

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗОЛЯЦИЮ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ НА ОСНОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

*А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко  
г. Челябинск, ЮУрГУ*

## DETERMINATION OF THE SOIL AND CLIMATIC PARAMETERS INFLUENCE ON INSULATION OF POWER CABLE LINE ON THE GROUND OF STATISTICAL DATA

*A. V. Korzhov, E. Y. Yurchenko  
Chelyabinsk, SUSU*

На основе анализа статистических данных о повреждаемости изоляции кабельной сети и метеорологических данных показана взаимосвязь грунтово-климатических параметров с текущим состоянием изоляции силовых кабелей.

*Ключевые слова: силовая кабельная линия, климатические параметры, параметры грунта, корреляция, ресурс.*

Grounding on the analysis of statistical data about damages of cable network insulation and meteorological data the interconnection between soil and climatic parameters and current state of power cable line insulation is shown.

*Keywords: power cable line, climatic parameters, soil parameters, correlation, resource.*

В условиях эксплуатации на силовые кабельные линии (КЛ), проложенные непосредственно в грунте, воздействует множество эксплуатационных факторов. Вследствие их влияния в изоляции кабеля происходят изменения, приводящие к старению, ухудшению свойств и разрушению изоляции. На основании многолетних исследований было установлено, что одним из воздействующих факторов, приводящих к выходу кабеля из строя, является повышенная температура [1]. Зависимость для расчёта ресурса изоляции от температуры имеет вид (1):

$$\tau = Be^{\frac{W}{RT}}, \quad (1)$$

где  $W$  - условная энергия активации процесса разрушения;  $B$  - коэффициент, зависящий от конструкции и применяемых материалов;  $R$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура.

Температура изоляции зависит как от величины тока, протекающего по жилам кабеля, так и от состояния грунта (состав, температура, влажность), в котором проложена КЛ.

На основании статистического материала по повреждаемости изоляции кабельной сети одного

из районов г. Челябинска установлен ряд распределения пробоев изоляции по годам (рис. 1). Выборка состоит из 361 кабельной линии с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением 6-10 кВ и протяженностью 155,2 км.

Сравнивая повреждаемость изоляции кабелей в разные годы, можно констатировать, что в целом повреждаемость возрастает. Однако нередко уровень повреждаемости следующего года оказывается ниже предыдущего. Иногда рост по сравнению с предыдущим годом значительно возрастает, а иногда резко снижается. Следовательно, рост повреждаемости наблюдается в среднем как тенденция. В отдельные годы уровни повреждаемости испытывают колебания, отклоняясь от основной тенденции. Тенденция динамики связана с действием долговременно существующих причин, определяющих процесс старения изоляции, как правило, это режимные параметры. Колебания, напротив, связаны с действием кратковременных или циклических факторов и, вероятно, определяются изменениями погодных условий.

По данным метеорологической службы установлено, что период с 1990 по 1993 года для г. Че-

лябинска - засушливый, характеризующийся минимальным количеством пробоев, а, начиная с 1998 года, - полноводный период, когда наблюдается рост повреждаемости КЛ. Одной из влияющих причин является значительное увлажнение грунта (рис. 1).

товых массивов, в которых проложена кабельная линия.

Из общей картины выделяются два характерных пика: май и октябрь. Май и октябрь - это переходные месяцы, когда наблюдается интенсивное выпадение осадков в виде дождя и мокрого снега и

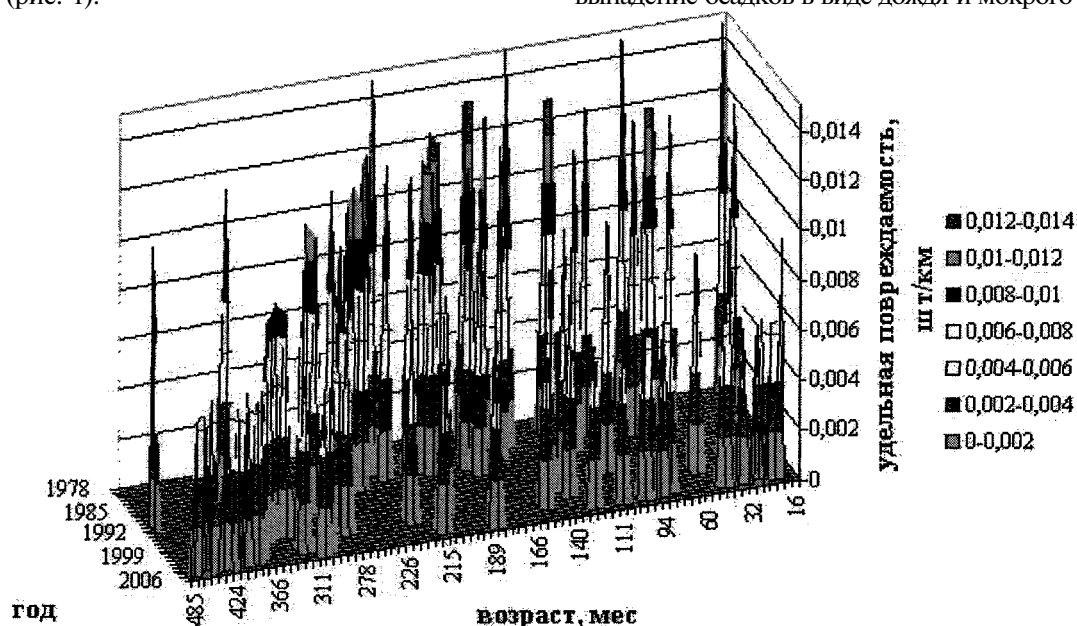


Рис. 1. Удельная повреждаемость изоляции КЛ в зависимости от срока эксплуатации по годам

Влияние погодных условий можно оценить, рассматривая повреждения изоляции в течение годового цикла. Большинство всех аварийных выходов КЛ на основании многолетних наблюдений приходится на осенне-весенний период (рис. 2). Повреждаемость кабелей в течение года непостоянна, а происходит с колебаниями, причём существует тенденция, ведущая к увеличению числа повреждений от пика к пику. Причинами этого могут являться климатические факторы (температура, влажность, давление и др.) и поведение грун-

происходят колебания от положительной температуры до заморозков. Объём воды, проникающей в грунт, увеличивается при её замерзании до 9 %. Рост объёма грунта при его промерзании сопровождается резким увеличением влажности грунта с образованием в нём льда в виде линз и других включений. В результате появляются места выпучивания кабеля при оттаивании и возникают растягивающие усилия [2, 3, 4]. Пучение грунта развивается вследствие притока плёночной воды к фронту промерзания из нижележащих слоев

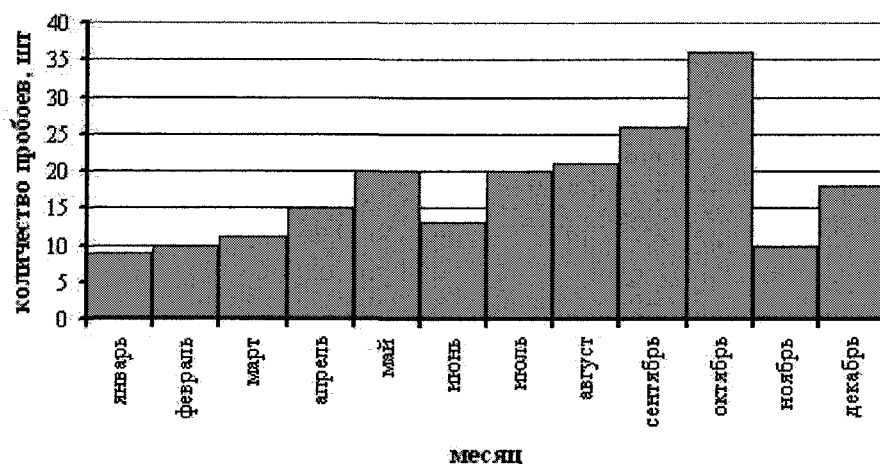


Рис. 2. Усредненная зависимость числа повреждений КЛ от времени по месяцам

(рис. 3). Миграция влаги происходит вследствие разности сил притяжения молекул воды к поверхности твёрдых частиц [5].

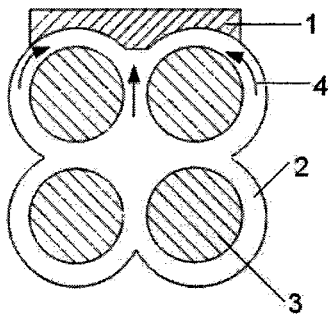


Рис. 3. Схема миграции влаги к фронту промерзания: 1 – кристаллы льда, 2 – гидратные оболочки, 3 – твердая частица, 4 – влага

Появившиеся из-за промерзания грунтов и под влиянием весеннего увлажнения грунта дефекты изоляции в первый пик (май) проявляются во втором пике (октябрь) с большей силой. Степень увлажнения грунтов в значительной мере предопределяется размерами и минералогическим составом слагающих их частиц: галечные (щебень), гравелистые (дресва), песчаные, пылеватые и глинистые [5, 6]. Наиболее часто в городских условиях встречаются грунты, состоящие из смеси песчаных, гравелистых и глинистых частиц. Влажность их на уровне прокладки кабеля составляет от 4 до 20 %.

В условиях города под влиянием местных нагрузок (например, дорога или проезжающий транспорт) происходит уплотнение грунта, что вызывает уменьшение его пористости и, следовательно, влажности в «нагруженных» местах. Значит, во время уплотнения грунта вода выдавливается. Она должна пройти некоторый путь в толще грунта, отфильтроваться через него. Процесс уплотнения зависит от скорости отжатая воды из пор. Ранее установлено, что движение воды в порах грунта происходит в соответствии с законом

ламинарной фильтрации - скорость фильтрации прямо пропорциональна гидравлическому градиенту [6]. Математическое выражение этого закона, предложенное Дарси, имеет вид (2):

$$v_f = k_f \cdot i, \tag{2}$$

где  $v_f$  - скорость фильтрации, или объём воды, проходящий через единицу площади поперечного сечения грунта в единицу времени;  $k_f$  - коэффициент фильтрации, равный скорости фильтрации при гидравлическом градиенте  $i = 1$ ;  $i$  - гидравлический градиент, равный потере напора ( $\Delta H$ ), отнесённой к пути фильтрации  $L$  (3):

$$i = \frac{H_2 - H_1}{L}. \tag{3}$$

Значение коэффициента фильтрации может находиться в больших пределах в зависимости от гранулометрического состава и плотности грунтов.

На рис. 2 представлена усреднённая зависимость числа повреждений КЛ по месяцам, но не всегда климатические параметры одного и того же месяца повторяются из года в год (рис. 4). Поэтому при усреднении параметров теряется достоверность в определении связи между климатическими факторами и числом повреждений.

Рассмотрим 2002 и 2006 года. В эти годы с января по сентябрь характер изменения повреждаемости изоляции одинаков с разницей в абсолютных значениях, а с октября значительно отличается (рис. 5).

Для выяснения возможных причин расхождения были рассмотрены погодные условия для данных лет (рис. 6). Для анализа выделены следующие грунтово-климатические параметры: среднемесячная температура на поверхности грунта, среднемесячная температура в грунте на глубине 0,8 м и среднемесячное количество осадков, выпавших в данном месяце.

Коэффициент корреляции между температурой в грунте и температурой на поверхности грунта, вычисленный по формуле (4), равен  $r = 0,8$ .

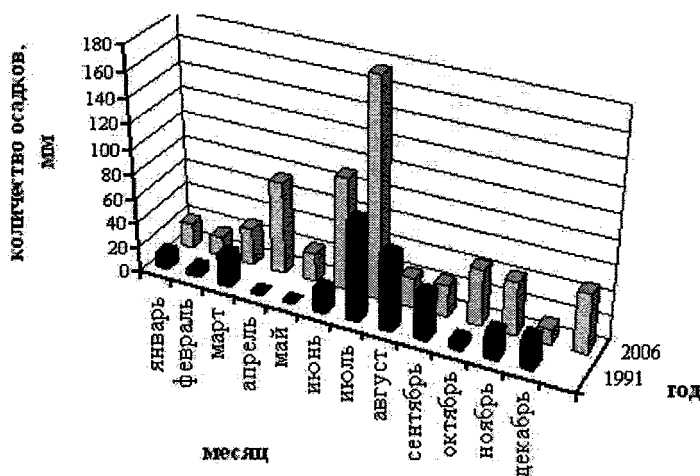


Рис. 4. Количество выпавших осадков за 1991 и 2006 годы

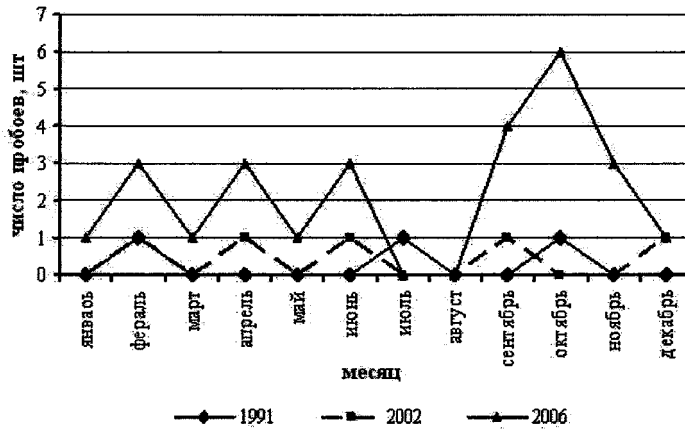


Рис. 5. Повреждаемость изоляции за 1991, 2002 и 2006 годы

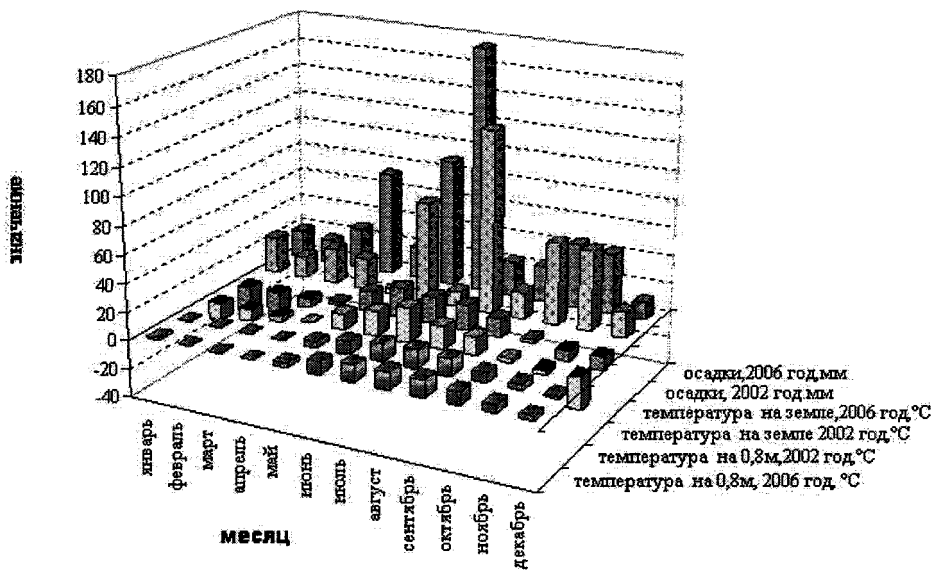


Рис. 6. Среднемесячные грунтово-климатические параметры

Линейная положительная связь свидетельствует о том, что при повышении температуры на поверхности грунта наблюдается повышение температуры и на глубине прокладки КЛ, и наоборот. На температуру окружающей среды влияет режим осадков с коэффициентом корреляции  $r = 0,48$ .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_x s_y}, \quad (4)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  - значения рассматриваемых параметров;  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  - их средние значения;  $s_x$  и  $s_y$  - их стандартные отклонения;  $n$  - количество пар значений.

Известно, что пробой изоляции происходит не мгновенно. Постепенное накопление и развитие дефекта занимает некоторое время, зависящее как от площади дефекта, так и от параметров окружающей среды. Это обстоятельство необходимо

учитывать при сопоставлении количества пробоев в месяце с грунтово-климатическими параметрами. Для этого ряд распределения пробоев должен опережать ряд климатических параметров на 3-4 месяца-время «жизни» дефекта [7].

За период с апреля по сентябрь гистограммы осадков для 2002 года и для 2006 года одинаковы по форме с той лишь разницей, что в 2006 году их количество было больше, что и сказывается на числе повреждений в данный год (см. рис. 5). В октябре и ноябре число повреждений резко отличается: в 2002 году повреждений нет, 2006 году - 6 шт. и 3 шт. соответственно. В 2006 году за июнь-сентябрь выпало 315,9 мм осадков (229,3 мм в 2002 году за тот же период) при средней температуре на поверхности грунта за три месяца 17,7 °C (17,5 °C в 2002 году). Осадки, выпавшие в 2006 году, не успевают испариться и уходят в почву. В результате происходит увлажнение грунта, способствующее растворению солей, образованию

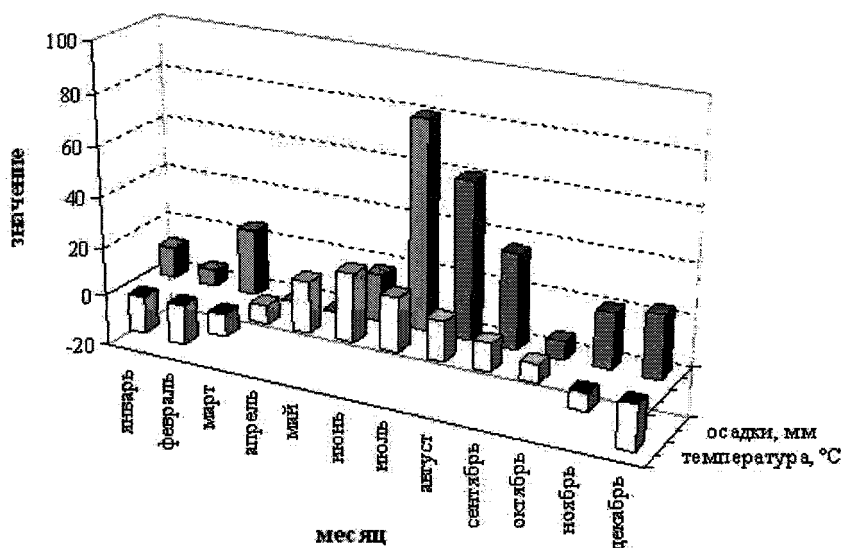


Рис. 7. Климатические параметры 1991 года

кислот и слабых электролитов в грунте, ускорению химических процессов, распространению блуждающих токов. Все это, в свою очередь, приводит к электрохимической коррозии металлической оболочки кабеля, а также при повышенных температурах - к проникновению молекул воды в поры шлангового покрытия кабеля вследствие гибкости цепи полимера. В 2002 году осадки, выпавшие в июне (70,5 мм), под действием положительных температур (+19,8 °C) частично испаряются, а осадки, выпавшие в августе - 129,6 мм, октябре - 58 мм, ноябре - 56,8 мм, способствуют пробоям в декабре.

Годовое количество выпавших осадков за 2002 год составляет 454,2 мм, за 2006 год - 579,3 мм. Для сравнения был рассмотрен засушливый 1991 год (рис. 5) с годовым количеством осадков 295,7 мм. В этом году пробои происходят в трёх месяцах: февраль, июль и октябрь. Анализируя климатические параметры года можно утверждать следующее: высокие температуры и дефицит влаги (рис. 7) создают благоприятные условия для почвенной засухи. Суховей усиливает вредное воздействие засухи, так как температура в суховеинном потоке в дневные часы, как правило, превышает 30 °C, а влажность воздуха понижается до 30 % [8]. Ветер увеличивает испарение и усиливает суховеинный эффект. При отсутствии осадков в апреле и мае грунт пересыхает, вследствие чего образуются трещины в почве. Из-за выпавших осадков в июне и июле вся вода проникает в грунт по образованным каналам. В этом случае возможно непосредственное попадание влаги на изоляцию, а также за счёт увлажнения происходит увеличение грунта в объёме и по массе, следовательно, наблюдается деформация грунтовых массивов, ведущих к изменению расположения кабеля в земле и образованию растягивающих усилий.

Таким образом, на основе сопоставления статистических данных о повреждаемости изоляции кабельной сети с климатическими параметрами, в частности, с количеством выпавших осадков, температурой на поверхности грунта и на глубине прокладки кабеля, выявлен один из факторов, влияющих на состояние изоляции, - грунтово-климатический. В зависимости от состава грунта влияние этого фактора будет изменяться за счёт изменения таких его характеристик, как вязкость и уплотняемость. Поэтому при определении остаточного ресурса изоляции кабеля и составлении прогноза повреждаемости изоляции, необходимо учитывать поведение грунта под воздействием климатических параметров для каждой КЛ в отдельности.

#### Литература

1. Канискин, В.А. *Не разрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации* / В.А. Канискин, Э.М. Костенко, А.И. Таджибаев // *Электричество*. — 1995. — № 5. — С. 19—23.
2. Малышев, М.В. *Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учебное пособие* / М.В. Малышев, Г.Г. Богатырёв. - М.: Изд-во АСВ, 2000. - 320 с.
3. Баранов, Б.М. *Сооружение и эксплуатация кабельных линий* / Б.М. Баранов. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1974. — 632 с.
4. Коржов, А.В. *Напряжённо-деформированные состояния грунтовых массивов, взаимодействующих с силовыми кабелями 6—10 кВ* / А.В. Коржов, Э.Л. Толмачев, А.И. Сидоров, Э.О. Балабуркин // *Электробезопасность*. — 2005. — №4. -С. 38-43.
5. Иванов, П.Л. *Грунты и основания гидротехнических сооружений: учебник для гидротехн.*

спец. вузов / П.Л. Иванов. - М.: Высш. шк., 1985. - 352 с.

6. *Механика грунтов. Ч. 1. Основы геотехники в строительстве: учебник* / Б.И. Долматов, В.Н. Бронин, В.Д. Карлов и др.; под ред. Б.И. Долматова. - М.: АСВ; СПб.: СПбГА-СУ, 2000. - 204 с.

7. Мусин, А.Х. *Оценка продолжительности*

*жизни дефектов изоляции кабелей 6—10 кВ городской электрической сети* / А.Х. Мусин // *Промышленная энергетика*. - 1998. — № 6. — С. 10-11.

8. *Природа Челябинской области* / М.А. Андреева, В.А. Бакунин, З.Ф. Кривопалова и др. - Челябинск: ЧГПУ, 2000. - 269 с.

*Поступила в редакцию 10.12.2007 г.*

**Коржов Антон Вениаминович.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов - электромагнитные процессы в кабельных сетях, оценка остаточного ресурса изоляции силовых кабелей.

**Korzhoz Anton Veniaminovich.** Candidate of technical sciences, associated professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: electromagnetic processes in cable networks, estimation of power cable insulation remaining life.

**Юрченко Екатерина Юрьевна.** Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов - изучение состояния изоляции силовых кабельных линий под воздействием эксплуатационных факторов.

**Yurchenko Ekaterina Yurievna.** Graduate student of the Life Safety department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: study of insulation power cable lines condition under the influence of working factors.