

УДК 656.9

**РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕГРЕВА И ВОЗГОРАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ****Сачков Игорь Николаевич<sup>1</sup>, Куанышев Валерий Таукенович<sup>2</sup>,  
Кобелев Антон Михайлович<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия<sup>2</sup>Уральский технический институт связи и информатики, г. Екатеринбург, Россия<sup>3</sup>Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия**АННОТАЦИЯ**

Известно, что перегревы электрических контактов являются одной из важнейших причин возникновения пожаров. Традиционный анализ нагрева контакта предусматривает, что его источником является переходное электрическое сопротивление. При этом не рассматривается микроструктура области контакта. Между тем в реальности любой контакт твердых поверхностей осуществляется через посредство отдельных микроконтактов. В предлагаемой работе созданы компьютерные программы, описывающие процессы перегрева микроконтактов электрических контактов. Специализированные программы основаны на использовании метода конечных элементов и реализованы в кодах Фортрана. Рассмотрены идеализированные системы, содержащие регулярно расположенные контактные площадки, в пределах которых выделяется Джоулево тепло. Рассматривается нагрев элементарной ячейки. Используется дискретизация двумерного осесимметричного пространства треугольными симплекс-элементами. Используется прямоугольная расчетная область. Применяются граничные условия первого и второго рода, а также адиабатические границы. Рассматриваются стационарные процессы. Проведенные компьютерные эксперименты показали, что в области микроконтактов температура нагрева превышает средние по поверхности контакта в десятки раз. Обсуждается влияние перегревов на возникновение пожарной опасности. Рассматриваются также процессы возникновения окисной пленки, вызывающей изоляцию отдельных микроконтактов. Предлагается использовать представленные алгоритмы для прогнозирования отказов электрических контактов при построении дерева событий возникновения пожара. Рассматриваются перспективы дальнейшего развития физико-химической модели деградации электрических контактов.

**Ключевые слова:** электрические контакты, возгорание, электрический нагрев, пожар, микроконтакты

**DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAMS FOR PREDICTING OVERHEATING AND FIRE OF ELECTRICAL CONTACTS****Sachkov Igor N.<sup>1</sup>, Kuanyshev Valery T.<sup>2</sup>, Kobelev Anton M.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation<sup>2</sup>Ural Technical Institute of Communications and Informatics, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>3</sup>Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

## ABSTRACT

It is known that overheating of electrical contacts is one of the most important causes of fires. Traditional analysis of contact heating assumes that its source is transient electrical resistance. In this case, the microstructure of the contact area is not considered. Meanwhile, in reality, any contact of solid surfaces is carried out through individual microcontacts. In the proposed work, computer programs have been created that describe the processes of overheating of microcontacts of electrical contacts. Specialized programs are based on the use of the finite element method and are implemented in Fortran codes. Idealized systems containing regularly spaced contact pads within which Joule heat is generated are considered. The heating of a unit cell is considered. Discretization of two-dimensional axisymmetric space by triangular simplex elements is used. A rectangular computational domain is used. Boundary conditions of the first and second kind, as well as adiabatic boundaries, are applied. Stationary processes are considered. Computer experiments have shown that in the area of microcontacts, heating temperatures exceed the average over the contact surface by tens of times. The influence of overheating on the occurrence of fire danger is discussed. The processes of the formation of an oxide film, which causes the isolation of individual microcontacts, are also considered. It is proposed to use the presented algorithms to predict failures of electrical contacts and when constructing a tree of fire events. The prospects for further development of the physicochemical model of degradation of electrical contacts are considered.

**Keywords:** electrical contacts, fire, electrical heating, fire, microcontacts

## Введение

Существующая статистика пожаров свидетельствует, что одной из основных причин возгорания электропроводки является плохой электрический контакт [1–4]. Высокое переходное сопротивление контактной пары является важнейшей причиной нагрева и повышает риск возникновения пожара в жилых помещениях и иных объектах. Математическое моделирование методом графов показало, что нагрев контакта инициирует окисление контактирующих поверхностей и далее приводит к еще большему ухудшению контакта [5].

Прогнозирование вероятности возникновения возгорания, связанного с перегревом электрических контактов, осуществляется путем построения дерева отказов [6–7]. При этом его численная ре-

ализация требует знания вероятности первичного воспламенения контакта. Между тем расчеты тепловых процессов в области контакта затрудняются следующим.

Малоизученными до настоящего времени остаются особенности нагрева микроконтактных точек. Необходимо учитывать, что электрический контакт осуществляется не по всей поверхности, а лишь через конечное число контактных пятен, в свою очередь состоящих из совокупности микроконтактных точек. Как известно [8–10], поверхность твердого тела не может быть абсолютно гладкой, и если контакты выполнены из идеально твердого материала, то соприкосновение происходит не более чем в трех точках. В реальности материал подвержен деформации, при этом точки сплющиваются и становятся маленькими поверхностями. Кроме того, необходимо учитывать, что

реальной поверхности твердого тела вообще присуще наличие неровностей. Даже скол по плоскости спайности любого монокристалла имеет выступы и впадины размерами до десятков и сотен ангстрем. Это могут быть ступеньки роста, точки выхода дислокаций и другие нарушения кристаллического строения. Поликристаллические же твердые тела характеризуются значительно большей неровностью рельефа.

Рис. 1 иллюстрирует особенности профиля поверхности контактного элемента. На схеме видны два типа неровностей: «волны» и «микровыступы». Эти микронеровности поверхности металла характеризуются следующими параметрами: высотой волны, имеющей размер  $H_1$  от 20 до 40 мкм, и шагом волны  $L_1$  от 10 до 200 мкм [9–10]. На волну накладываются выступы, характеризующиеся параметрами  $H_2$  и  $L_2$  менее 1 мкм.

При формировании как механического, так и электрического контакта, как правило, не может произойти такое сближение, при котором атомы одной поверхности соединяются с атомами другой,

образуя единое целое для прохождения тока. Основная причина этого состоит в том, что поверхности металлов, даже тщательно обработанные, имеют шероховатости, размер которых значительно превышает размер молекул и атомов металлов, а также в том, что в результате воздействия окружающей среды они никогда не бывают абсолютно чистыми. На поверхностях адсорбируются молекулы кислорода и других газов, металлы вступают во взаимодействие с газами окружающей среды (кислородом, парами воды, сернистыми газами) [11]. Таким образом, для возникновения электрического контакта необходимы продавливание адсорбированной пленки и взаимная деформация сближающихся выступов. При этом возникают микроконтакты, группы которых составляют пятна касания. На рис. 2 изображено формирование подобного микроконтакта (черная жирная линия). Его площадь тем выше, чем больше прижимающее усилие. При возникновении подобного пятна происходит стягивание и резкая концентрация линий электрического тока.

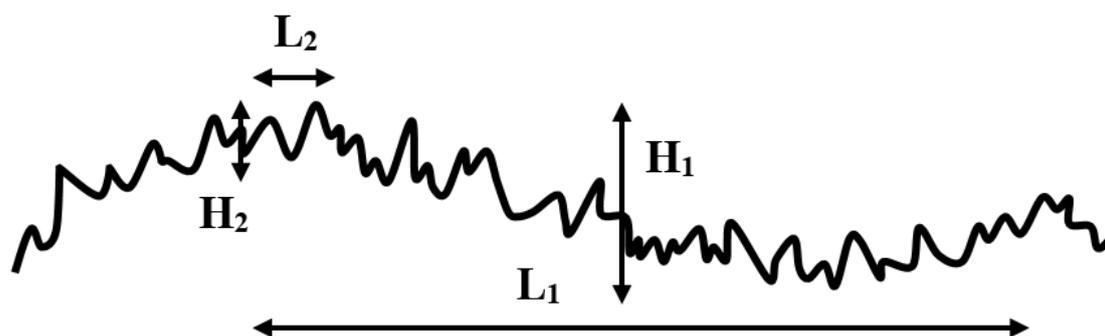
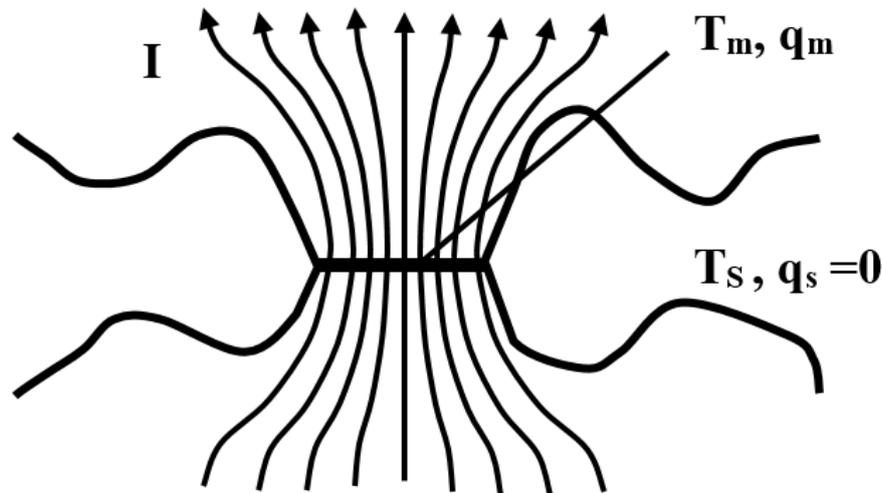


Рис. 1. Схема типичного профиля поверхности металла

Fig. 1. Diagram of a typical metal surface profile



**Рис. 2.** Формирование микроконтакта: стрелки указывают направление линий электрического тока, черная линия – область металлического контакта

**Rice. 2.** Formation of a microcontact: the arrows indicate the direction of the electric current lines, the black line is the area of the metal contact

Здесь  $T_m$  и  $T_s$  – температура микроконтакта и средняя температура контактной поверхности, соответственно,  $q$  – плотность выделения Джоулева тепла,  $I$  – электрический ток.

Поверхность металлического контакта является главным источником электрического сопротивления всего контакта. При этом величиной контактного сопротивления можно считать сопротивление стягивания  $R_{\text{конт}}$ , которое является следствием стягивания (сужения) линий тока к маленькому проводящему пятну контакта. Области стягивания имеются на обоих контактных элементах. Р. Хольмом [8] впервые было установлено, что величина сопротивления стягивания равна.

$$R = \frac{\rho}{2a'}, \quad (1)$$

где  $a$  – радиус площадки контактирования;  $\rho$  – удельное сопротивление материала.

Анализ результатов существующих исследований, посвященных тепловым процессам в электрических контактах, показывает, что до настоящего времени остаются неизвестными пространственные распределения температуры в области

микроконтакта, а также значения температуры максимального локального перегрева  $T_m$ .

Известно, что электрический ток значительно концентрируется в области микроконтакта, характеризуемого температурой  $T_m$  (рис. 2). Сгущение линий тока приводит к формированию переходного электрического сопротивления [8, 12]. Кроме того, оказывается, что температура микроконтакта  $T_m$  значительно выше средней температуры поверхности контакта  $T_0$ .

Анализ существующей литературы показал, что до настоящего времени остаются недостаточно изученными характер распределения температуры по поверхности контакта и значения соотношения  $T_m/T_0$ . Между тем распределения температур являются важнейшим фактором деградации электрического контакта и, соответственно, его пожароопасности в течение всего срока службы. Цель настоящей работы состоит в создании компьютерных методик, позволяющих устанавливать обсуждаемые распределения температуры в области микроконтакта.

### Методика расчетов

Рассмотрим контактную пару, характеризующую в сечении простейшей прямоугольной формой, схема которой представлена на рис. 3 (а).

Известно, что основное электрическое сопротивление контактов создается поверхностью контакта, образуя «переходное электрическое сопротивление». Учтем, что оно оказывается основным источником нагрева электрического контакта,  $T_m \gg T_c$  (рис. 3 (б)). Между тем особенности температурного поля на микроуровне остаются до настоящего времени недостаточно изученными. Неизвестными оказываются также и особенности распределения в области микроконтактов, в направлении, перпендикулярном направлению невозмущенного тока.

С целью выявления основных закономерностей обсуждаемого процесса осуществим следующую идеализацию проводящей системы.

1. Прежде всего положим, что микроконтакты имеют форму круглых площадок  $S_m$ , плоскости которых параллельны рабочей плоскости  $S$ .

2. Контактные области охарактеризуем одинаковым радиусом  $R_m$ .

3. Считаем, что центры микроконтактов расположены регулярно, образуя на поверхности  $S$  узлы гексагональной плотно упакованной решетки, с периодом  $L_c$ .

На рис. 4 (а) изображена схема части контактной поверхности для подобной идеализированной системы. Пунктирными линиями представлены границы гексагональных элементарных ячеек, совокупность которых образует рассматриваемое контактное тело. Микроконтакты выделены на рис. 4 серым цветом.

4. Заменяем далее шестигранные призмы цилиндрическими областями радиусом  $R_c$  (рис. 4 (б)), учитывая условие равенства объемов шестигранной и цилиндрической ячеек.

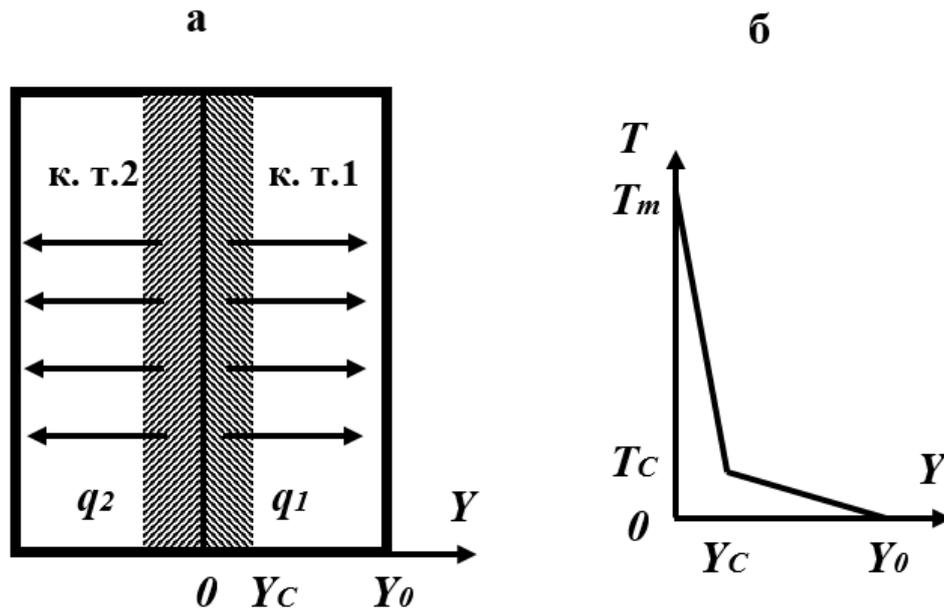
Далее введем цилиндрическую систему координат  $(r, y)$ , расположив ее начало в центре микроконтактной площадки (рис. 4 (б)).

5. Учтем, что Джоулево тепло, характеризующее плотностью  $q_m$ , выделяется в заштрихованной области радиусом  $R_m$  (рис. 5) и распространяется далее по объему рассматриваемого цилиндра.

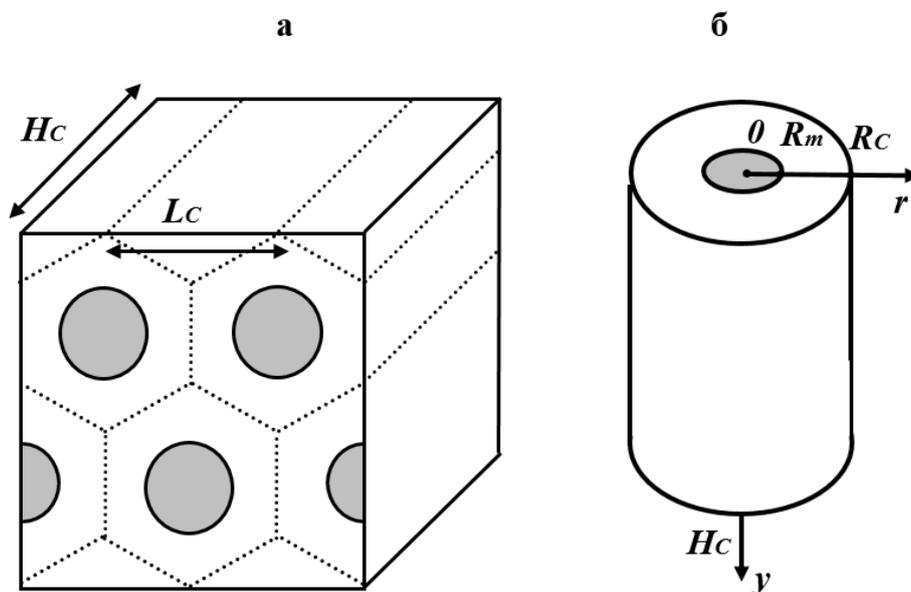
Установим граничные условия в соответствии с рис. 5. Линия, выделенная черным цветом ( $y = 0, 0 \leq r \leq R_m$ ), соответствует ГУ 2-го рода,  $q = q_m$ . Серая линия,  $y = H_c$ , устанавливает ГУ 1-го рода,  $T = T_c$ . Пунктир отвечает условию равенства нулю потоку через границу, то есть условию зеркальной симметрии и адиабатичности,  $q = 0$ .

В принятой модели поток тепла создается микроконтактной площадкой и распространяется в глубину контактного тела, имеющего температуру  $T_c$ . То есть рассматриваются ситуации, при которых размер микровыступа много меньше толщины контактного тела.

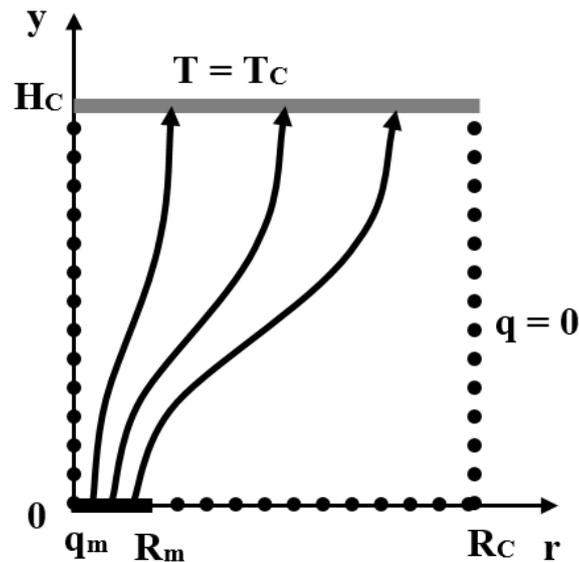
Для расчета распределения температуры в пределах пространства  $(r, y)$  и ее величины  $T_m$  в центре микроконтакта (при  $r = 0, y = 0$ ) применим метод конечных элементов (МКЭ) с дискретизацией пространства треугольными в сечении симплекс-элементами. Описываемый алгоритм был реализован в форме компьютерной программы в кодах Фортран. Подробное описание подобной программы было представлено ранее [13].



**Рис. 3** Схема соединения двух контактных тел (а) и традиционно принятая схема изменения температуры, (б); заштрихованы области формирования переходного сопротивления,  $q$  – плотности потоков тепла,  $T$  – отклонение температуры от среднего  
**Rice. 3** Connection diagram of two contact bodies (a) and the traditionally accepted temperature change diagram, (b); the areas of transition resistance formation are shaded,  $q$  - the heat flux density,  $T$  - the temperature deviation from the average



**Рис. 4** Схема идеализации системы; а – регулярное расположение микроконтактов, б – схема цилиндрической расчетной области.  
**Rice. 4** System idealization scheme; a – regular arrangement of microcontacts, b – diagram of a cylindrical computational domain



**Рис. 5.** Схема граничных условий расчетной области и линий распространения тепла.  
**Rice. 5.** Scheme of boundary conditions of the computational domain and heat propagation lines

**Результаты и их обсуждение**

Описываемый алгоритм был реализован в форме программы на языке Фортран для ЭВМ, типа IBM PC. С ее помощью был проведен компьютерный эксперимент по исследованию геометрических особенностей температурных полей, реализующихся в окрестностях микроконтактов. Как правило, использовались сетки разбиений плотностью 200×200 элементов. Погрешности расчетов значений температуры оценивались с помощью методик, представленных подробно в [14]. При этом во внимание принимались лишь те результаты, относительная погрешность которых не превышала 2 %.

Учтем, что в идеальном случае «полного» теплового контакта зависимости температуры контактных тел описываются линейными зависимостями, рис. 3 (б). Охарактеризуем отклонения от величины нагрева параметром  $\theta = T/T_c$  и перейдем к безразмерной координате:

$$\rho = \frac{2r}{L_c}, \tag{2}$$

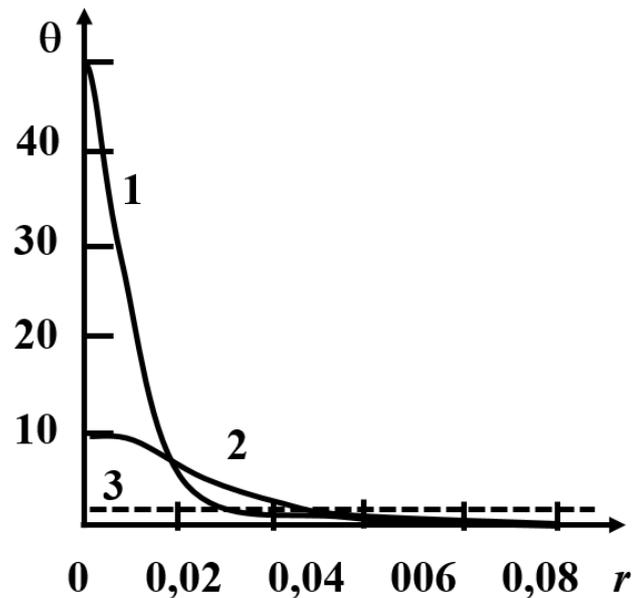
где  $L_c$  – среднее расстояние между центрами микроконтактов.

На рис. 6 представлены характерные зависимости  $\vartheta(\rho)$  для варьируемых значений относительного радиуса контактной площадки  $\rho_m$ .

Следует отметить, что установленные графики зависимостей  $\vartheta(\rho)$  имеют форму, подобную гауссовой, амплитуда которой равна  $\vartheta_m$ , а дисперсия  $\rho_m$  близка к радиусу микроконтакта. Ход кривой представляет интерес для последующих расчетов механических напряжений. Однако подробный анализ их характера и применимости гауссовой аппроксимации выходят за рамки настоящей работы.

Распределения температуры в направлении оси  $y$ , то есть «в глубину» контактного тела, оказались подобными рассмотренным выше «поверхностным». Анализировались также рассчитанные зависимости контактных сопротивлений от размера микроконтакта. Полученные результаты находятся в согласии с формулой Холла.

Рассмотрим ниже возможные следствия, возникающие при анализе полученных результатов.



**Рис. 6.** Зависимости относительных перегревов от безразмерного расстояния до центра соседнего микроконтакта: 1, 2 – соответствуют относительным радиусам 0,05 и 0,1, соответственно; пунктир 3 – идеальный контакт

**Rice. 6.** Dependences of relative overheating on the dimensionless distance to the center of the adjacent microcontact: 1, 2 – correspond to relative radii of 0.05 and 0.1, respectively; dotted line 3 – perfect contact

В ряде предшествующих работ, представленных во введении настоящей работы, было показано, что одним из источников пожароопасности является высокое переходное сопротивление в области соединения двух проводников. В связи с тем что переходное сопротивление оказывается много больше, нежели сопротивление проводников, в области контакта формируется концентрация выделяющейся мощности Джоулева тепла. Было установлено, что перегрев контактной области приводит к окислению контактной поверхности [6]. В цитируемой работе было показано также, что процесс окисления может приводить к ухудшению электрического контакта и возникновению искрения.

Представленные выше компьютерные алгоритмы и программы, полученные нами, могут быть использованы для более корректного прогнозирования пожароопасных ситуаций, связанных с перегревами электрических контактов. В отличие от предшествующих работ, применение

компьютерного моделирования позволило обнаружить существование существенного, в десятки раз, перегрева микроконтактных точек.

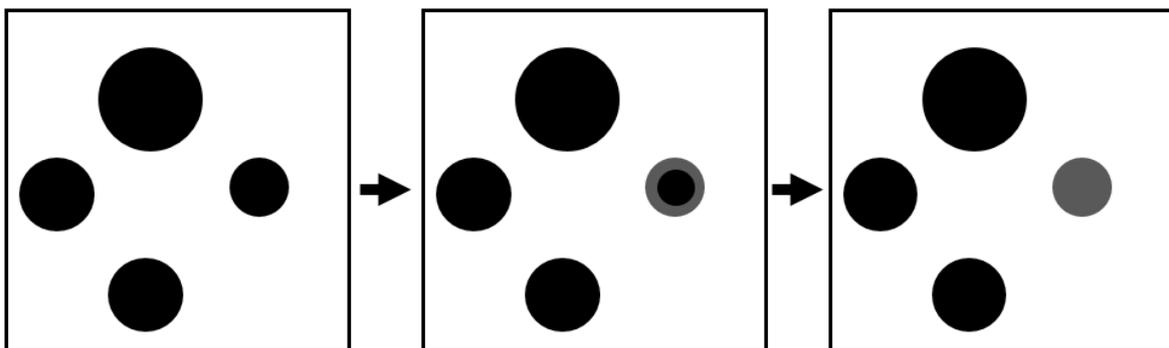
Следует отметить необходимость дальнейшего развития компьютерных программ, описывающих процессы деградации электрических контактов. Применение представленных выше компьютерных технологий расширяет перспективы анализа процессов перегрева электрических контактов. В частности, возникают новые возможности прогнозирования сценариев отказов, связанных с окислением неравномерно нагретых поверхностей. Представленные в настоящей работе методы расчета температурных полей позволяют получать данные для описания процессов диффузии кислорода и формирования окислов в окрестностях микроконтактных точек. Появляется возможность корректно учитывать экспоненциальные зависимости скоростей окисления от температуры среды. По мнению авторов, представляет

значительный интерес исследование возможности существования синергетических механизмов, обуславливающих лавинообразное развитие процесса деградации электрических контактов [11]. Подобные процессы рассматривались в предшествующей работе [13], в которой методом компьютерного моделирования на основе МКЭ было обнаружено, что электрический пробой увлажненной поверхности может протекать, как синергетический процесс с обострением.

Следует также отметить, что в предложенной нами статье рассматривались регулярные структуры микроконтактов, имеющих одинаковые радиусы (рис. 4). Между тем реальные системы характеризуются хаотичным распределением расположения и размеров контактов. Проведенные в настоящей работе исследования поз-

воляют сделать предположения о некоторых закономерностях процессов окисления более реальных систем. Рис. 7 иллюстрирует одну из особенностей динамики окисления пятна касания, состоящего из набора микроконтактов различного размера. Черным цветом на рис. 7 обозначена металлическая фаза, серым – окисленная. Стрелки показывают возможные этапы эволюции системы по мере времени эксплуатации. Можно предположить, что существуют такие режимы эксплуатации, при которых окисление начинается с наименьших по размеру площадок и осуществляется в виде роста кольцеобразных структур.

Таким образом, предполагается дальнейшее развитие представленных выше компьютерных алгоритмов и программ.



**Рис. 7.** Схема расположения контактных областей и их окисления: черный цвет – проводящая фаза; серый – окисная пленка, белый фон – не вступившая в контакт поверхность

**Rice. 7.** Scheme of the location of contact areas and their oxidation: black color – conducting phase, gray – oxide film; white background – surface that has not come into contact

### Выводы

Предлагаются для дальнейшего использования специализированные компьютерные программы на основе МКЭ, предназначенные для прогнозирования локальных перегревов электрических контактов.

Методом компьютерного эксперимента показано, что одним из существен-

ных механизмов деградации электрических контактов является окисление микроконтактов, вызываемое их существенным, в десятки раз, перегревом.

Возможно дальнейшее развитие разработанных в настоящей работе компьютерных методик для оценок вероятного времени возникновения отказов.

Предлагается использовать разработанные компьютерные программы при

построении дерева событий возгорания, связанного с перегревом контактов.

При анализе процессов деградации электрических контактов необходимо учи-

тывать возможность реализации синергетического процесса, протекающего лавинообразно, в режиме с обострением, подобном рассмотренному в работе [13].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харламенков А. С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30 (6). С. 108–113.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник. М., 2021. 112 с.
3. Веревкин В. Н., Смелков Г. И. Пожарная опасность электрических контактов и контактных соединений. М., 2009. 140 с.
4. Боков Г. В., Клепикова Т. Н. Снижение пожарной опасности электрических сетей многоэтажных жилых и общественных зданий // Пожарная безопасность. 2006. № 1. С. 60–64.
5. Моторыгин Ю. Д. Моделирование пожароопасных режимов в электросети автомобилей для принятия решения при проведении пожарно-технической экспертизы // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25 (9). С. 45–51.
6. Мельников В. С. Пожарная безопасность электроустановок, алгоритм зажигания // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). С. 1–11.
7. Безопасность жизнедеятельности / С. В. Белов и др. М., 2001. 487 с.
8. Хольм Р. Электрические контакты. М., 1961. 425 с.
9. Крагельский И. В. Трение и износ. М., 1968. 480 с.
10. Демкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М., 1970. 334 с.
11. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. М., 1972. 216 с.
12. Харламенков А. С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 2 // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31 (1). С. 99–104.
13. Влияние синергетического механизма поверхностного межкапельного пробоя на риск электротравматизма / И. Н. Сачков и др. // Техносферная безопасность. 2019. № 2 (23). С. 33–41.
14. Сачков И. Н. Влияние формы включений на проводимость двумерных регулярных матричных систем // Журнал технической физики. 1996. Т. 66 (12). С. 48–58.

#### REFERENCES

1. Kharlamenkov A.S. Fire hazard of high transient resistances. From theory to practice. Part 1. Fire and explosion safety. 2021; 30(6):108–113. (rus).
2. Fires and fire safety in 2020. Statistical collection. Moscow, 2021; 112 p. (rus).
3. Verevkin V.N., Smelkov G.I. Fire danger of electrical contacts and contact connections. Moscow, 2009; 140. (rus).
4. Bokov G.V., Klepikova T.N. Reducing the fire hazard of electrical networks of multi-storey residential and public buildings. Fire safety. 2006; 1: 60–64. (rus).
5. Motorygin Yu. D. Modeling of fire hazardous conditions in the electrical network of cars for decision-making during fire-technical examination. Fire and explosion safety. 2016; 25 (9): 45–51. (rus).
6. Melnikov V.S. Fire safety of electrical installations, ignition algorithm. International scientific research journal. 2023; 1(127):1–11. (rus).
7. Belov S.V., Ilnitskaya A.V., Kozyakov A.F. and others. Life safety. Moscow, 2001; 487. (rus).
8. Holm R. Electrical contacts. Moscow, 1961; 425. (rus).
9. Kragelsky I.V. Friction and wear. Moscow, 1968. 480. (rus).
10. Demkin N.B. Contacting rough surfaces. Moscow, 1970; 334. (rus).
11. Levin A.P. Contacts of electrical connectors of radio-electronic equipment. Moscow, 1972; 216. (rus).
12. Kharlamenkov A.S. Fire hazard of high transient resistances. From theory to practice. Part 2. Fire and explosion safety. 2022; 31 (1):99–104. (rus).
13. Sachkov I.N., Kuanyshv V.T., Schneider A.V. Influence of the synergistic mechanism of surface interdroplet breakdown on the risk of electrical injuries. Technosphere safety. 2019; 2(23):33–41. (rus).
14. Sachkov I.N. Influence of the shape of inclusions on the conductivity of two-dimensional regular matrix systems. Journal. technical physics. 1996; 66 (12):48–58. (rus).

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-29-00411.

### Информация об авторах

**Сачков Игорь Николаевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры анализа систем и принятия решений, Уральский федеральный университет, Россия, 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; РИНЦ ID: 20328; Scopus Author ID: 6602115669; ResearcherID: -; ORCID: 0000-0003-2265-5860; e-mail: [i.n.sachkov@urfu.ru](mailto:i.n.sachkov@urfu.ru)

**Куанышев Валерий Таукенович**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и физики, Уральский технический институт связи и информатики, Россия, 620109, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15; РИНЦ ID: 118889; Scopus Author ID: 6506316875; ResearcherID: -; ORCID: -; e-mail: [kvt@urtisi.ru](mailto:kvt@urtisi.ru)

**Кобелев Антон Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем противопожарной защиты, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 5626-9389; Scopus Author ID: 57195103986; ResearcherID: AAC-1118-2021; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: [antonkobelev85@mail.ru](mailto:antonkobelev85@mail.ru)

### Information about the authors

**Igor N. Sachkov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Systems Analysis and Decision Making, Ural Federal University, st. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; RSCI ID: 20328; Scopus Author ID: 6602115669; ResearcherID: -; ORCID: 0000-0003-2265-5860; e-mail: [i.n.sachkov@urfu.ru](mailto:i.n.sachkov@urfu.ru)

**Valery T. Kuanyshev**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ural Technical Institute of Communications and Informatics, st. Repina, 15, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; RSCI ID: 118889; Scopus Author ID: 6506316875; ResearcherID: -; ORCID: -; e-mail: [kvt@urtisi.ru](mailto:kvt@urtisi.ru)

**Anton M. Kobelev**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Fire Protection Systems, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 5626-9389; Scopus Author ID: 57195103986; ResearcherID: AAC-1118-2021; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: [antonkobelev85@mail.ru](mailto:antonkobelev85@mail.ru)