

УДК: 621.315.6

schnayder@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ПОВЕРХНОСТНОГО
МЕЖКАПЕЛЬНОГО ПРОБОЯ НА РИСК ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМА****THE EFFECT OF A SYNERGISTIC MECHANISM BETWEEN
SURFACE-DROPLET BREAKDOWN THE RISK OF ELECTRICAL INJURIES**

*Сачков И.Н., доктор физико-математических наук, профессор,
Чистяков М.А.,
Уральский федеральный университет
им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург,
Куанышев В.Т., кандидат физико-математических наук, доцент,
Уральский технический институт связи и информатики,
Уральский институт ГПС МЧС России Екатеринбург,
Шнайдер А.В., кандидат технических наук, доцент,
Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург*

*Sachkov I.N., Chistykov M.A.,
Federal State Autonomous Educational Institution
of Higher Education, Yekaterinburg,
Kuanishev V. T.,
Ural Technical Institute of Communications and Informatics,
The Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry
of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg,
Schneider A.V.,
The Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry
of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg*

Рассматривается электрический пробой увлажненной поверхности. С помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов исследованы эффекты концентрации электрического поля каплями воды, расположенными на поверхности изолятора. Обнаружена возможность возникновения самоорганизующегося проводящего кластера частиц, инициирующего пробой.

Ключевые слова: электрический пробой, электротравматизм, синергетика, концентратор напряжений, дерево причин отказов

The electric breakdown of the moistened surface is considered. The effects of the concentration of the electric field by water droplets located on the surface of the insulator are investigated using computer simulation by the finite element method. The possibility of a self-organizing conducting cluster of particles initiating a breakdown has been found.

Keywords: electric breakdown, electric shock injuries, a synergy, a hub of voltages, fault tree, failure.

Введение

Известно, что важнейшая особенность электротравматизма – высокая тяжесть последствий [1-2]. Число смертельных электротравм на производстве составляет 20–40 % от общего числа всех

несчастных случаев со смертельным исходом. Одним из существенных источников опасности является пробой изолятора, в частности пробой, развивающийся по увлажненной поверхности.

При оценке его опасности учитывается, что существует механизм «самоочищения», который заключается в следующем. Под действием высокого напряжения по увлажненному проводящему слою протекает ток утечки [3-5], который приводит к разогреву электролита и, постепенно, к испарению влаги. В результате образуются подсушенные зоны, имеющие «конфигурацию узких лент, располагающихся перпендикулярно линиям тока» [3]. В процессе эксплуатации ширина подсушенных зон быстро возрастает в направлении, элемента перпендикулярном линиям тока [3]. Таким образом, в результате действия описываемого механизма удается избежать технических отказов. Покажем в настоящей работе, что это, однако, не устраняет опасность кратковременных пробоев, способных создать ненулевую вероятность поражения персонала электрическим током.

Рассмотрим ситуацию, при которой к увлажненной поверхности изолятора приложено электрическое напряжение, характеризующееся значением напряженности, многократно меньшим пробивного значения, соответствующего сухой поверхности. Учтем следующие особенности формирования увлажнения путем конденсации атмосферной влаги. Как правило, увлажненная поверхность покрыта рядом капель, расстояния между которыми случайным образом меняются. При этом будем считать, что концентрация капель еще далека от порога протекания для электрического тока. Учтем, что диэлектрическая проницаемость воды аномально велика, равна примерно 80,5 [6], то есть значительно превышает таковую для воздуха. В этих условиях можно ожидать, что капли воды существенно искажают картину исходного однородного электрического поля. При подобных обстоятельствах должны реализовываться эффекты заметной концентрации напряженности электрического поля вблизи поверхности капель. Ранее подобный же эффект концентрации термических напряжений на поверхности включений

оказывался существенным для оценок термической прочности двухфазных материалов [7].

Выясним, при каких условиях эффект концентрации напряженности электрического поля приведет к межкапельному электрическому пробое.

Методика расчетов

Ограничимся рассмотрением стационарных двумерных плоско-симметричных картин распределения электрического поля. Рассчитаем распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности диэлектрика, покрытого круглыми участками (каплями) воды. С этой целью целесообразно применить подход, основанный на использовании метода конечных элементов. Ранее он был использован для расчета закономерностей ряда явлений: течения электрического тока в композиционных резистивных материалах [8], переноса продуктов деления в твэлах ядерных реакторов [9], синергетических процессов при десорбции опасных веществ из пористых материалов [10] и ряда других [11].

Выделим в рассматриваемой системе элементарную прямоугольную ячейку, изображенную на рис. 1, содержащую круглые области варьируемых размеров и положения, имитирующие капли воды. Диэлектрическую проницаемость матрицы считаем равной $\epsilon_0 = 1$, а каплю $\epsilon_i = 80,5$. Кроме того, учтем наличие областей пробоя, которые представим в виде вытянутых прямоугольников с высокой диэлектрической проницаемостью. Введем систему декартовых координат X, Y . Рассчитаем распределение электрического потенциала $\varphi(X, Y)$ и, соответственно напряженности электрического поля $E(X, Y) = \text{grad } \varphi(X, Y)$. С этой целью используем вариационную формулировку процесса переноса, согласно которой искомое распределение потенциала определяется экстремумом функционала [12]:

$$\chi = \int_{S_c} \epsilon (\text{grad } \varphi)^2 dS. \quad (1)$$

Учтем наличие граничных условий. При $Y = Y_0$ и $Y = 0$ примем условие изопотенциальности, $\varphi = \varphi_1$ и φ_2 соответственно. При $X = 0$ и $X = X_0$ – примем условие адиабатичности, то есть

$\partial\varphi/\partial X = 0$. Разобьем расчетную область треугольными симплекс-элементами [12]. Сетку разбиений адаптируем к границам включений [7, 8].

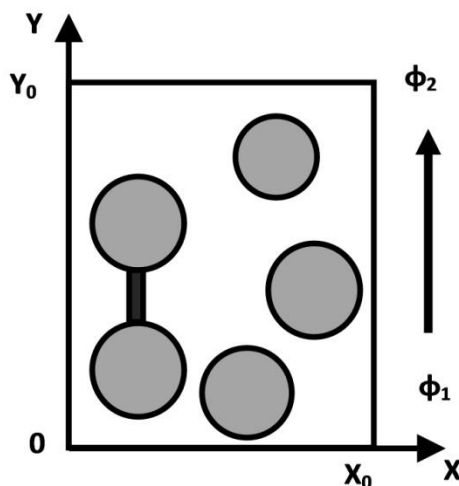


Рисунок 1. Схема расчетной области, серый цвет – капли, черный прямоугольник – область пробоя, стрелка – направление невозмущенного электрического поля E_0

Условия минимума функционала χ (1) позволяют с помощью метода конечных элементов стандартным образом установить узловые значения потенциала во всех точках расчетной области и, соответственно, величины градиентов потенциала $\text{grad}(\varphi)$. Для решения подобной задачи в настоящей работе была создана программа ЭВМ на языке Фортран и проведена серия компьютерных экспериментов, подобная описанным ранее [7-11].

Результаты компьютерного эксперимента

В процессе расчетов анализировались картины пространственных распределений напряженности $E(X, Y)$ в зависимости от взаимного расположения капель и в результате действия «мостиков», возникающих вследствие межкапельных пробоев. Систематизация результатов расчетов привела к выводу, что в определенных точках рассматриваемой среды формируются области как с повышенным, так и с пониженным значением напряженности электрического поля.

Охарактеризуем степень возмущения поля безразмерным параметром $k = E/E_0$, равным отношению значения локальной напряженности к ее невозмущенной величине. Обнаруженные закономерности характеризует рис. 2.

Конфигурация «а» соответствует одиночной капле, находящейся достаточно далеко от соседних. Локальная ось u на рис. 2а ориентирована параллельно внешнему полю и проходит через центр капли. Величина L равна диаметру капли d .

Обнаружено, что в рассматриваемых условиях внутри капель напряженность пренебрежимо мала, составляет величину $k \approx 0,03$. Напряженность на границе капли резко возрастает. При этом максимальные значения напряженности концентрируются в точках пересечения поверхности капли локальной осью u , параллельной направлению внешнего поля и проходящей через центр капли (см. рис. 2а). Максимальное значение параметра концентрации составляет $k_m = 2,00 \pm 0,02$. По мере удаления от по-

верхности включения, k меняется по экспоненциальному закону, стремясь к величине $k=1$, характерному для невозмущенной области поля:

$$k = 1 + (1,00 \pm 0,02) \cdot \exp[-(1,0 \pm 0,1)\Delta y / L], \quad (2)$$

где Δy – удаление от капли в направлении y , L – размер (диаметр) капли. Таким образом, значение $k_m = 2,00$ не зависит от размера капли, а размер возмущенной области пропорционален ее диаметру.

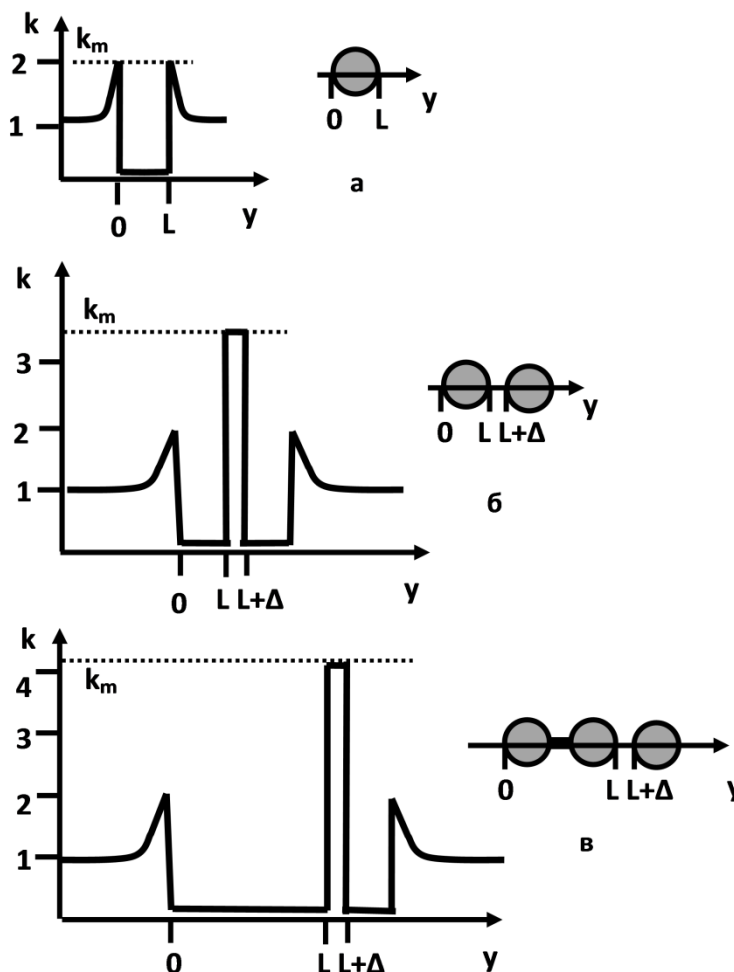


Рисунок 2. Схемы изменения коэффициента концентрации электрического поля k вдоль локальных осей y

Наличие соседней капли иллюстрирует рис. 2б, на нем Δ – расстояние между каплями. Здесь и далее предполагается, что частицы имеют одинаковый размер. Можно видеть, что в промежутке между каплями происходит концентрация напряженности. Расчеты показали, что величина k_m монотонно растет при уменьшении расстояния между каплями Δ . При этом в определенных пределах наблюдается гиперболическая зависимость $k_m(\Delta)$. Значение k_m зависит также

от взаимного расположения капель, принимая максимальное значение при соосном их расположении относительно внешнего поля. Отклонение от соосности приводит к уменьшению эффекта концентрации напряженности. Следует также отметить, что на «наружных» поверхностях обеих капель ($y=0$) также происходит увеличение концентрации напряженности. При этом его изменение пропорционально общей длине группы частиц $2L$, в соответствии с формулой (2).

Отметим, что уменьшение расстояния между двумя частицами может привести к ситуации, когда локальное значение напряженности электрического поля между ними окажется выше пробивного напряжения. В результате делается возможным электрический пробой и возникновение единого кластера, состоящего из двух электрически связанных капель. Рис. 3в иллюстрирует ситуацию возникновения подобной конфигурации.

Далее получается, что если вблизи возникшего кластера двух частиц окажется третья частица (рис. 3в), то это приведет к дальнейшему росту коэффициента концентрации в промежутке кластера с третьей частицей. При этом возрастет вероятность нового пробоя и разрастания проводящего кластера.

Систематизация результатов расчетов для ситуации, когда частицы располагаются соосно в направлении невозмущенного электрического поля, то есть вдоль оси Y , привела к следующему выводу. Управляющим фактором для процесса обсуждаемого синергетического роста проводящего кластера является величина L/Δ , где L – текущая длина кластера в направлении внешнего поля (то

есть оси Y), Δ – расстояние между кластером и новой частицей. На рис. 3 представлены результаты расчетов зависимости величины максимального коэффициента концентрации k_m от относительной длины многочастичного кластера L/Δ . Приведены данные для различных значений диэлектрической проницаемости. При этом значению $\epsilon_0=1$ соответствует воздух, а величине $\epsilon_0 = 500$ – металлизированные частицы.

Установлено, что в обсуждаемых условиях зависимости $k_m(L/\Delta)$ с точностью 10 % являются линейными. Величина коэффициента концентрации электрического поля k_m резко зависит от значения диэлектрической проницаемости лишь при ее изменении от 1 до 50. При больших же значениях ϵ_i – эффект концентрации стабилизируется. Можно видеть также, что рост L , характеризующей длину проводящего кластера, увеличивает, по гиперболическому закону размер области Δ , в которой возможно присоединение новой частицы. Таким образом, процесс роста кластера можно отнести к синергетическому процессу с обострением.

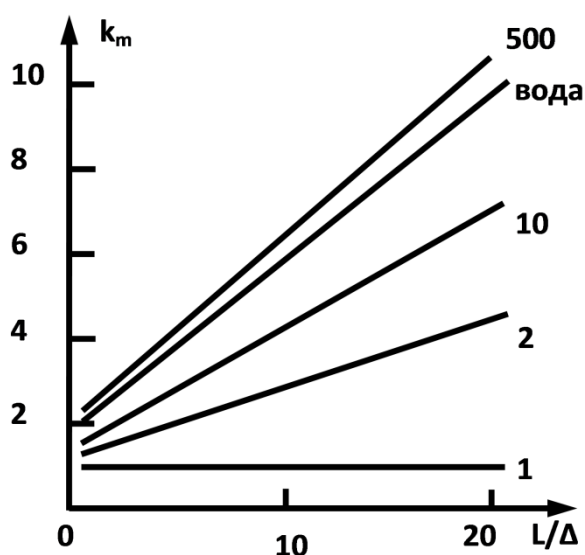


Рисунок 3. Зависимость коэффициента концентрации k_m от длины кластера L и расстояния до новой частицы Δ , цифры у кривых – значения диэлектрической проницаемости капель

На величину эффекта концентрации влияют также и отклонения положения частиц от их взаимной соосности. Охарактеризуем отклонение параметром несоосности γ , смысл которого иллюстрируется вставкой к рисунку 4. На нем представлена схема геометрических факторов, определяющих взаимодействия

кластера из двух капель с одиночной частицей. Можно сделать вывод, что пробой возможен лишь для группировок частиц, располагающихся достаточно близко к общей оси, параллельной направлению невозмущенного электрического поля.

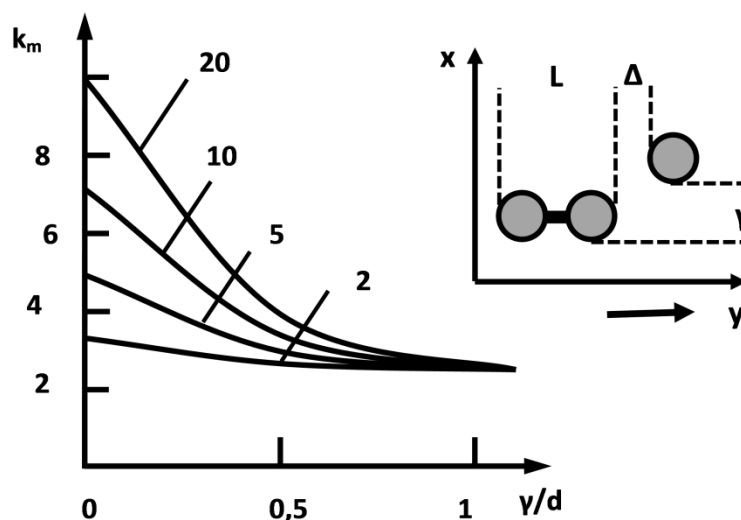


Рисунок 4. Зависимость коэффициента концентрации от параметра несоосности γ , цифры у кривых – значения параметра (L/Δ) , d – диаметр одиночной капли; врезка иллюстрирует смысл геометрических параметров, ось y и стрелка – направление невозмущенного поля

Обсуждение

Рассмотрим ситуацию, при которой невозмущенное значение напряженности электрического поля E_0 выбрано много меньшим пробивного E_C . Однако в случае хаотического расположения капель, существует не равная нулю вероятность W_1 , что найдется пара капель, расположенных достаточно близко друг к другу и достаточно соосно, так что концентрация напряженности электрического поля между ними приведет к условию $k_m > E_0/E_C$. При этом локальное значение $E = k_m E_0$ окажется больше пробивного E_C .

Используя данные рис. 3 и 4, можно следующим образом оценить вероятность роста кластера. В частности, если принять, для определенности, что пробивное напряжение в четыре раза меньше приложенного невозмущенного, то можно заключить, что пробой возможен для

двух частиц, расположенных на расстоянии Δ_1 , меньшем $0,1$ их диаметра d при условии, что несоосность не превысит величину $0,25d$. Исходя из условия хаотичности расположения частиц можно оценить вероятность W_1 их попадания в указанный интервал Δ и γ . Расчет вероятности иллюстрирует рис. 5. На нем изображено фазовое пространство, координатами которого служат параметры Δ и γ . Заштрихована область значений параметров, при которых $k_m > 4$. Теперь вероятность процесса образования кластера из двух частиц W_1 можно охарактеризовать отношением площадей заштрихованного криволинейного треугольника к общей площади фазового пространства.

На следующей стадии рассматриваемого процесса существует не равная нулю вероятность W_2 существования частицы, расположенной соосно кластеру на расстоянии, не превышающем величину

ну Δ_2 . В рассматриваемых условиях, с точностью 10 %, $\Delta_2 = 2 \Delta_1$. Можно видеть, что площадь нового треугольника увеличилась примерно в 2 раза, то есть $W_2 \approx 2 W_1$. Общая же вероятность возникновения трехчастичного кластера равна произведению $W_{C2} = W_1 W_2$. Продолжая рассмотрение, можно предполо-

жить, что пробой, захватывающий N капель, характеризуется вероятностью $W_{CN} \approx (2 W_1)^N$.

Пробой поверхности изолятора произойдет, когда проводящий кластер сделается проникающим, то есть N превысит критическое значение.

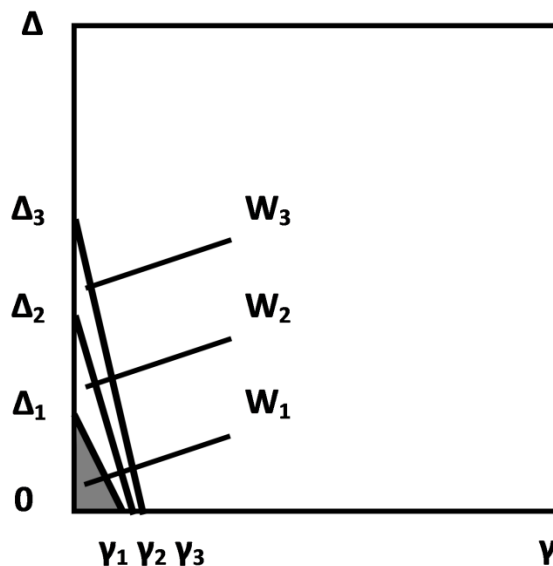


Рисунок 5. Схема расчета вероятностей W_i роста проводящего кластера

Рассматриваемый процесс может прекратиться в результате испарения какой-либо из капель цепочки, благодаря концентрации выделения Джоулева тепла.

Приведенное выше рассмотрение межкапельного пробоя носит качественный характер. Более корректный количественный анализ вероятности пробоя W_{CN} требует применения метода Монте-Карло и компьютерного моделирования схем дерева отказов [13]. Мы предполагаем провести их в последующих наших работах.

Следует также отметить, что представленные результаты носят идеализированный характер, поскольку нами не учитывались особенности развития газового разряда и нестационарные особенности движения носителей тока между каплями. Тем не менее, по нашему мнению, при построении дерева причин опасностей поражения электрическим током необходимо учитывать возможность

описанных выше кратковременных маловероятных поверхностных пробоев.

Обсуждавшийся в статье синергетический механизм межкапельного пробоя может реализоваться также и в иных явлениях, в частности при возникновении атмосферных разрядов в верхних слоях атмосферы, обнаруженных недавно НИИ ядерной физики МГУ [14]. Интересно также выяснить, не связано ли возникновение кратковременных атмосферных разрядов с возникновением кратковременных пробоев между частичками льда, иницируемых ультрафиолетовым излучением, возникающим при обсуждаемых пробоях.

Выводы

1. Капли воды, расположенные на поверхности увлажненного электрического изолятора, являются концентраторами напряженности электрического поля.

2. Наиболее существенно эффект концентрации напряженности проявляется в пространстве между каплями.

3. Межкапельный пробой может инициировать дальнейший самоорганизующийся рост проводящего кластера частиц.

4. Перспективными являются дальнейшие исследования закономерностей поверхностных межкапельных пробоев с использованием комбинации метода конечных элементов и метода Монте-Карло.

Литература

1. Красных А. А. Разработка основ проектирования и создание комплекса электрозащитных средств и устройств мониторинга состояния воздушных линий электропередачи напряжением до 35 кВ для повышения безопасности их эксплуатации: дис. д. т. н. Киров, 2005. 455 с.
2. Красных А. А. Статистические показатели травматизма в электро-энергетике // Электробезопасность. – 2000. – № 4. – С. 24–31.
3. Альварес Э. Х. Повышение эффективности использования строительной длины и поверхности стержневых стеклопластиковых изоляторов при загрязнении и увлажнении: дис. к. т. н. Ленинград, 1985. 223 с.
4. Александров Г. Н., Иванов В. Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. Л., 1984. С. 40–47.
5. Корбут Е. В. и др. Разрядные напряжения равномерно и неравномерно загрязненных изоляторов // Электричество. – 1978. – № 2.
6. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред. 2-е изд. М., 1981. 400 с.
7. Kuanishev V. T. et al. The concentration parameter thermal microstresses as the thermophysical characteristics of two-phase materials Journal of Physics. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012354>.
8. Сачков И. Н. Влияние формы включений на проводимость двумерных регулярных матричных систем // Журн. технич. физики. – 1996. – Т. 66, вып. 12. – С. 48–58.
9. Сачков И. Н. Режимы радиальной переконденсации в цилиндрических объемах // Теплофиз. выс. темп. – 1995. – Т. 33, № 5. – С. 759–764.
10. Sachkov I. N. et al. Development of new FEM programs for synergistic evaporation processes from porous systems // International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2018, IC-CMSE 2018 (Том 2040). [050017] American Institute of Physics Inc.. <https://doi.org/10.1063/1.5079115>.
11. Сачков И. Н. Геометрические факторы процессов переноса и фазовых превращений в пространственно неоднородных системах: дис. д. ф.-м. н. Екатеринбург, 2001. 289 с.
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М., 1979. 392 с.
13. Белов С. В. и др. Безопасность жизнедеятельности. М., 2001. 487 с.
14. Эксперт: зафиксированное российским спутником явление похоже на открытие. URL: https://ria.ru/20190211/1550669074.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com.

References

1. Krasny`x A. A. Razrabotka osnov proektirovaniya i sozdanie kompleksa e`lektrozashhitny`x sredstv i ustrojstv monitoringa sostoyaniya vozdushny`x linij e`lektroperedachi napryazheniem do 35kV dlya povu`sheniya bezopasnosti ix e`kspluatatsii. Dis. d.t.n., Kirov, 2005, 455 s.
2. Krasny`x A.A. Statisticheskie pokazateli travmatizma v e`lektro-e`nergetike/ A.A. Krasny`x// E`lektrobezopasnost`. 2000. № 4. - S. 24-31.
3. Al`vares E`. X. Povuy`shenie e`ffektivnosti ispol`zovaniya stroitel`noj dliny` i poverxnosti stержnevuy`x stekloplastikovuy`x izolyatorov pri zagryaznenii i uvlazhnenii tema dissertatsii. Dis. k.t.n. Leningrad 1985, 223 s.
4. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L. Izolyaciya e`lektricheskix apparatov vy`sokogo napryazheniya. L.: E`nergoatomizdat, 1984 g. -s.40-47.
5. Korbut E.V., Merxalev S.D., Rejn B.M., Solomonik E.A. Razryadny`e napryazheniya ravnomerno i neravnomerno zagryaznenny`x izolyatorov. E`lektrichestvo, № 2, 1978.
6. Dejch M.E., Filippov G.A. Gazodinamika dvuxfazny`x sred 2-e izd. – M.: E`nergoizdat, 1981. S. 400
8. Sachkov I.N. Vliyanie formy` vklyuchenij na provodimost` dvumerny`x regulyarny`x matrichny`x sistem //Zhurn. texnich. fiziki. 1996. T. 66, vy`p. 12. S. 48-58.
9. Sachkov I.N. Rezhimy` radial`noj perekondensatsii v cilindricheskix ob`emax //Teplofiz. vy`s. temp. 1995. T. 33, № 5. S. 759-764.
11. Sachkov I.N. Geometricheskie faktory` processov perenosa i fazovy`x prevrashhenij v prostanstvenno neodnorodny`x sistemax, Dis. d.f.-m.n. Ekaterinburg – 2001, 289 s.

12. Segerlind L. Primenenie metoda konechny`x e`lementov. M.:Mir, 1979. 392 s.
13. Belov S.V., Il`niczkaya A.V., Koz`yakov A.F. i dr Bezopasnost` zhiznedeyatel`nosti M.: Vy`sshaya shkola, 2001, 487 s.
14. E`kspert: zafiksirovannoe rossijskim sputnikom yavlenie poxozhe na otkry`tie. E`lektronny`j resurs: