

УДК 551.506(23)(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-8-181-189

**ОЦЕНКА ВЫСОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА
И ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОГОД
В КЫРГЫЗСТАНЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ
НА КОРОНУ ПРОВОДОВ ГОРНЫХ ЛЭП**

Ю.А. Подрезова, О.А. Подрезов, Ш.Б. Дикамбаев

Аннотация. На примере сложной горной территории Кыргызстана предлагается методика оценки высотных зависимостей плотности воздуха, а также годовых длительностей типов погоды с сухим снегом, дождем и изморозью для расчета потери мощности горных ЛЭП от коронирования проводов. Установлено, что средние годовые плотности воздуха и годовые длительности этих погоды достаточно тесно коррелируют с высотой места, что дает практические возможности получить их высотные зависимости в форме линейных и параболических регрессий. Найденные высотные регрессии могут быть использованы для расчета коронирования проводов высоковольтных ЛЭП на территории Кыргызстана, а предлагаемая методика их оценки применима в других горных районах.

Ключевые слова: горная территория Кыргызстана; годовые длительности погоды, влияющих на корону; оценка высотных зависимостей.

**ТООДОГУ ЭЛЕКТР ӨТКӨРҮҮЧҮ ТААЖЫ ЧУБАЛГЫЛАРГА КЕТКЕН
ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫН ЖОГОТУУЛАРЫН ЭСЕПТӨӨ ҮЧҮН
КЫРГЫЗСТАНДАГЫ АБАНЫН ТЫГЫЗДЫГЫНЫН
ЖАНА АР КАНДАЙ АБА ЫРАЙЫНЫН УЗАКТЫГЫНЫН БИЙИКТИККЕ
КӨЗ КАРАНДЫЛЫГЫН БААЛОО**

Ю.А. Подрезова, О.А. Подрезов, Ш.Б. Дикамбаев

Аннотация. Макалада тоодугу электр өткөрүүчү таажы чубалгыларынан электр энергиясын жоготууларды эсептөө үчүн, Кыргызстандын татаал тоолуу аймагынын мисалында абанын тыгыздыгынын бийиктикке көз карандылыгын, ошондой эле кургак кар, жамгыр жана үшүк аралаш аба ырайынын түрлөрүнүн жылдык узактыгын баалоо ыкмасы сунушталат. Абанын орточо жылдык тыгыздыгы жана бул аба ырайынын жылдык узактыгы жердин бийиктиги менен тыгыз байланышта экени аныкталган, мунун өзү алардын бийиктикке көз карандылыгын сызыктуу жана параболикалык регрессия түрүндө алууга мүмкүндүк берет. Табылган бийиктик регрессиялар Кыргызстандын аймагында жогорку чыңалуудагы электр линияларынын корона зымдарын эсептөө үчүн колдонулушу мүмкүн жана сунушталган баалоо ыкмасы башка тоолуу аймактарда да колдонулат.

Түйүндүү сөздөр: Кыргызстандын тоолуу аймагы; таажыга таасир этүүчү аба ырайынын жылдык узактыгы; бийиктикке көз карандылыкты баалоо.

ASSESSMENT OF ALTITUDE DEPENDENCES OF AIR DENSITY
AND DURATION OF VARIOUS TYPES OF WEATHER
IN KYRGYZSTAN FOR CALCULATING THE POWER LOSS
ON THE CORONA OF WIRES OF MOUNTAIN POWER LINES

Yu.A. Podrezova, O.A. Podrezov, Sh.B. Dikambaev

Abstract. On the example of a complex mountainous territory of Kyrgyzstan, a method for assessing the altitude dependences of air density is proposed, as well as the annual durations of types of weather with dry snow, rain and frost for calculating the power loss of mountain power lines from corona wires. It has been established that the average annual air densities and the annual duration of these weather conditions closely correlate with the altitude of the place, which makes it practically possible to obtain their altitude dependences in the form of linear and parabolic regressions. The found altitude regressions can be used to calculate the corona of wires of high-voltage transmission lines on the territory of Kyrgyzstan, and the proposed method for their assessment is applicable in other mountainous regions.

Keywords: mountainous territory of Kyrgyzstan; annual duration of weather affecting the corona; assessment of altitude dependences.

Введение. Для воздушных линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения (330–750 кВ) становятся существенными непроизводительные потери мощности путем ее самопроизвольного излучения проводами в окружающее пространство, носящие название коронного разряда [1, 2]. В узкой зоне вблизи проводов под действием высокого напряжения возникают сложные ионизационные процессы с выделением большого числа квантов света, благодаря чему вокруг них образуется святящийся в темноте голубой ореол, откуда и произошло название коронного разряда. Потери от короны существенно зависят от погодных условий, они соизмеримы с потерями на омический нагрев проводов, возникающих при передаче электроэнергии, и оставляют около 20 % от общих технических потерь на ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения. Поэтому расчет потерь при проектировании таких линий регламентируется специальными Руководящими указаниями (РУ) [1], что позволяет не только оценить сами потери, но и минимизировать их путем выбора соответствующего типа проводов и конструкции фаз.

Согласно Руководящим указаниям, при расчете годовых потерь на корону следует, в соответствии с высотой и расположением ЛЭП [1], учитывать фактические значения плотности воздуха и средние годовые длительности следующих четырех типов погод: $Q_{\text{хн}}$ – хорошая погода (наиболее благоприятный погодный фактор); $Q_{\text{сн}}$ – сухой снег; $Q_{\text{д}}$ – дождь; $Q_{\text{из}}$ – изморозь. При этом, в РУ к типу погоды сухой снег относятся собственно погода с сухим снегом и метелями, а также погода со снежной крупой, снежными зёрнами и ледяными иглами. В климатических справочниках [3, 4] все эти виды осадков совокупно обозначаются как «твердые осадки». Аналогично с погодными условиями, в РУ к определению дождя относятся все виды дождей, морось, а также мокрый снег и снег с дождем, что в справочниках [3, 4] обозначается как «жидкие осадки» и «смешанные осадки». Наконец, в группу погоды с изморозью, согласно РУ, входят все виды гололедно-изморозевых отложений, отмечаемых на гололедных станках метеостанций: собственно гололед, плотная и кристаллическая изморозь, замерзающий мокрый снег и их смеси. При этом установлено, что потери на корону при этих типах неблагоприятных погод, по сравнению с потерями при хорошей погоде, существенно увеличиваются: при сухом снеге примерно в 4–5 раз, при дожде и мокром снеге в 15–20 раз, а при изморози и намерзшем на проводах мокром снеге даже в 30–40 раз.

Согласно принятой в РУ методике расчетов средних годовых потерь мощности на корону, используются не собственно средние годовые значения длительностей всех этих типов погод в часах, а относительные значения – Ψ_i в году в долях единицы, определяемые как их отношения к длительности года, выраженной в часах, т. е. находятся по формуле:

$$\Psi_i = \frac{Q_i}{8760}, \quad (1)$$

где индекс i соответствует заданному типу погоды, в знаменателе стоит 8760 ч – длительность года в час, а Q_i – есть длительности каждой из четырех типов погод в году в часах.

Плотность воздуха также учитывается в относительной форме δ :

$$\delta = \rho / \rho_0, \quad (2)$$

где ρ и ρ_0 – фактическая и задаваемая стандартная плотности воздуха в $\text{кг}/\text{м}^3$, при этом $\rho_0 = 1,204 \text{ кг}/\text{м}^3$, что соответствует давлению в $P_0 = 1013,25 \text{ гПа}$ и температуре $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Как известно из уравнения состояния воздуха [2]:

$$\rho = P / (RT), \quad (3)$$

где ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ – плотность сухого воздуха; P , Па – давление воздуха; $R = 287 \text{ Дж}/\text{кг } ^\circ\text{K}$ – удельная газовая постоянная сухого воздуха, а T $^\circ\text{K}$ – значение температуры воздуха в абсолютной шкале Кельвина:

$$T \text{ } ^\circ\text{K} = 273,16 + t \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где t $^\circ\text{C}$ – температура в практической шкале Цельсия.

Согласно (2) и (3), формулу для относительной плотности δ можно представить в следующем виде:

$$\delta = (P / T)(T_0 / P_0) = k(P / T). \quad (5)$$

Приняв $P_0 = 1013,25 \text{ гПа}$, а $T_0 = 293,16 \text{ }^\circ\text{K}$, получим рабочую формулу для δ в виде:

$$\delta = 0,2893(P / T), \quad (6)$$

где P , гПа , T , $^\circ\text{K}$, а δ понижается с высотой от значений, близких к 1,0 на малых высотах, и до значений порядка 0,700–0,650 на высотах около 4 км.

Особо отметим, что в Кыргызстане искомые расчеты среднегодовых значений плотности и различных типов погод надо выполнять в диапазоне высот 0,5–4,5 км. Это объясняется тем, что все «проходимые» при строительстве ЛЭП перевалы на самых высоких хребтах лежат в пределах 3–4,5 км, а фактические минимальные отметки территории составляют около 0,5 км. Выше 4–4,5 км территория, как правило, или представлена технически непроходимыми крутыми скальными склонами или занята горными ледниками и снежниками. Например, наиболее высокая отметка двух действующих в настоящее время ЛЭП 500 кВ от Токтогульской ГЭС в Чуйскую долину, соответствует перевалу Чунгур на Киргизском хребте с высотой 3,6 км. Одновременно при практической дифференциации трасс горных ЛЭП на «высотно однородные» по значениям плотности и погодных условий целесообразно ограничиться разбиением участков на последовательные слои толщиной в 500 м, которые условно назовем стандартными слоями. При расчетах короны в пределах высотных отметок каждого из таких стандартных слоев, значения плотности и длительности погод следует принимать постоянными, которые соответствуют их серединам. Тогда, в качестве границ стандартных слоев и их середин (даны в скобках) целесообразно принять 8 следующих: 0,5–1,0 (0,75), 1,0–1,5 (1,25), 1,5–2,0 (1,75), 2,0–2,5 (2,25), 2,5–3,0 (2,75), 3,0–3,5 (3,25), 3,5–4,0 (3,75) и 4,0–4–5 (4,25) км. Такой подход был нами использован в дальнейшем.

Цель настоящей работы – нахождение высотных зависимостей для территории Кыргызстана, занимающей основную часть одних из самых высоких в Мире горных систем Тянь-Шаня и Гиссаро-Алая, средних годовых значений относительных плотности воздуха δ и длительностей трех типов погод: сухой снег – Ψ_{cc} , дождь – Ψ_0 и изморозь – $\Psi_{из}$. Такие зависимости во всех случаях строились по многолетним данным метеостанций для территории Кыргызстана в целом. Относительная длительность хорошей погоды $\Psi_{хп}$ определялась как остаточное слагаемое по очевидной формуле:

$$\Psi_{xn} = 1 - \Sigma(\Psi_{cc} + \Psi_{\delta} + \Psi_{uz}). \quad (7)$$

При этом, разумеется, в процессе исследований все высотные зависимости были получены как в натуральных переменных, так и в относительной форме. Это позволило получить необходимые для практического использования решения, соответствующие возможностям современных климатических справочников.

1. Высотные зависимости средней годовой плотности воздуха. Чтобы получить высотные зависимости для плотности воздуха в натуральных переменных ρ по (3), и в относительной форме δ по (6), следует вначале найти зависимости от высоты средних годовых значений температуры воздуха $t(z)$ и давления $P(z)$. Эти зависимости $t(z)$ и $P(z)$ были взяты нами из работы [4], где они найдены как статистические регрессии [1], параметры которых рассчитывались по методу наименьших квадратов, используя многолетние данные метеостанций. Исходными материалом послужили результаты 33-летних (1936–1968 гг.) наблюдений метеостанций Кыргызстана и сопредельных территорий Узбекистана, Таджикистана и Казахстана, расположенных в диапазоне высот 0,2–3,6 км. При этом для нахождения высотной регрессии температуры использованы данные 117 станций, а для высотной регрессии давления воздуха – 70 станций.

В результате, найденная линейная высотная регрессия $t^{\circ}\text{C}$ для территории Кыргызстана в целом имеет вид [4]:

$$t(z) = -4,72z + 13,4 \pm 3,2, \quad (8)$$

где $t^{\circ}\text{C}$ – средняя годовая температура в $^{\circ}\text{C}$; z , км – высота места, слагаемое $\pm 3,2^{\circ}\text{C}$ представляет собой среднюю квадратическую ошибку регрессии s .

Высотная регрессия (8) статистически значима на уровне доверительной вероятности $p = 0,95$ и имеет коэффициент корреляции r , равный $r = -0,81$. В ее уравнении сомножитель при z , равный $-4,78^{\circ}/\text{км}$, есть вертикальный градиент среднегодовой температуры, характеризующий ее понижение на $-4,72^{\circ}$ на каждый км высоты подъема. Ниже в процессе анализа мы будем приводить численные значения аналогичных параметров линейных регрессий для высотных зависимостей других климатических характеристик без повтора их статистического и климатического смыслов.

Как известно [6], падение давления с высотой, в случае линейной зависимости температуры от высоты, описывается моделью политропной атмосферы. Используем полученную в [5] для политропной атмосферы степенную регрессию $P(z)$:

$$P(z) = 1017(1 - 0,02z)^{5,85}, \quad (9)$$

где $P(z)$, гПа – давление воздуха; z , км – высота места.

В степенной регрессии (9) сомножитель 1017 гПа равен приведенному среднегодовому значению давления на уровне моря (при $z = 0$). Этой регрессии соответствует очень высокий коэффициент степенной корреляции, равный $r_c = 0,9998$, а ее относительная средняя квадратическая ошибка $s_{\text{от}}$ составляет всего $\pm 0,2\%$.

Как видно из этих данных, очень высокая степенная корреляция давления и высоты, а также достаточно высокая линейная корреляция температуры воздуха и высоты, позволяют использовать эти зависимости для надежного расчета изменения средних годовых значений плотности воздуха до 4–4,5 км в Кыргызстане, используя совместно уравнения (3), (6), (8) и (9). В таблице 1 приведены результаты расчетов среднегодовых значений температуры t и T , давления P , абсолютных ρ и относительных значений плотности воздуха δ для Кыргызстана на высотах средин принятых стандартных слоев.

Как видно из данных таблицы 1, от высоты 0,75 км к высоте 4,25 км средние годовые значения ρ убывают от 1,146 до 0,791 $\text{кг}/\text{м}^3$, а значения δ – от 0,951 до 0,656, т. е. на 31 %. Это происходит за счет падения давления с высотой от 931 до 605 гПа (падение на 35 %), тогда как понижение температуры

Таблица 1 – Расчетные значения температуры, давления и плотности для средин стандартных слоев на территории Кыргызстана

Расчетный параметр	Высоты средин стандартных слоев, км							
	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25
t°С	9,9	7,5	5,1	2,8	0,4	-1,9	-4,3	-6,7
T°К	283,1	280,7	278,3	276,0	273,6	271,3	268,9	266,5
P, гПа	930,9	877,0	825,7	776,9	730,5	686,4	644,5	604,8
ρ , кг/м ³	1,146	1,089	1,034	0,981	0,930	0,882	0,835	0,791
δ	0,951	0,903	0,858	0,814	0,771	0,731	0,693	0,656

от 9,9 до –6,7 °С частично уменьшает степень понижения плотности с высотой, происходящую за счет падения давления.

Используя найденные в таблице 1 оценки δ , можно получить интерполяционную формулу для непосредственного расчета δ для задаваемых значений (z км):

$$\delta = 0,0037z^2 - 0,1026z + 1,0257. \quad (10)$$

При этом расчеты по уравнению (10) полностью совпадают с расчетами по (6).

Относительная средняя квадратическая ошибка расчета δ по предлагаемой методике – $s_{\text{от}}(\delta)$ будет равна [7] сумме аналогичных ошибок расчетов t по (8) и P по (9), т. е.

$$s_{\text{от}}(\delta) = s_{\text{от}}(t) + s_{\text{от}}(P). \quad (11)$$

Как уже было отмечено, $s_{\text{от}}(P) = 0,2\%$, а $s_{\text{от}}(t)$ может быть получено как значение абсолютной средней квадратической погрешности ($s = \pm 3,2^\circ\text{К}$) регрессии (8), деленной на температуру T°К, например, для середины последнего слоя ($z = 4,25$ км). Тогда, $s_{\text{от}}(t) = 3,2^\circ\text{К}/266,5^\circ\text{К} = 0,012$. Таким образом, по (11) имеем, что $s_{\text{от}}(\delta) = 0,014$ или $s_{\text{от}}(\delta) \approx 1,5\%$. Для прикладных климатических расчетов это весьма высокая точность, что еще раз подтверждает практическую надежность предлагаемой методики расчета среднегодовых значений плотностей ρ и δ для горной территории Кыргызстана.

2. Высотные зависимости средней годовой длительности погод сухой снег и дождь. В климатических справочниках [3, 4] по станциям приводятся только данные об общей годовой длительности всех видов осадков ΣQ_p , без подразделения их на твердые, жидкие и смешанные, т. е. без дифференциации их на осадки, относящиеся к выделенным нами типам – сухой снег и дождь. Чтобы иметь возможность воспользоваться данными справочников для построения высотных зависимостей длительности погод с осадками сухой снег и дождь, надо сначала оценить высотную зависимость общей годовой длительности всех видов осадков $\Sigma Q_i(z)$, а затем каким-то образом расщепить эту зависимость на две, относящиеся к сухому снегу и дождю.

На рисунке 1 показана корреляционная высотная зависимость $\Sigma Q_i(z)$, построенная по данным 11 метеостанций Кыргызстана [3, 4], расположенным в диапазоне высот 0,76–3,64 км в подгорных равнинах, склоновых долинах и межгорных долинах и котловинах. Там же показан найденный график высотной линейной регрессии:

$$\Sigma Q_i = 94,858z + 597,6 \pm 154, \quad (12)$$

где ΣQ_i , ч – общая годовая длительность всех видов осадков; z , км – высота; $s = \pm 154$ ч.

Регрессии (12) соответствует коэффициент корреляции $r = 0,53$, она значима на уровне доверительной вероятности $p = 0,90$ и поэтому может быть использована на практике. В таблице 2 приведены полученные по (12) оценки общей годовой осадков ΣQ_i в Кыргызстане для средин стандартных слоев. Как видно из этих данных, общая длительность в году всех погод с осадками увеличивается с высотой с вертикальным градиентом, равным 94,86 ч/км, принимая значения от 669 ч в подгорных равнинах ($z = 0,75$ км) до 950–1000 ч в гребневых зонах хребтов ($z = 3,75$ – $4,25$ км).

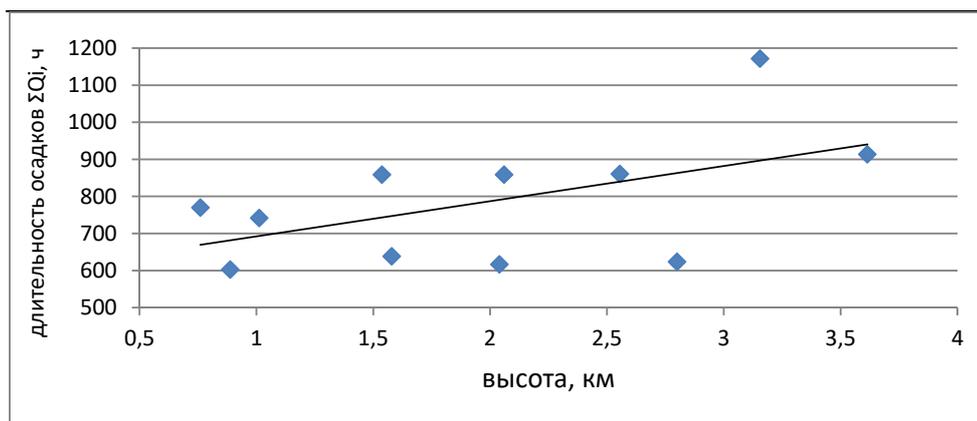


Рисунок 1 – График высотной корреляционной зависимости общей годовой длительности всех видов осадков ΣQ_i (ч) по многолетним данным 11 метеостанций Кыргызстана с линией линейной регрессии

Таблица 2 – Рассчитанные по (12) суммарные длительности осадков в году (ΣQ_i , ч) в Кыргызстане на высотах середин стандартных слоев

z, км	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25
ΣQ_i , ч	669	716	764	811	858	906	953	1001

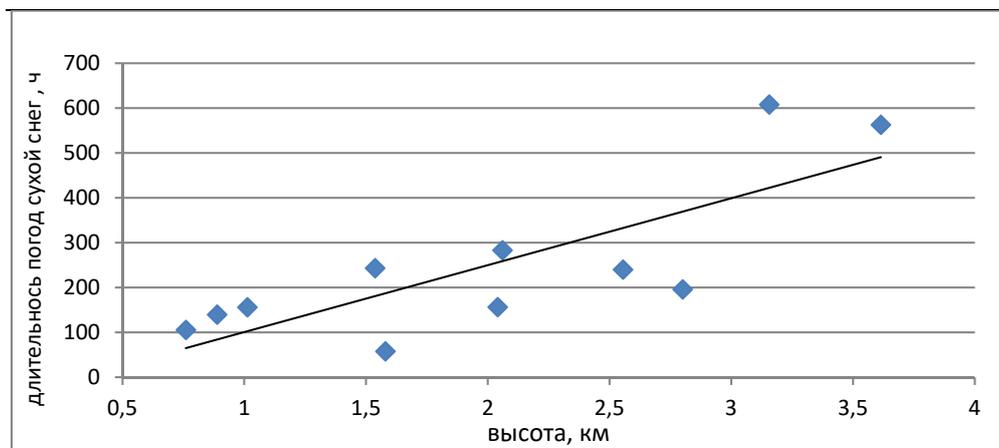


Рисунок 2 – График высотной корреляционной зависимости годовой длительности погод сухой снег $Q_{сс}$ (ч), по многолетним данным 11 метеостанций Кыргызстана с линией линейной регрессии

Хотя в климатических справочниках нет данных о длительности погод, относящихся к типу сухой снег (снег, метели, снежная крупа, снежные зёрна и ледяные иглы) и дождь (все виды дождей, морось, а также мокрый снег и снег с дождем), но в них приводятся годовые суммы этих типов осадков. Если предположить, что годовые длительности погод с сухим снегом и дождями пропорциональны годовым суммам [3, 4, 8] этих видов осадков (что вполне правдоподобно), то это открывает возможность расслоения выборки интегральной годовой длительности погод с осадками на две: выборку длительностей погод с сухим снегом и выборку длительностей погод с дождями. Именно этот подход как единственно возможный в данном случае и был использован в настоящей работе.

На рисунке 2 приведена полученная таким путем высотная корреляционная зависимость годовой продолжительности погод с сухим снегом – Q_{cc} от высоты места, полученная по тем же 11 метеостанциям Кыргызстана, что и на рисунке 1. Ей соответствует статистически значимая (доверительная вероятность $p = 0,95$) линейная регрессия с $r = 0,80$ и угловым коэффициентом, равным $149,03$ ч/км:

$$Q_{cc} = 149,03z - 47,87 \pm 114, \quad (13)$$

где Q_{cc} , ч – годовая длительность погод сухой снег; z , км – высота места; $s = \pm 114$ ч.

Если все слагаемые уравнения (13) разделить на 8760 ч, то получим относительную высотную зависимость для годовой длительности погод сухого снега (14), выраженную в долях единицы:

$$\Psi_{cc} = 0,0170z - 0,0055 \pm 0,013, \quad (14)$$

где Ψ_{cc} соответствует выражению (1).

Во второй и третьей строках таблицы 3 приведены рассчитанные по (13) и (14) значения Q_{cc} и Ψ_{cc} для средин стандартных слоев для территории Кыргызстана. Из этих данных видно, что, как и следовало ожидать, длительность погод с сухим снегом Q_{cc} , существенно (в 8 раз) возрастает с высотой, принимая значения от 64 ч на $z = 0,75$ км (подгорные равнины) до 586 ч на $z = 4,25$ км (гребневая зона высоких хребтов). Аналогично относительные значения длительностей погоды сухой снег – Ψ_{cc} принимают на этих высотах соответственно значения $0,007$ и $0,067$.

Таблица 3 – Рассчитанные по высотным зависимостям оценки длительности погод с сухим снегом и дождем в Кыргызстане для высот средин стандартных слоев

z , км	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25
Q_{cc} , ч	64	138	213	287	362	437	511	586
Ψ_{cc}	0,007	0,016	0,024	0,033	0,041	0,050	0,058	0,067
Q_d , ч	605	578	551	524	496	469	442	415
Ψ_d	0,069	0,066	0,063	0,060	0,057	0,054	0,050	0,047

Высотную зависимость для годовой длительности погод с дождем Q_d (ч) следует определить как разность (12) и (13), что дает уравнение:

$$Q_d = -54,172z + 645,47 \pm 104, \quad (15)$$

где Q_d , ч – годовая длительность погод с дождем; z , км – высота места; $s = \pm 104$ ч.

Соответствующая (15) относительная зависимость этих погод Ψ_d будет иметь вид:

$$\Psi_d = -0,0062z + 0,0737 \pm 0,012, \quad (16)$$

где Ψ_d в долях единицы; z , км – высота места.

Рассчитанные по (15) и (16) значения Q_d и Ψ_d для средин стандартных слоев для территории Кыргызстана, приведены в двух последних строках таблицы 3. Как и следовало ожидать, в отличие от Q_{cc} , длительность погод дождь Q_d убывает с высотой с вертикальным градиентом $-54,172$ ч/км. Так, если на высотах подгорных равнин на $z = 0,75$ км значение $Q_d = 605$ ч, то в гребневой зоне высоких

хребтов на $z = 4,25$ км оно уменьшается до 415 часов. Для относительных длительностей Ψ_d эти величины соответственно равны 0,069 и 0,047.

Полученные уравнения (13)–(16) рекомендуются нами в качестве оценочных высотных зависимостей для определения длительностей погод с сухим снегом и дождем при расчете потерь мощности на корону на территории Кыргызстана.

3. Высотные зависимости средней годовой длительности погод с изморозью. Для получения уравнения высотной зависимости средней годовой длительности погод с изморозью ($Q_{из}$ и $\Psi_{из}$) в Кыргызстане были использованы предварительно найденные по специально сделанным выборкам следующие длительности таких погод на высотах от 0,5 до 3,5 км, которые приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Оценки средних многолетних значений длительностей погод с изморозью в Кыргызстане на различных высотах, найденные по данным метеостанций

z , км	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
$Q_{из}$, ч	350	368	333	315	289	245	245
$\Psi_{из}$	0,040	0,042	0,038	0,036	0,033	0,028	0,028

Из данных таблицы 4 следует, что в целом для Кыргызстана среднее значение длительности погод с изморозью $Q_{из}$ сначала несколько возрастает с высотой в подгорных равнинах от 350 ч ($z = 0,5$ км) до 368 ч в зоне подножий хребтов ($z = 1$ км), а затем плавно убывает к их гребневым зонам до 245 ч (высоты 3–3,5 км). Соответственно в относительной форме $\Psi_{из}$ эти цифры будут равны 0,040, 0,042 и 0,028. Такая закономерность изменения длительности погод с изморозью с высотой объясняется тем обстоятельством, что по частоте случаев в году преобладают отложения кристаллической изморози. Именно они вносят основной вклад в общую годовую длительность погод типа $\Psi_{из}$. Кристаллическая изморозь чаще всего возникает за счет орографических условий в днищах подгорных долин и котловин при ночных радиационных понижениях температуры. При этом, напротив, наибольшие массы гололедных осадков наблюдаются при отложениях плотной изморози, которые растут с высотой, достигая максимальных значений на гребнях хребтов [4]. Однако частота таких интенсивных отложений мала.

Нелинейные высотные зависимости длительностей погод с изморозью $Q_{из}$ и $\Psi_{из}$ по данным таблицы 4 могут быть достаточно хорошо описаны интерполяционными параболическими уравнениями 2-го порядка:

$$Q_{из} = -7,0914z^2 - 14,809z + 371,67, \quad (17)$$

$$\Psi_{из} = -0,0008z^2 - 0,0008z + 0,0416, \quad (18)$$

где $Q_{из}$ – годовая длительность погод с изморозью, ч; $\Psi_{из}$ то же в долях единицы; z , км – высота места.

В таблице 5 приведены рассчитанные по (17) и (18) оценки $Q_{из}$ и $\Psi_{из}$ для высот средин слоев стандартных слоев.

Таблица 5 – Оценки средних годовых значений $Q_{из}$ и $\Psi_{из}$ в Кыргызстане по (17) и (18) для высот средин слоев стандартных слоев

z , км	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25
$Q_{из}$, ч	357	342	324	302	277	249	216	181
$\Psi_{из}$	0,041	0,039	0,037	0,035	0,032	0,028	0,025	0,021

Полученные уравнения (17), (18) и расчетные данные таблицы 5 рекомендуются нами в качестве оценочных для определения длительностей погод с изморозью при расчете потерь мощности на корону на территории Кыргызстана.

После того, как относительные длительности погод с сухим снегом Ψ_{cc} , дождем Ψ_d и изморозью $\Psi_{из}$ определены для каждого участка трассы горной ЛЭП по предлагаемым выше высотным зависимостям, относительная длительность хорошей погоды для каждого из них $\Psi_{хп}$ легко находится по уравнению (7).

Выводы. Плотность воздуха, а также годовая длительность неблагоприятных типов погод – сухой снег, дождь и изморозь, – существенно повышающих коронирование проводов высоковольтных ЛЭП для горной территории Кыргызстана, в значительной мере определяются высотой места. Найденные оценочные высотные зависимости этих климатических показателей для Кыргызстана позволяют выполнять расчеты потери мощности на корону для различных по высоте участков трасс горных ЛЭП. Предлагаемые методические решения по нахождению высотных зависимостей плотности воздуха и различных типов погод могут быть использованы для других горных регионов.

Поступила: 17.06.22; рецензирована: 01.07.22; принята: 04.07.22.

Литература

1. Руководящие указания по учету потерь мощности на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ. М.: ОРГРЭС, 1975. 35 с.
2. Тиходеев Н.Н. Вопросы изоляции и короны применительно к высокогорным линиям 500 кВ / Н.Н. Тиходеев // Проблемы высокогорной электротехники. Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1961. С. 129–149.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 32. Киргизская ССР. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 375 с.
4. Справочник по климату СССР. Вып. 32. Киргизская ССР. Часть 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 307 с.
5. Подрезов О.А. Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызстана / О.А. Подрезов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2014. 170 с.
6. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.
7. Закс Л. Статистическое оценивание / Л. Закс; пер. с нем. В.Н. Варыгина. М.: Изд-во Статистика, 1976. 599 с.
8. Рыскаль М.О. Осадки на территории Кыргызстана по данным спутниковых наблюдений / М.О. Рыскаль, О.А. Подрезов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2021. 116 с.