5)$$

пределы упругости [3, 16]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 0,25 \text{ кг/мм}^2 \\ \tau_y &= \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \approx 0,6 \sigma_y \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

в границах которых соблюдается закон Гука [37, 40, 42, 43, 45, 48];

- учитывая малую жесткость свинца, по сравнению со сталью [36, 39, 49, 50], у которой среднее значение модуля $E = 0,18 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$ более чем в 10 раз превышает аналогичную характеристику (4), предусматриваем увеличение начального диаметра d наконечника после его установки на полюсный вывод, когда появится натяг δ [36, 39, 49, 50], а конечный диаметральный размер d_k станет равным:

$$d_k = d + \delta; \quad (7)$$

- вследствие малой величины щелевого зазора Δ между консольными участками соединения (рис. 3, б), а именно:

$$\Delta \ll d, \quad (8)$$

считаем реактивное давление q равномерно распределенным по всей контактной поверхности (рис. 1; 3, б):

$$S = \pi \cdot d \cdot H, \quad (9)$$

что позволяет при определении δ использовать готовую формулу [38, 39, 49]:

$$\delta = \frac{q}{E} \cdot d \left(1 + \frac{4R^2 + d^2}{4R^2 - d^2} \right) = \frac{8 \cdot q \cdot d \cdot R^2}{E(4R^2 - d^2)}, \quad (10)$$

как для толстостенной втулки в виде короткого цилиндра, заданной длины H и толщины b (моделирующего криволинейные части клеммы), насаженного с требуемым натягом δ на сплошной круглый короткий стержень — полюсный вывод (рис. 3, а, б).

Согласно тем же литературным источникам [39, 49, 50], при одинаковом материале элементов наконечника радиальное перемещение δ не зависит от коэффициента Пуассона μ (см. (5)).

Далее, воспользовавшись схемой рис. 3, б с полярным углом θ , находим равнодействующую [50]:

$$Q_r = H \int_0^{180^\circ} q \cdot \frac{d}{2} \sin \theta \cdot d\theta = H \frac{dq}{2} \cdot (-\cos \theta) \Big|_0^{180^\circ} = Hdq, \quad (11)$$

которую выражаем также через заданный нормативный момент затяжки $M_{кл}$:

$$Q_r = \frac{2M_{кл} \left(l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d}, \quad (12)$$

с помощью формул (2), (3).

Приравняв правые части (11), (12), получаем алгебраическое соотношение:

$$H \cdot d \cdot q = \frac{2M_{кл} \left(l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d}, \quad (13)$$

откуда следует очень важная линейная зависимость:

$$q = q(M_{кл}) = \frac{2M_{кл} \left(l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d^2 \cdot H}. \quad (14)$$

Имея функцию $q(M_{кл})$ и постоянную материала σ_y (см. (6)), можно проконтролировать упругую работу аккумуляторного соединения (рис. 2), опасными местами которого будут (рис. 3, б):

- вся внутренняя контактная поверхность криволинейного элемента l (рис. 2; 3, б), где радиальное σ_r и кольцевое σ_θ главные напряжения достигают экстремальных абсолютных значений [18]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -q \leq 0 \\ \sigma_\theta &= q \frac{4R^2 + d^2}{4R^2 - d^2} \geq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

и на этом основании формулируем первое необходимое граничное неравенство, гарантирующее отсутствие пластических (остаточных) деформаций, в виде рекомендуемой [38, 39, 49] энергетической теории несущей способности (гипотеза Губера – Мизеса – Генки) [37–40, 49]:

$$\sqrt{(\sigma_\theta^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_r)} \leq \sigma_y \quad (16)$$

или после подстановки (14), (15):

$$\frac{2M_{кл} \left(l + \frac{d}{2} \right)}{0,15 \cdot d_\delta \cdot d^2 \cdot H} \cdot \sqrt{\frac{8R^2(4R^2 + d^2)}{(4R^2 - d^2)^2} + 1} \leq \sigma_y; \quad (17)$$

- любые поперечные сечения $l-l$ коротких консолей 3 (рис. 2; 3, б) на участке с ненулевой эпюрой Q , в которых возникают постоянные касательные напряжения (см. также (3) и (6))

$$\tau = \frac{P}{bH} = \frac{M_{кл}}{0,15 \cdot d_\delta \cdot b \cdot H} \leq \tau_y = 0,6 \sigma_y \quad (18)$$

чистого сдвига, так как размер l_p сопоставим с b и изгиб здесь практически невозможен [37, 40].

Оба условия (17), (18) должны соблюдаться одновременно.

Наряду с проверками (17), (18) необходимо оценить и упругую жесткость на сдвиг консольных участков 3 (рис. 2) по углу γ с целью гарантии невозможности закрытия зазора Δ в процессе натяга δ . Для осуществления этой процедуры:

- определяем по напряжению τ (18) относительную сдвиговую (угловую) малую деформацию в радианах ($\gamma \ll 1$):

$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{2(1+\mu) \cdot M_{\text{кл}}}{0,15 E \cdot d_{\delta} \cdot b \cdot H}, \quad (19)$$

где G — модуль сдвига изотропного материала [37]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (20)$$

- имея γ (19), находим линейную функцию вертикальных перемещений:

$$V = v(x) = \gamma x \quad (21)$$

и ее максимальную величину f при $x = 2l_p$:

$$f = v(2l_p) = \frac{4(1+\mu) \cdot M_{\text{кл}} \cdot l_p}{0,15 E \cdot d_{\delta} \cdot b \cdot H}, \quad (22)$$

- записываем условие деформируемости (рис. 3, b):

$$f = \frac{4(1+\mu) \cdot M_{\text{кл}} \cdot l_p}{0,15 E \cdot d_{\delta} \cdot b \cdot H} \leq 0,5 \Delta, \quad (23)$$

обеспечивающее сохранение щелевого зазора Δ в период эксплуатации аккумулятора.

Обобщая представленные выше аналитические зависимости, приводим алгоритм подбора предельно допустимого крутящего момента $[M_{\text{кл}}]$ упругой затяжки разъемного соединения (рис. 2), схематические модели которого изображены на рис. 3.

1. Определение $[M_{\text{кл}}]_{\delta}$ и $[M_{\text{кл}}]_{\tau}$, руководствуясь (17), (18):

$$[M_{\text{кл}}]_{\delta} = \frac{0,15 \cdot d_{\delta} \cdot d^2 \cdot H \cdot \sigma_y}{2 \left(l + \frac{d}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{8R^2(4R^2 + d^2)}{(4R^2 - d^2)^2} + 1}}; \quad (24)$$

$$[M_{\text{кл}}]_{\tau} = 0,09 d \cdot b \cdot H \cdot \sigma_y. \quad (25)$$

2. Выбор минимального значения из двух $[M_{\text{кл}}]_{\delta}$ и $[M_{\text{кл}}]_{\tau}$ в качестве окончательного требуемого момента на ключе $M_{\text{кл}}$.

3. Проверка на жесткость консольных элементов 3 клеммового крепления (рис. 2 и 3, b) из условия (23), в котором сделана замена:

$$M_{\text{кл}} = [M_{\text{кл}}]. \quad (26)$$

4. Расчет контактного давления q , адекватного $[M_{\text{кл}}]$, и соответствующего максимально возможного натяга δ между контактирующими цилиндрическими поверхностями наконечника 1 и полюсного вывода 2 (рис. 2; 3, b) по формулам (10), (14) с учетом (26).

Завершая теоретический раздел статьи, рассмотрим характерный численный пример, иллюстрирующий возможность практического применения полученных результатов. С этой целью в качестве исходных данных принимаем:

- свинцовый литой наконечник (без стальной пружины) и полюсный вывод (рис. 2; 3, b), имеющие:

$$\left. \begin{aligned} E &= 1800 \text{ кг/мм}^2, \mu = 0,44, \sigma_y = 0,25 \text{ кг/мм}^2 \\ l &= 21,5 \text{ мм}, d = 17 \text{ мм}, R = 15 \text{ мм} \\ H &= 17 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм}, l_p = 6,5, \Delta = 1 \text{ мм} \end{aligned} \right\}; \quad (27)$$

- натяжной болт М6 с расчетным диаметром:

$$d\delta = 6 \text{ мм}. \quad (28)$$

Выполняя вычисления в порядке позиций 1–4 алгоритма, получаем:

$$1) \left[M_{\text{кл}} \right]_{\delta} = \frac{0,15 \cdot 6 \cdot 17^2 \cdot 17 \cdot 0,25}{2 \left(21,5 + \frac{17}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot 15^2 (4 \cdot 15^2 + 17^2)}{(4 \cdot 15^2 - 17^2)^2} + 1}} = 7,1 \text{ кг} \cdot \text{мм} \quad (29)$$

$$2) \left[M_{\text{кл}} \right]_{\tau} = 0,09 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 17 \cdot 0,25 = 18,36 \text{ кг} \cdot \text{мм}$$

$$[M_{\text{кл}}]_{\delta} = M_{\text{кл}} = 7,1 \text{ кг} \cdot \text{мм} \approx 0,071 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (30)$$

$$3) f = \frac{4(1+0,44) \cdot 7,1 \cdot 6,5}{0,15 \cdot 18\,006 \cdot 8 \cdot 17} = 0,0012 \leq 0,5 \Delta = 0,5 \text{ мм}; \quad (31)$$

$$4) \left. \begin{aligned} \frac{2 \cdot 7,1 \left(21,5 + \frac{17}{2} \right)}{0,15 \cdot 6 \cdot 17^2 \cdot 17} &= 0,096 \text{ кг/мм}^2 \\ \delta &= \frac{8 \cdot 0,096 \cdot 17 \cdot 15^2}{1800 (4 \cdot 15^2 - 17^2)} = 0,00267 \text{ мм} \end{aligned} \right\}. \quad (32)$$

Таким образом, в данном конкретном примере обеспечить упругую работу клеммового соединения возможно только при соблюдении условия:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{кл}} &\leq [M_{\text{кл}}]. \\ [M_{\text{кл}}] &= 0,071 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

С другой стороны, найденное значение в десятки раз меньше нормативного усилия $M_{\text{кл}}^{(H)}$, приведенного в инструкции к транспортному средству (то есть электрический контакт ненадежен, так как не выполняется теорема). Например, момент затяжки $M_{\text{кл}}^{(H)}$,

для легкового автомобиля LADA Vesta должен быть в пределах 4–6 Н·м. Если наконечник полюсного вывода будет выполнен из свинца, то это приведет к утрате упругости в контакте, отсутствию контактного давления и автоматическому появлению большого переходного сопротивления.

Поэтому, чтобы удовлетворить всем необходимым эксплуатационно-технологическим требованиям, следует использовать для клеммового наконечника сплав, обладающий высоким пределом упругости σ_y и малым электрическим сопротивлением. В частности, для получения $[M_{кл}]$ в диапазоне 2–3 Н·м физико-механическая константа σ_y должна быть не менее 7,04–10,56 кг/мм² по граничному условию упругости (17) со знаком равенства. И в соответствии с (14) предельное расчетное значение реактивного давления q станет при этом равным $q = 2,71\text{--}4,07$ кг/мм². Такой уровень q , по сравнению с (32), где $q = 0,096$ кг/мм², будет уже вполне достаточным для создания качественного электрического контакта в соединении наконечника с полюсным выводом.

Оптимальным конструктивным решением данной проблемы является применение сплавов, обладающих упругостью и электропроводностью, например, бериллиевая бронза БрБ2 (ГОСТ 18175–78), у которой $\sigma_y = 960$ МПа (≈ 96 кг/мм²), что больше $\sigma_y = 0,25$ кг/мм² у свинцово-сурьмянистого сплава PbSb₂ в 384 раза. Несомненно, стоимость бериллиевой бронзы выше, чем свинцово-сурьмянистого сплава, но ее применение обеспечивает высокое качество электрического контакта и, соответственно, пожарную безопасность соединения наконечника с полюсным выводом.

Результаты и их обсуждение

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

вые, химические и механические воздействия, запыленность, влажность и т.д. [5].

В работе [32] приведен пример повреждения контактной поверхности клеммы АКБ и на основе световой микроскопии установлено, что имеют место оплавления, вздутия, каверны, характерные для электрической дуги при электроэрозии. Следует отметить, что согласно ГОСТ 27674–88 «Трение, изнашивание и смазка», электроэрозионное изнашивание — эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. В свою очередь, автор [51] указывает, что разрушение контактов при электроэрозии имеет три механизма. Это испарение, разбрызгивание расплавленного металла и химические процессы, связанные с взаимодействием материала контактов с элементами окружающей среды, и разрушение образовавшихся пленок при термическом воздействии. Вполне очевидно, что методами оптической микроскопии выявить все многообразие признаков электроэрозии не представляется возможным. Например, капля свинца полюсного вывода АКБ при разбрызгивании будет выглядеть так же, как и капля этого металла, образовавшаяся при высокотемпературном воздействии в процессе пожара. Растровая микроскопия в данном случае более информативна, поскольку позволяет провести микроанализ и тем самым определить химический состав как капли металла, так и пленки. Более того, в работе [52] приведен ряд типичных экспертных ошибок при использовании такого метода, как оптическая микроскопия.

Также авторы [32], анализируя состояние клеммы АКБ, приходят к выводу, что она была не затянута с нормативной затяжкой, либо не была одета до конца на выводной борт. На рис. 4 показаны наконечники полюсных выводов АКБ, при этом все они затянуты до состояния, при котором их внутренний диаметр равен значению, приведенному в ГОСТ Р МЭК 60095-2-2010 «Батареи стартерные свинцово-кислотные. Размеры батарей и размеры

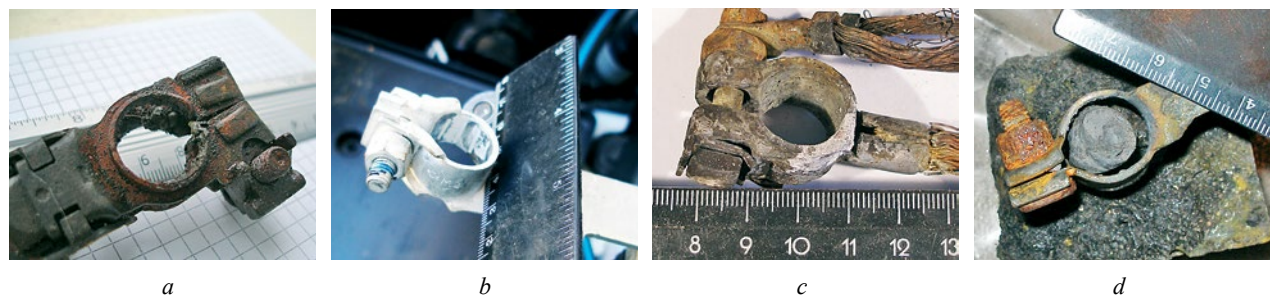


Рис. 4. Повреждения наконечников полюсных выводов аккумуляторных батарей: *a* — капли металла на внутренней поверхности; *b* — перенос материала на внутренней поверхности; *c* — изменение конструкции резьбового соединения; *d* — оплавление полюсного вывода при полностью затянутом резьбовом соединении

Fig. 4. Damage to battery pole terminals: *a* — metal droplets on the inner surface; *b* — material transfer on the inner surface; *c* — change in the design of the threaded connection; *d* — melting of the pole lead when the threaded connection is fully tightened

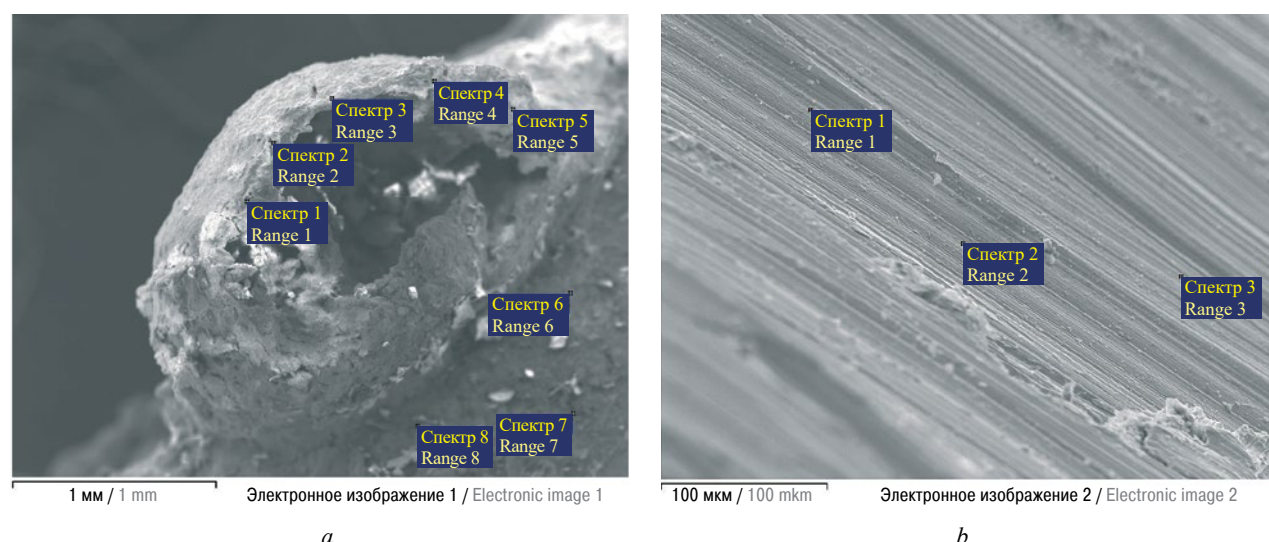


Рис. 5. Точки микроанализа: *a* — на внутренней поверхности наконечника полюсного вывода аккумуляторной батареи; *b* — на зачищенной от сажи и окислов поверхности

Fig. 5. Microanalysis points: *a* — on the inner surface of the tip of the pole terminal of the battery; *b* — on a surface cleaned from soot and oxides

и маркировка выводов». На рис. 4, *b* видна маркировочная отметка краской синего цвета, на рис. 4, *c* показан пример изменения конструкции путем установки более длинного болта и дополнительной гайки с целью увеличения контактного давления.

На рис. 4, *d* приведен пример, когда консольные части клеммы АКБ фактически прижаты друг к другу, но тем не менее большое переходное сопротивление в контакте привело к оплавлению полюсного ввода. Таким образом, фактические данные, приведенные на рис. 4, свидетельствуют об утрате упругости в контакте, отсутствии контактного давления и автоматическом появлении большого переходного сопротивления, даже при регламентированной затяжке резьбового соединения. Как показывают вышеприведенные расчеты, это возможно лишь при одном условии — конструктивно

ненадежном электрическом контакте, при котором не выполняется соотношение (33).

На рис. 5 показаны точки микроанализа на внутренней поверхности наконечника полюсного вывода АКБ, имеющего оплавление.

Из табл. 1 следует, что оплавление в виде капли металла согласно точкам измерения 1–5 содержит от 47,32 до 91,60 % свинца со следами меди и сурьмы. Температура плавления свинца составляет 327,5 °С, а температура кипения — 1751 °С. Необходимо отметить, что токоотводы электродов стартерных аккумуляторов и полюсные выводы отливают из свинцово-сурьмянистого сплава. В то же время в точках 6–8, удаленных от капли металла, содержание меди составляет от 6,46 до 23,69 % и появляются следы железа.

В табл. 2 приведены данные по участку, очищенному от продуктов пожара. Согласно табл. 2, нако-

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 5, *a*

Table 1. The results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5, *a*

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass											
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Sn	Sb	Pb
Спектр 1 / Range 1	3,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	4,08	0,00	0,00	91,60
Спектр 2 / Range 2	15,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	12,17	69,62
Спектр 3 / Range 3	29,51	0,33	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,66	13,81	47,32
Спектр 4 / Range 4	23,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	75,94
Спектр 5 / Range 5	22,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,29	0,00	0,00	69,83
Спектр 6 / Range 6	29,17	0,00	0,00	0,92	1,12	3,53	0,75	1,83	6,46	0,00	0,00	56,22
Спектр 7 / Range 7	26,67	9,64	0,00	0,00	0,00	3,91	0,93	1,07	23,69	0,00	0,00	34,10
Спектр 8 / Range 8	24,25	0,00	1,50	0,63	2,01	1,86	0,00	0,75	17,56	4,46	0,00	46,97

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 5, *b*
Table 2. The results of the microanalysis of the section shown on Fig. 5, *b*

Точки измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass						
	O	Al	Sn	Fe	Cu	Pb	Zn
Спектр 1 / Range 1	6,79	0,00	0,00	1,08	83,98	8,14	0,00
Спектр 2 / Range 2	0,00	0,89	0,00	0,00	99,11	0,00	0,00
Спектр 3 / Range 3	0,00	0,74	0,00	0,00	99,26	0,00	0,00

нечник полюсного вывода выполнен из меди, температура плавления которой составляет 1083 °С. При сопоставлении данных табл. 1 и табл. 2 следует вывод, что в контакте полюсный вывод–наконечник имеет место испарение и разбрызгивание расплавленного металла (Cu, Pb, Sb), что является характерным признаком электроэрозии [50]. Следы железа могут быть объяснены электродуговым процессом на поверхности резьбового соединения болт–гайка наконечника полюсного вывода.

В работе [32] приведен алгоритм отработки версии о причастности «плохого» контакта на клемме аккумуляторной батареи автомобиля к возникновению пожара. Предлагается дополнить его проверкой условия (33) о возможности упругой работы клеммового соединения. Если условие не выполняется, то причина пожара может быть связана с конструктивным недостатком, если выполняется, то необходимо совместно с экспертом-автотехником рассмотреть эксплуатационные причины утраты несущей способности клеммового соединения.

Также необходимо отметить, что у современных автомобилей утрата несущей способности клеммового соединения аккумуляторной батареи зачастую не приводит к пожару. На рис. 4, *b* показан наконечник полюсного вывода автомобиля Toyota Land Cruiser 150/GRJ150. У данного автомобиля при движении вследствие разрядов при прохождении электрического тока в клеммовом соединении АКБ и импульса тока произошел одновременный отказ блока распределения питания, блока мультимплекс, блока кондиционера, блока управления двигателем, блока управления фарой, комбинации приборов, генератора, блока иммобилайзера, блока АБС, блока управления подвеской. В подобном случае именно растровая микроскопия может зафиксировать микропризнаки электроэрозии в наконечнике полюсного вывода.

Таким образом, в результате применения расчетного метода и растровой микроскопии при исследовании клеммового соединения АКБ можно установить криминалистически значимые признаки, позволяющие установить причинную связь между утратой контактом несущей способности и пожаром.

Выводы

Примерами из практики наглядно проиллюстрировано, что в соединении полюсный вывод АКБ — наконечник провода может иметь место утрата несущей способности контакта, обусловленная как эксплуатационными, так и конструктивными факторами, что ведет к его нагреву и в конечном счете к возгоранию автотранспортного средства, дорожной, сельскохозяйственной или горнодобывающей машины.

Разработана уточненная по сравнению с существующей упрощенной методикой расчета прикладная математическая модель для оценки работоспособности аккумуляторного клеммового соединения, учитывающая физико-механические характеристики материала и равномерно распределенное контактное давление q между соприкасающимися поверхностями наконечника и полюсного вывода.

Показано, что полученный расчетно-теоретический алгоритм позволяет варьировать, контролировать и обеспечивать требуемый гарантированный натяг δ с помощью создания необходимого крутящего момента затяжки $M_{кл}$ (момента на ключе) в пределах упругости σ_y , то есть без появления недопустимых остаточных (пластических) деформаций, при которых клеммовое соединение полностью выйдет из строя, вследствие чрезмерного ослабления болтового крепления наконечника и нарушения электрического контакта с последующим большим переходным сопротивлением.

Решение доведено до простых расчетных формул, позволяющих оценивать несущую способность контакта полюсного вывода АКБ и наконечника провода.

Наглядно показано наличие криминалистически значимого признака в виде переноса материала полюсного вывода на поверхность наконечника провода при большом переходном сопротивлении.

Экспериментально-теоретически показано, что опасно применять латунные и свинцовые (без стальной пружины) наконечники проводов для полюсных выводов стартерной свинцовой аккумуляторной батареи по причине физической нелинейности материала ЛС59-1 при любом моменте на ключе $M_{кл}$.

и малой величины упругой константы $\sigma_y = 0,25 \text{ кг/мм}^2$ у свинцово-сурьмянистого сплава PbSb_2 .

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании наконечников проводов полюсных выводов свинцовых стартерных батарей, изымаемых с мест пожаров, установ-

лении 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. Fundamentals of fire phenomena. 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. 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
5. 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
6. Dorsz A, Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 1. P. 11. DOI: 10.3390/en15010011
7. Gudym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., Gavryliuk A. The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring // Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 136. P. 106198. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106198
8. Brzezinska D., Ollesz R., Bryant P. Design car fire size based on fire statistics and experimental data // Fire and Materials. 2020. Vol. 44. Issue 8. Pp. 1099–1107. DOI: 10.1002/fam.2913
9. Hui Zhu, Yunji Gao, Haidong Guo. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle // Case Studies in Thermal Engineering. 2020. Vol. 22. P. 100795. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100795
10. Park Y., Ryu J., Ryou H.S. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter // Energies. 2019. Vol. 12. Issue 8. P. 1465. DOI: 10.3390/en12081465
11. Hyeongho Choi, Lee Eui-Pyeong. Analysis of a fire in a parked camping car // Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 217–223. DOI: 10.9798/KOSHAM.2019.19.1.217
12. Dayan Li, Guoqing Zhu, Hui Zhu, Zhichao Yu, Yunji Gao, Xiaohui Jiang. Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire // Case Studies in Thermal Engineering. 2017. Vol. 10. Pp. 315–324. DOI: 10.1016/j.csite.2017.08.001
13. Xiao-hui Jiang, Guo-qing Zhu, Hui Zhu, Da-yan Li. Full-scale experimental study of fire spread behavior of cars // Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. Pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
14. Lee Eui-Pyeong. Analysis of a car fire caused by a fuel leakage from the common rail // Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2018. Vol. 18. Issue 4. Pp. 225–231. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.225
15. Kruger S., Hofmann A., Berger A., Gude N. Investigation of smoke gases and temperatures during car fire — large-scale and small-scale tests and numerical investigations // Fire and Materials. 2016. Vol. 40. Issue 6. Pp. 785–799. DOI: 10.1002/fam.2342
16. Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., Watanabe N. Burning behavior of minivan passenger cars // Fire Safety Journal. 2013. Vol. 62. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.09.010
17. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., et al. Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. 2008. Vol. 44. Issue 3. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
18. Xioa-hui J., Guo-qing Z., Hui Z., Dayan L. Full-scale experimental study to fire spread behavior of cars // Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. Pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
19. Ferrone C.W. Commercial vehicle fire, cause and origin analysis // Mechanical, electrical and forensic methods : 2nd int. conf., Fires in Vehicles. Chicago, USA, 2012. Pp. 83–93.
20. Скодтаев С.В. Механизм и морфологические признаки аварийных пожароопасных процессов в электросетях автомобилей : дис. ... канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. 140 с.
21. Johnsson E.L., Yang J.C. Experimental study on hardening a motorcoach against tire fire penetration // Fire and Materials. 2016. Vol. 4. Issue 3. Pp. 416–426. DOI: 10.1002/fam.2295
22. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 96–102. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1120/0>

23. Ложкин В.Н. Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74
24. Ворошилов Р.Ф., Мурашкевич Е.А. Исследование поврежденного огнем легкового автомобиля после воздействия тепла пожара при разгерметизации топливной системы // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. Т. 18. № 3. С. 38–41. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.18.3.006
25. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. Кн. 1. СПб: Типография «Береста», 2010. 708 с.
26. Сметков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М.: ООО «Кабель», 2009. 328 с.
27. Недобитков А.И. Экспертное исследование автомобильных латунных кабельных наконечников провода массы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 6. С. 29–35. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/431>
28. Prengaman R.D. The metallurgy and performance of cast and rolled lead alloys for battery grids // The Battery Man. 1997. Pp. 16–36.
29. Rand D.A.J., Boden D.P., Lakshmi C.S., Nelson R.R., Prengaman R.D. Manufacturing and operational issues with lead-acid batteries // Journal of Power Sources. 2002. Vol. 107. Issue 2. Pp. 280–300. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01083-7
30. Русин А., Найденов В., Кудрявцев А. Современные свинцовые аккумуляторы / под ред. проф. А.И. Русина. СПб.: Петрополис, 2017. 148 с.
31. Barnett G.J. Vehicle battery fires: why they happen and how they happen. Warrendale, Pennsylvania: SAE International Ltd., 2017. DOI: 10.4271/R-443
32. Горбунов А.С., Васильев А.В., Беляк А.Л., Могильникова А.В. Порядок отработки версии о причастности плохого контакта на клемме аккумуляторной батареи автомобиля к возникновению пожара // Образование и право. 2021. № 10. С. 450–456. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poryadok-otrabotki-versii-o-prichastnosti-plohogo-kontakta-na-klemme-akkumulyatornoy-batarei-avtomobilya-k-vozniknoveniyu-pozhara>
33. Zhenyu Li, Zhongjie Wang, Liang Wang. Discussion of the relationship between failure and fire of valve regulated lead acid battery // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 185. P. 01058. DOI: 10.1051/e3s-conf/202018501058
34. Карасев Е.В., Таратанов Н.А., Чурбанов Н.Б. Исследование процесса возникновения и развития пожара на объекте строительной техники // Пожарная и аварийная безопасность. 2021. № 2 (21). С. 26–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46249438>
35. Волкова О.Г., Жорняк Л.Б. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей сильноточных разрывных контактов // Электротехника и электромеханика. 2016. № 1. С. 12–16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-haraktera-mehanicheskogo-vzaimodeystviya-rabochih-poverhnostey-silnotochnyh-razryvnyh-kontaktov>
36. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т. 2. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
37. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учеб. пос. М.: Наука, 1986. 560 с.
38. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.
39. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
40. Филлин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1. М.: Наука, 1975. 832 с.
41. Жидков А.В., Любимов А.К. Плоские задачи теории упругости: учеб.-мет. пос. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2019. 38 с.
42. Стружанов В.В., Бурмашева Н.В. Теория упругости: основные положения: учеб. пос. / В.В. Стружанов, Н.В. Бурмашева. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 204 с.
43. Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения / пер. с нем. М.: Мир, 1988. 344 с.
44. Кац А.М. Теория упругости. СПб.: Изд-во Лань, 2002. 208 с.
45. Скрипняк Е.Г., Жукова Т.В., Скрипняк В.А. Математическая постановка задач линейной теории упругости: учеб. пос. Томск: Изд-во ТГУ, 2005. 26 с.
46. Киселев В.А. Плоская задача теории упругости: учеб. пос. для вузов. М.: Высшая школа, 1976. 151 с.
47. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / пер. с англ. М.И. Рейтмана, под ред. Г.С. Шапиро. М.: Наука, 1975. 576 с.
48. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости: монография. М.: Физматлит, 2004. 299 с.
49. Бояришинов С.В. Основы строительной механики машин: учеб. пос. М.: Машиностроение, 1973. 456 с.
50. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд. испр. М.: Наука, 1986. 544 с.
51. Берент В.Я. Электроэрозия электрических контактов // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 2. С. 88–96.
52. Лютов В.П., Шлыков Д.А. Оптическая микроскопия как источник экспертных ошибок // Энциклопедия судебной экспертизы: научно-практический журнал. 2016. Вып. 4 (11). URL: http://proexpertizu.ru/theory_and_practice/ted/703/

REFERENCES

- Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. How much is the fire "cost" in the modern world? *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1): 79-88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus).
- Quintiere J.G. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
- Babrauskas V. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*. 2018; 54(3):749-780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
- Nedobitkov A.I., Abdeev B.M. On physical basis of local current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):18-28. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.18-28 (rus).
- 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).
- Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures. *Energies*. 2022; 15(1):11. DOI: 10.3390/en15010011
- Gudym V., Mykhalichko B., Nazarovets O., Gavryliuk A. The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 136:106198. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106198
- Brzezinska D., Ollesz R., Bryant P. Design car fire size based on fire statistics and experimental data. *Fire and Materials*. 2020; 44(8):1099-1107. DOI: 10.1002/fam.2913
- Hui Zhu, Yunji Gao, Haidong Guo. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 22:100795. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100795
- Park Y., Ryu J., Ryou H.S. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter. *Energies*. 2019; 12(8):1465. DOI: 10.3390/en12081465
- Hyeongho Choi, Lee Eui-Pyeong. Analysis of a fire in a parked camping car. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2019; 19(1):217-223. DOI: 10.9798/KOSHAM.2019.19.1.217
- Dayan Li, Guoqing Zhu, Hui Zhu, Zhichao Yu, Yunji Gao, Xiaohui Jiang. Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2017; 10:315-324. DOI: 10.1016/j.csite.2017.08.001
- Xiao-hui Jiang, Guo-qing Zhu, Hui Zhu, Da-yan Li. Full-scale experimental study of fire spread behavior of cars. *Procedia Engineering*. 2018; 211:297-305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
- Lee Eui-Pyeong. Analysis of a car fire caused by a fuel leakage from the common rail. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2018; 18(4):225-231. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.225
- Kruger S., Hofmann A., Berger A., Gude N. Investigation of smoke gases and temperatures during car fire-large-scale and small-scale tests and numerical investigations. *Fire and Materials*. 2016; 40(6): 785-799. DOI: 10.1002/fam.2342
- Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., Watanabe N. Burning behavior of minivan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2013; 62:272-280. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.09.010
- Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., et al. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2009; 44(3): 301-310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
- Xiao-hui J., Guo-qing Z., Hui Z., Dayan L. Full-scale experimental study to fire spread behavior of cars. *Procedia Engineering*. 2018; 211:297-305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016
- Ferrone C.W. Commercial vehicle fire, cause and origin analysis. *Mechanical, electrical and forensic methods : 2nd int. conf., Fires in Vehicles, Chicago, USA, 2012*; 83-93.
- Skodtaev S.V. *Mechanism and morphological features of emergency fire-dangerous processes in electric networks of cars : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2019; 144. (rus).
- Johnsson E.L., Yang J.C. Experimental study on hardening a motorcoach against tire fire penetration. *Fire and Materials*. 2016; 40(3):416-426. DOI: 10.1002/fam.2295
- Kharlamenkov A.S. The fire hazard of the use of lithium-ion batteries in Russia. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3): 96-102. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/1120/0> (rus).
- Lozhkin V.N. Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):65-74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74 (rus).
- Voroshilov R.F., Murashkevich E.A. Investigation of a car damaged by fire after exposure to the heat of a fire during depressurization of the fuel system. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2020; 18(3):38-41. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.18.3.006 (rus).
- Cheshko I.D., Plotnikov V.G. *Analysis of expert versions of fire occurrence. Book 1*. St. Petersburg, Beresta Publ., 2010; 708. (rus).
- Smelkov G.I. *Fire safety of wirings*. Moscow, LLC "Kabel" Publ., 2009; 328. (rus).
- Nedobitkov A.I. Expert research of automobile brass cable lug wire weight. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire*

- and Explosion Safety. 2015; 24(6):29-35. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/431> (rus).
28. Prengaman R.D. The metallurgy and performance of cast and rolled lead alloys for battery grids. *The Battery Man*. 1997; 16-36.
 29. Rand D.A.J., Boden D.P., Lakshmi C.S., Nelson R.R., Prengaman R.D. Manufacturing and operational issues with lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*. 2002; 107(2):280-300. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01083-7
 30. Rusin A., Naydenov V., Kudryavtsev A. *Modern lead batteries*. A. Rusina (ed.). St. Petersburg, Petropolis Publ., 2017; 148. (rus).
 31. Barnett G.J. *Vehicle battery fires : why they happen and how they happen*. Warrendale, Pennsylvania, SAE International Ltd., 2017. DOI: 10.4271/R-443
 32. Gorbunov A.S., Vasil'yev A.V., Belyak A.L., Mogil'nikova A.V. The procedure for working out the version about the involvement of a bad connection on the battery terminal of the car in the occurrence of a fire. *Education and Law*. 2021; 10:450-456. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poryadok-otrabotki-versii-o-prichastnostiplohogo-kontakta-na-klemme-akkumulyatornoy-batarei-avtomobilya-k-vozniknoveniya-pozhara> (rus).
 33. Zhenyu Li, Zhongjie Wang, Liang Wang. Discussion of the relationship between failure and fire of valve regulated lead acid battery. *E3S Web of Conferences*. 2020; 185:01058. DOI: 10.1051/e3s-conf/202018501058
 34. Karasev Ye.V., Taratanov N.A., Churbanov N.B. Forecasting the process of occurrence and development of emergency situations related to fires at construction equipment facilities. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'/Fire and Emergency Safety*. 2021; 21(2):38-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46249438> (rus).
 35. Volkova O.G., Zhorniyak L.B. Investigation of high-current interrupting contacts working surfaces mechanical interaction nature. *Elektrotehnika i elektromekhanika/Electrical engineering and electromechanics*. 2016; 1:12-16. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.1.02. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-harakterov-mekhanicheskogo-vzaimodeystviya-rabochih-poverhnostey-silnotochnyh-razryvnyh-kontaktov> (rus).
 36. Anur'yev V.I. *Handbook of the designer-machine builder : in 3 vol. : Vol. 2. 8th ed., rev. and exp.* I.N. Zhestkovoy (ed.). Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001; 912. (rus).
 37. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Resistance of Materials : A Tutorial*. Moscow, Nauka Publ., 1986; 560. (rus).
 38. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveyev V.V. *Handbook of Strength of Materials*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1975; 704. (rus).
 39. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Strength calculation of machine parts : handbook*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979; 702. (rus).
 40. Filin A.P. *Applied mechanics of a solid deformable body. Vol. 1*. Moscow, Nauka Publ., 1975; 832. (rus).
 41. Zhidkov A.V., Lyubimov A.K. *Plane problems of the theory of elasticity : study guide*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University Publ., 2019; 38. (rus).
 42. Struzhanov V.V., Burmasheva N.V. *Theory of elasticity: basic provisions : tutorial*. Ekaterinburg, Ural. feder. un-t, 2019; 204. (rus).
 43. Hans Georg Hahn. *Elastizitätstheorie. Grundlehren der linearen Theorie und Anwendungen auf eindimensionale, ebene und räumliche Probleme*. B.G. Teubner Stuttgart, 1985. (ger).
 44. Kats A.M. *Theory of elasticity*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2002; 208. (rus).
 45. Skripnyak Ye.G., Zhukova T.V., Skripnyak V.A. *Mathematical formulation of problems of the linear theory of elasticity : tutorial*. Tomsk, TGU Publ., 2005; 26. (rus).
 46. Kiselev V.A. *Plane problem of the theory of elasticity : tutorial*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976; 151. (rus).
 47. Timoshenko S.P., Goodier J. *Theory of elasticity*. Trans. from English. M.I. Reitman. G.S. Shapiro (ed.). Moscow, Nauka Publ., 1975; 576. (rus).
 48. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Analytical methods in contact problems of the theory of elasticity : Monograph*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004; 299. (rus).
 49. Boyarshinov S.V. *Fundamentals of structural mechanics of machines : Textbook*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973; 456. (rus).
 50. 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).
 51. Berent V.Y. Electroerosion of electric contacts. *Russian Railway Science Journal*. 2016; 75(2):88-96. (rus).
 52. Lyutov V.P., Shlykov D.A. Optical microscopy as a source of expert errors. *Entsiklopediya sudebnoy ekspertizy: nauchno-prakticheskiy zhurnal/Encyclopedia of Forensic Science: Scientific and Practical Journal*. 2016; 11(4). URL: http://proexpertizu.ru/theory_and_practice/ted/703/ (rus).

Поступила 23.11.2022, после доработки 05.12.2022;

принята к публикации 02.02.2023

Received November 23, 2022; Received in revised form December 5, 2022;

Accepted February 2, 2023

Информация об авторах

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский государственный технический университет, Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19; РИНЦ ID: 1137774; 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 государственный технический университет, 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, East Kazakhstan Technical University, Serikbaeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan; ID RSCI: 1137774; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Boris M. ABDEEV, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Architectural and Civil Engineering Department, East Kazakhstan Technical University, Serikbaeva 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.