

*Айдарова А. Р., aidarova\_2010@mail.ru  
«Северэлектро» ААКМу, Бишкек, Кыргызстан*

## **МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ОТ КОРОНЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ**

Рассмотрено модельное представление потерь от короны в высоковольтных воздушных линиях электропередачи в условиях высокогорья. На основе обзора научных публикаций, посвященных анализу потерь от короны в воздушных линиях, отмечено, что значения обобщенных для различных сечений проводов потерь мощности на корону не совпадают с результатами расчетов по методике для высокогорных ЛЭП. Отсюда следует, что требуются дополнительные исследования по уточнению дополнительных факторов, влияющих на потери от короны. Приводятся авторские представления о таких дополнительных факторах.

**Ключевые слова:** потери от короны, воздушные линии электропередачи в условиях высокогорья, напряженность электрического поля, погодные условия, снежный покров, диэлектрическая проницаемость.

**Постановка задачи.** Интерес к изучению короны связан с потерями энергии при коронировании ЛЭП и с тем, что она является источником акустического шума и высокочастотного электромагнитного излучения (спектр частот 0,154–100 МГц), которые создают помехи радио- и телеприему. Так, потери энергии при коронировании проводов ЛЭП сверхвысокого напряжения в плохую погоду составляют очень большую величину [1].

При коронном разряде у поверхности провода образуется объемный заряд, знак которого совпадает с полярностью напряжения на проводе. Силы электрического поля способствуют перемещению ионов, составляющих объемный заряд от провода. Для их перемещения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону (ПК), поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше.

Уровень рабочего напряжения сети, сечения проводов и конструкция фазы, *но, в еще большей степени, погодные условия, влияют на потери мощности от короны на проводах воздушной линии (ВЛ)*. Потери на корону при тумане и изморози возрастают в десятки раз по сравнению с потерями при хорошей погоде [2].

В работе [1] дан анализ проблем расчёта потерь на корону воздушных линий электропередачи, согласно которым:

- методика [3,4], основанная на усреднении данных измерений зависимости потерь на корону от напряжения на опытных пролётах в произвольно принятых координатах, до сих пор используется при расчёте потерь мощности и электроэнергии на корону;

- анализ показал, что при использовании методики [5] получаем значения значительно ниже реальных удельных потерь мощности на корону, так для годовых потерь электроэнергии на корону, рассчитанные в [3];

- потери, измеренные при хорошей метеоусловиях и осадках [6] на 30% превышают значения, полученные в [5];

- результат эксплуатации ВЛ 1150 кВ Экибастуз – Кокчетав показал, что потери на корону в этой ВЛ на номинальном напряжении, определённые по методике

[7], оценены неверно;

– по американским источникам, например, в справочнике [8] на стр.205, потери не могут быть определены, исходя из кратковременных испытаний на коротких линиях, так как для этого требуется проведение многочисленных статистических измерений. Поэтому, данные измерений потерь на опытных пролётах не репрезентативны и следовательно не позволяют получить достоверные значения потерь;

– результаты обобщений экспериментальных данных, полученных на исследуемых участках, противоречат теоретическим работам, проводившимся со времён Р. Хольма (1927г.) и подтверждённым исследованиями в [7], потери мощности общей короны при переменном токе равны  $P_k = bU(U - U_0)$ , где  $b$  – коэффициент, зависящий от конфигурации ВЛ и формы объёмного заряда,  $U$  – амплитудное значение фазного напряжения ВЛ,  $U_0$  – критическое напряжение общей короны. Следовательно, обобщение потерь мощности на корону необходимо производить в безразмерных координатах  $\frac{P_k}{bU^2} = f\left(\frac{U_0}{U}\right)$ .

Результаты проведенных на станции Тюз-Ашу (КР) на высоте 3050 м над уровнем моря [9] испытаний показали несовпадение обобщенных для различных сечений проводов потерь мощности на корону с результатами расчетов по методике для высокогорных ЛЭП.

Таким образом, возникает необходимость проведения в условиях высокогорных ЛЭП [10] исследований для уточнения влияющих факторов и разработки методики расчета потерь мощности и энергии на корону.

Анализ научных публикаций, посвященных оценке влияний погодных условий на ПК, показал, что они в основном связаны с возникшими на поверхности проводов неровностями из-за атмосферных отложений (капли дождя, роса, снег, изморозь, гололед, иней).

**Анализ дополнительных причин.** По нашему мнению, кроме погодных условий на ПК влияют еще и другие факторы. С целью обоснования возможных дополнительных причин потерь на корону ознакомимся с некоторыми положениями электрофизических основ коронного разряда на проводах воздушных линий электропередачи и с основными расчетными формулами [5, 11].

Главным фактором, от которого зависят потери на корону и радиопомехи на ВЛ, является отношение напряженности электрического поля на поверхности проводов к начальной напряженности короны.

*Незначительные изменения этого отношения приводят к существенному изменению потерь на корону и радиопомехи. Из-за этого напряженность поля вычисляют с погрешностью не более 1%.*

Для ВЛ с одиночными проводами напряженность  $E$  электрического поля на поверхности провода, согласно [5], определяется по формуле

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (1)$$

где  $q$  – линейная плотность заряда на проводе, К/м;  $r_0$  – радиус одиночного провода, см ( $10^{-2}$  м);  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м.}$$

В то же время, согласно теории электромагнитного поля [12], выражение, определяющее напряженность  $E$  электрического поля на поверхности провода, выглядит так

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_a r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, для нашего случая (воздуха), она определяется из выражения

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r, \quad (3)$$

где  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха.

Следует отметить, что формула (1), которая используется в руководящем указании по учету потерь на корону, вызывает недоумение, т.к. величина  $\epsilon_0$ , являющаяся параметром вакуума, названа диэлектрической проницаемостью воздуха. Последствия влияния этой «неточности» на оценку величины потерь от корону рассмотрим далее, после краткой информации о процессах, вызывающих потери энергии при короне на переменном напряжении.

Подводя итог той информации, которую мы рассмотрели выше и которая отражает основные положения электрофизических основ коронного разряда и основные расчетные формулы, можем сделать следующие заключения:

– в рассмотренном расчетном аналитическом выражении (1), с помощью которого оцениваются ПК, имеются некоторые противоречия насчет трактовки величины  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ , характеризующей электрические свойства вакуума [12], однако во многих работах эту величину, которая по своей природе является константой, назвали диэлектрической проницаемостью воздуха, которая в общем случае зависит от климатических условий;

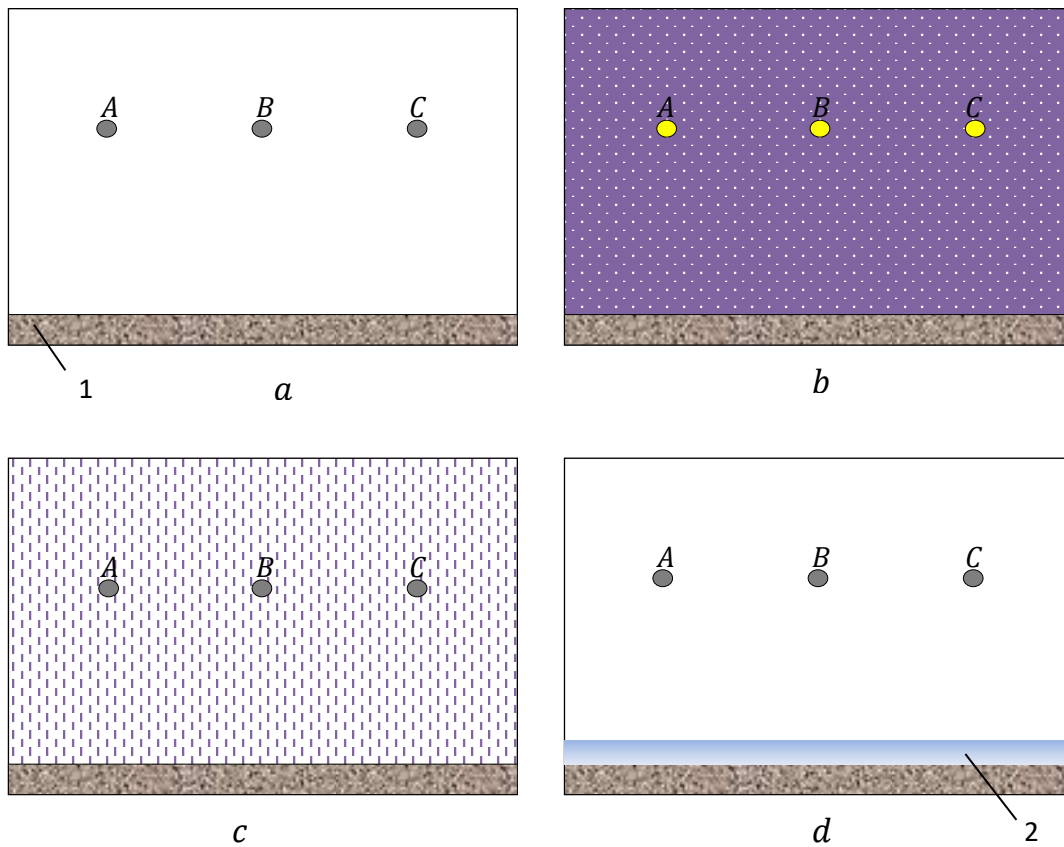


Рисунок 1 – Схематичные изображения метеорологической обстановки в месте прохождения ВЛ: *a* – ясная погода; *b* – снегопад; *c* – дождь, повышенная влажность воздуха, туман; *d* – после снегопада; *A, B, C* – провода ВЛ; *1* – земля; *2* – снежный покров

– при строгом подходе, выше отмеченные неточности устраняются, если в выражении (1) вместо  $\varepsilon_0$ , как требует теория электромагнитного поля, подставлять,  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  [12], где  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_r$  соответственно абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости вещества, в нашем случае воздуха. Т.к. для газа  $\varepsilon_r \approx 1$ , то для воздуха в нормальных погодных условиях можно считать,  $\varepsilon_a \approx \varepsilon_0$ ;

– применение формулы(1) правомерно при нормальных погодных условиях и высокогорья (рис.1, а), т.е., когда диэлектрическую проницаемость воздуха можно считать приблизительно равной  $\varepsilon_0$ ;

– во время дождя или снегопада, особенно при ливневых дождях, снежной метели или густом тумане с повышенной влажностью воздуха пространство между землей и проводами воздушной линии электропередачи можно считать заполненным композиционным диэлектриком (КД). КД представляет в одном - случае смесь воздуха и капелек воды во время дождя или тумана, а в другом смесь воздуха и снежинок. В этом случае  $\varepsilon_r > 1$ , и его значение можно оценить по различным формулам в зависимости от структуры КД.

При *взаимопроникающей структуре*, например, при густом тумане, относительную диэлектрическую проницаемость КД можно рассчитать по формуле Лихтенеккера [13]:

$$lg\varepsilon_{rcm} = y_1 lg\varepsilon_{r1} + y_2 lg\varepsilon_{r2}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$  – относительные диэлектрические проницаемости компонентов (для воды  $\varepsilon_r = 81$ , сухого воздуха  $\varepsilon_r \approx 1$ ),  $y_1$ ,  $y_2$  – объемные содержания компонентов, значения которых зависят от интенсивности осадков и оцениваются путем экспериментального измерения.

Широко используемая формула (4) – полуэмпирическая, её теоретическое обоснование дано в работе [14].

При *матричной структуре* по формуле Нильсена [15]. Для случая снегопада наполнитель – снежинка с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{ch}$ , а матрица – воздух с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_b$  формулу Нильсена можно написать в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_b \cdot \frac{1 + A \cdot B \cdot V_b}{1 - B \cdot \Psi \cdot V_b}, \quad (5)$$

$B = \frac{\varepsilon_{ch}/\varepsilon_b - 1}{\varepsilon_{ch}/\varepsilon_b + A}$ ,  $\Psi = 1 + \frac{1-p_m}{p_m} \cdot V_k$ , где  $V_{ch}$  – объемная доля снежинки,  $A$  – характеристика формы частиц, для сфер  $A = 1.5$ , для частичек нерегулярной формы с минимальной поверхностью  $A = 3$ , для пластинок и чешуек различной формы  $A = 4$ ;  $p_m$  – максимально возможная объемная доля твердой фазы, характеризующая укладку и форму частиц. Аналогично можно написать эту формулу и для дождя.

При метеорологической обстановке, изображенной на рис.1, d, т.е. в зимний период, после каждого снегопада на поверхности земли, особенно в высокогорьях, постепенно накапливается снежный покров достаточной толщины.

В этом случае происходит изменение напряженности электрического поля в сторону повышения, в области между проводами ВЛ и поверхностью земли, что может привести к увеличению потери на корону. Для обоснования этого утверждения рассмотрим задачу расчета напряженности электрического поля над поверхностью снежного покрова (рис. 2).

Предположим, что эквипотенциальная поверхность 1 приближенно представляет собой плоскость, параллельную поверхности земли;  $h_1$  – расстояние от поверхности снежного покрова до эквипотенциальной поверхности 1;  $h_2$  – толщина снежного покрова;  $\varepsilon_{a1}$ ,  $\varepsilon_{a2}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость соответ-

ственно воздуха и снега. Сухой снежный покров является диэлектриком, *проницаемость*  $\epsilon$  которого зависит от частоты электромагнитных волн, их длины и от состояния снега (температуры, плотности, структуры, влажности). Диэлектрическая проницаемость снега значительно меньше, чем льда ( $\epsilon_{\text{ол}} = 73 \dots 95$ ,  $\epsilon_{\infty\text{ол}} = 3 \dots 8$ ), и увеличивается с возрастанием его плотности и влажности [16].

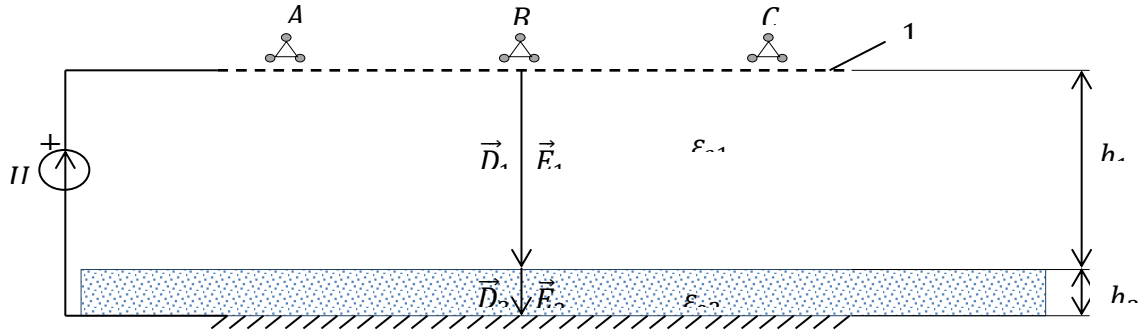


Рисунок .2 – Приближенная эквивалентная схема замещения промежутка между проводами ВЛ и поверхностью земли:  $A, B, C$  – высоковольтные провода ВЛ;  $h_2$  – толщина снежного покрова;  $h_1$  – расстояние от поверхности снежного покрова до эквипотенциальной поверхности 1;  $\epsilon_{a1}$ ,  $\epsilon_{a2}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость соответственно воздуха и снега

Искажающего влияния коронирующих проводов ВЛ на поле не будет. При этом условии в каждом слое поле будет равномерным. В силу того, что нормальная составляющая вектора  $\vec{D}$  непрерывна, имеем  $D_{1n} = D_{2n}$  [12].

Но  $D_{1n} = \epsilon_{a1}E_1; D_{2n} = \epsilon_{a2}E_2$ . Следовательно,

$$\epsilon_{a1}E_1 = \epsilon_{a2}E_2. \tag{6}$$

Из этого выражения следует, что отношение напряженностей обратно пропорционально отношению электрических проницаемостей.

В уравнении (6) остаются неизвестными величины  $E_1$  и  $E_2$ , для определения этих величин составим уравнение, исходя из того, что

$$\int_0^{h_1} \vec{E}_1 d\vec{x} + \int_{h_1}^{h_1+h_2} \vec{E}_2 d\vec{x} = U$$

или

$$E_1 h_1 + E_2 h_2 = U. \tag{7}$$

Совместное решение (6) и (7) дает

$$E_1 = \epsilon_{a2} \frac{U}{\epsilon_{a2}h_1 + \epsilon_{a1}h_2}, \quad E_2 = \epsilon_{a1} \frac{U}{\epsilon_{a2}h_1 + \epsilon_{a1}h_2}.$$

Учитывая (3), получим

$$E_1 = \varepsilon_{r2} \frac{U}{\varepsilon_{r2}h_1 + \varepsilon_{r1}h_2}, \quad E_2 = \varepsilon_{r1} \frac{U}{\varepsilon_{r2}h_1 + \varepsilon_{r1}h_2}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{r1} \approx 1$  - относительная диэлектрическая проницаемость сухого воздуха;  $\varepsilon_{r2} \approx 10$  - относительная диэлектрическая проницаемость сухого снега. Сопоставление результатов расчета по формулам (8) показывает, что при наличии снежного покрова  $E_1 > E_2$ , т.е. напряженность электрического поля в воздухе увеличивается по сравнению с ситуацией отсутствия снежного покрова, и степень увеличения зависит от толщины покрова и значения относительной диэлектрической проницаемости снега  $\varepsilon_{r2}$ . Как было отмечено выше,  $\varepsilon_{r2}$  увеличивается с возрастанием его плотности и влажности снега [16].

Другим дополнительным фактором, который может повлиять на ПК, является физический процесс, рассмотренный в [16].

Во время низовых метелей крупные кристаллы льда мелкая снежная пыль имеют различные заряды (первые – отрицательные, вторые – положительные). Свежевыпавший снег и слежавшийся наэлектризованы по-разному: первый чаще всего наэлектризован больше. В проводах ЛЭП может накопиться объемный заряд, который приведет к коронному разряду в результате образования электрического поля во время снежных метелей.

**В заключение отметим**, что анализ научных публикаций, посвященных оценке влияния погодных условий на ПК, показал, что они в основном связаны с возникшими неровностями на поверхности проводов из-за атмосферных отложений (капли дождя, роса, снег, изморозь, гололед, иней). Но есть, по нашему мнению и другие причины. Например: во время атмосферных осадков или метеоусловий с повышенной влажностью воздуха, пространство между землей и проводами воздушной линии электропередачи заполнено композиционным диэлектриком: в одном случае смесь воздуха и капелек воды, а в другом – смесь воздуха и снежинок. В этом случае  $\varepsilon_r > 1$ , следовательно, потери на корону увеличиваются; - в зимний период после каждого снегопада на поверхности земли, особенно в высокогорье, постепенно накапливается снежный покров достаточной толщины. В этом случае происходит изменение напряженности электрического поля в сторону повышения в области между проводами ВЛ и поверхностью земли, что может привести к увеличению потери на корону.

### *Литература*

1. Тамазов А.И. О проблемах расчёта потерь на корону воздушных линий электропередачи  
//<http://portalenergetika.com/articles/oproblemahraschetapoternakoronuvozdushnyihliniyelektroperedachi>.
2. Беляева Л.А., Булатов Б. Г. Оценка потерь электроэнергии на корону по данным телеметрии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2007. – № 20(92). – С. 43–45.
3. Костюшко В.А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока. -М.: НТФ

- «Энергопрогресс», 2011. – 84 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып. 6 (150)].
4. Савкова Т. Н., Кравченко А. И. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого — 2013-№3.
  5. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750 кВ и постоянного тока 800-1500 кВ.
  6. Емельянов Н.П., Костюшко В.А. Результаты измерений потерь мощности на корону на опытной ВЛ 1150 кВ. / В сб. «Перенапряжения, конструкции и радиопомехи в электропередачах 1150 кВ». – М.: Энергоатомиздат, 1984.
  7. Тамазов А.И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. Спутник +. М., 2002. (67)
  8. Линии «электропередачи 345 кВ и выше. / Перевод под ред. В.В. Бургсдорфа. – М.: Энергия, 1980.
  9. Дикамбаев Ш.Б., Костюшко В.А., Ордоков И.О., Емельянов Н.П. Исследование потерь мощности на корону на высокогорных линиях электропередачи переменного тока // Сб. «Исследования и испытания в электропередачах 750–1150 кВ». – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 131-141.
  10. Егиазарян Л.В., Сафарян В.С., Караханян Л.О, Арутюнян А.С. К вопросу уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. Т. LXIII - С. 63-69.
  11. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.: с ил. (57)
  12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник / Л.А. Бессонов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.: ил.
  13. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. (68)
  14. Сатаркулов К.А., Воробьев А.С. К вопросу обоснования формулы Лихтенеккера. - М.: Моск.энерг.ин-т. 1980. – 15 с. Рукопись депонирована в ВИНТИ.
  15. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие; Пер. с англ./ Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с., ил.
  16. Мосин О.В. Характеристика снежного покрова / <http://coolreferat.com/375920>.