

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-422-432>

УДК 621.316

Оценка воздействия кабельных линий электропередачи на окружающую среду

М. А. Короткевич¹⁾, С. Н. Азаров²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Филиал «ТЭЦ-5» РУП «Минскэнерго» (Минская область, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассмотрено тепловое воздействие кабельных линий электропередачи и конструктивных материалов кабелей на окружающую среду. Количественная оценка теплового воздействия электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на окружающую среду проведена с помощью программы Elcut. Анализ температурного поля вблизи нагруженной кабельной линии напряжением 10 кВ показал высокие значения температуры почвы, что негативно сказывается на ее окислительно-восстановительном потенциале и живых организмах. Для оценки воздействия электрических кабелей на окружающую среду был разработан подход, учитывающий не только токсичность материалов, но и их объемное содержание в кабеле. Кабели с традиционной бумажно-масляной изоляцией наносят больший ущерб окружающей среде, чем линии с изоляцией из сшитого полиэтилена. Окружающая среда, в свою очередь, также оказывает влияние на электрические кабели: от температуры окружающей среды зависят значения длительно допустимых токов нагрузки (при прокладке на открытом воздухе, в земляной траншее или в кабельных помещениях). Выполнена оценка воздействия солнечной радиации на тепловой режим электрического кабеля. Сопоставительный анализ комплексного воздействия на окружающую среду электрических кабелей с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена показал, что небронированный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ (независимо от типа его оболочки) наносит меньший ущерб окружающей среде, чем аналогичный традиционный кабель на всем рассматриваемом диапазоне соотношения температур на их поверхностях.

Ключевые слова: кабельные линии электропередачи, окружающая среда, тепловой режим, материалы электрических кабелей, традиционная бумажно-масляная изоляция, изоляция из сшитого полиэтилена, ущерб окружающей среде

Для цитирования: Короткевич, М. А. Оценка воздействия кабельных линий электропередачи на окружающую среду / М. А. Короткевич, С. Н. Азаров // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 5. С. 422–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-422-432>

Адрес для переписки

Короткевич Михаил Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

Address for correspondence

Korotkevich Mishail A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

The Evaluation of Impact of Cable Power Lines on the Environment

M. A. Korotkevich¹⁾, S. N. Azarov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Branch "CHP-5" of the Republican Unitary Enterprise "Minskenergo" (Minsk Region, Republic of Belarus)

Abstract. The thermal impact of cable power lines and structural materials of cables on the environment has been considered. A quantitative evaluation of the thermal impact of electrical cables with cross-linked polyethylene insulation on the environment was carried out using the Elcut program. Analysis of the temperature field near the loaded cable line of 10 kV demonstrated high values of soil temperature that negatively affects its redox potential and living organisms. To evaluate the environmental impact of electrical cable materials, an approach has been developed that takes into account not only the toxicity of the materials but also their volumetric content in the cable. Cable lines with cables with traditional paper-oil insulation cause more damage to the environment than cable lines with cables, insulated with crosslinked polyethylene. The environment, in turn, also has an impact on the electrical cables: the values of long-term permissible load currents depend on the ambient temperature (when laying cables in the open air, in an earthen trench or in cable rooms). The impact of solar radiation on the thermal conditions of the electric cable is estimated. A comparative analysis of the complex environmental impact of electric cables with traditional insulation and insulation of crosslinked polyethylene demonstrated that unarmored cable with crosslinked polyethylene insulation at a voltage of 10 kV (regardless of the type of its shell) causes less damage to the environment than the same traditional cable throughout the considered temperature range on their surfaces.

Keywords: cable power transmission lines, environment, thermal conditions, materials of electric cables, traditional paper-oil insulation, XLPE insulation, damage to the environment

For citation: Korotkevich M. A., Azarov S. N. (2019) The Evaluation of Impact of Cable Power Lines on the Environment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (5) 422–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-62-5-422-432> (in Russian)

Введение

Кабельные линии оказывают тепловое (от нагрева кабеля электрическим током) и химическое (от материалов кабеля) воздействие на окружающую среду. Последняя воздействием отрицательных и положительных температур, влаги, растворов щелочи и кислот, ультрафиолетового спектра солнечного излучения, кислорода воздуха, в свою очередь, оказывает негативное влияние на конструкцию и параметры электрических кабелей.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена с допустимой температурой нагрева их жил 90 °С создают более значительное тепловое воздействие на окружающую среду, чем кабели с традиционной изоляцией, имеющие допустимую температуру нагрева их жил 70 °С. Однако кабели с бумажно-масляной изоляцией в своем составе содержат свинец и кабельное масло, относящиеся к III группе по опасному уровню воздействия на окружающую среду (табл. 1). Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющие полиэтиленовые или поливинилхлоридные оболочки, относятся соответственно к среднетоксичным (II группа) или токсичным (III группа) материалам (табл. 1) по опасному уровню воздействия на окружающую среду. В настоящее время отсутствует методика для количественной оцен-

ки воздействия материалов электрических кабелей на окружающую среду. Разработанный подход учитывает не только токсичность материалов, но и их объемное содержание в электрических кабелях.

Таблица 1

Влияние материалов электрических кабелей на окружающую среду
The influence of materials of electric cables on the environment

Уровень воздействия на окружающую среду	Низкий	Средний	Высокий
Материал силового электрического кабеля	Алюминий, хлопок, сухая бумага	Полиэтилен, медь, сталь, цинк, сшитый полиэтилен, силиконовые покрытия	Кабельные масла, поливинилхлорид, фторопласты, свинец
Коэффициент воздействия	$K_b^{\text{низ}} = 1$	$K_b^{\text{сп}} = 2$	$K_b^{\text{выс}} = 3$

Оценим основные факторы, оказывающие наиболее существенное влияние окружающей среды на электрические кабели и кабелей на окружающую среду.

Оценка теплового воздействия кабельных линий электропередачи на окружающую среду

Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена ток, проходящий в экране кабеля, в определенных случаях может быть сопоставим с током, протекающим в его жиле, что вызовет дополнительное тепловыделение в самом кабеле, увеличивая температуру на его поверхности [1, 2]. Для оценки теплового воздействия на окружающую среду необходимо знать распределение температуры вблизи кабельной линии. Для определения распределения температурного поля решается задача стационарной теплопередачи в линейной постановке на основании уравнения теплопроводности, которое имеет следующий вид для линейной задачи:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q, \quad (1)$$

где λ_x, λ_y – компоненты тензора теплопроводности в направлении осей координат x и y ; q – удельная мощность тепловыделения (в линейной постановке задачи – константа); T – температура.

В результате решения уравнения (1) с граничными условиями определяется температурное поле. Для выполнения данной задачи была использована программа Elcut [3], где создана модель кабельной линии с тремя небронированными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ, проложенными в плоскости в земляной траншее на глубине 0,7 м. Для жилы кабеля и его экрана заданы мощности тепловыделения. С целью корректного решения задачи теплопроводности необходимо задать минимум два граничных условия. Для данной модели установлены граничные условия конвективного теплообмена с поверхности почвы путем задания температуры воздуха на поверхности почвы 25 °С и коэффи-

циента теплоотдачи с поверхности почвы $0,1 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$, а также граничное условие заданной температуры (температура почвы $15 \text{ }^\circ\text{C}$). Результаты расчета представлены на рис. 1.

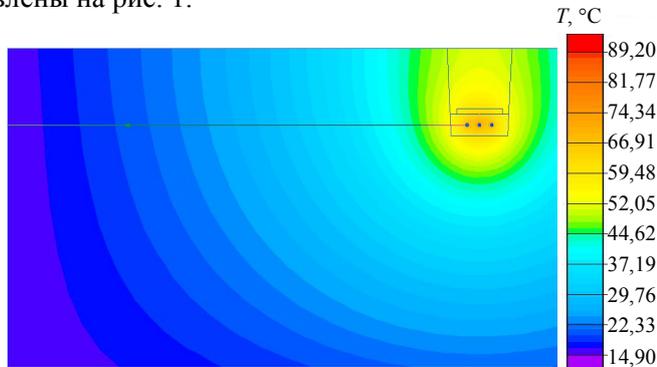


Рис. 1. Результаты теплового расчета кабельной линии напряжением 10 кВ

Fig. 1. Results of thermal calculation of 10 kV cable line

Температура жилы кабелей не превышает допустимые $90 \text{ }^\circ\text{C}$ и составляет для центрального кабеля $89,2 \text{ }^\circ\text{C}$, а для крайних – по $86,42 \text{ }^\circ\text{C}$. Средняя температура на поверхности оболочки центрального кабеля составит $71,402 \text{ }^\circ\text{C}$, что на $17,798 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем температура его токопроводящей жилы. В соответствии с направлением линии (рис. 1) распределение температуры будет следующим: от центра жилы крайнего левого кабеля на расстоянии $0,3 \text{ м}$ температура почвы составит $50,2 \text{ }^\circ\text{C}$, на расстоянии $0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8; 2,1; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,5; 3,9; 4,2; 4,5; 4,8; 5,0 \text{ м}$ температура почвы составит $43,8; 39,2; 35,6; 32,9; 30,2; 28; 26,2; 24,5; 22,9; 21,5; 20; 18,8; 17,7; 16,4; 15,3; 15 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно (рис. 2).

Температура почвы вблизи кабельной линии принимает достаточно высокие значения, что будет вызывать иссушение почвы вокруг линии, увеличивая концентрацию растворимых солей, например NaCl . С повышением температуры почвы на $10 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость химических реакций возрастает в два-три раза. Ввиду нагрева почвы электрическими кабелями идет снижение содержания в почве газов, в том числе и кислорода.

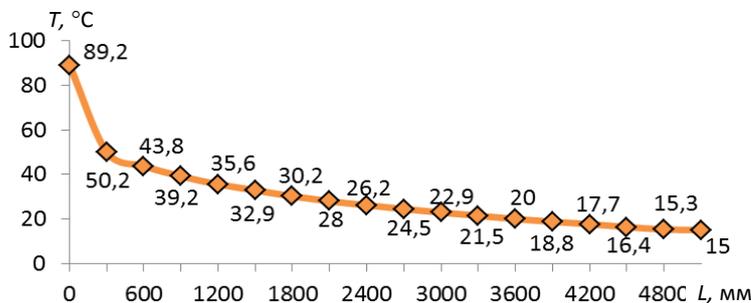


Рис. 2. Распределение температурного поля вблизи кабельной линии вдоль заданного направления

Fig. 2. Temperature field distribution near the cable line along a given direction

Это способствует формированию застойного гидрологического горизонта, что резко снизит окислительно-восстановительный потенциал почвы и ухудшит состояние растений вплоть до полной их гибели [4]. Живые организмы, находящиеся вблизи кабельной линии, подверженные воздействию повышенных температур и ухудшившие свои свойства, будут вынуждены мигрировать.

Оценка воздействия на окружающую среду материалов электрических кабелей

Для количественной оценки воздействия материалов электрических кабелей на окружающую среду был разработан подход, который основан на делении материалов электрических кабелей на три группы по уровню их воздействия на окружающую среду на материалы с низким, средним и высоким уровнями (табл. 1) [5].

Каждому из уровней был присвоен свой коэффициент воздействия K_v (табл. 1). Данный подход учитывает не только токсичность материалов кабелей, но и их объемное содержание на участке кабеля. Так, ущерб окружающей среде от медной жилы кабеля определяется в соответствии с выражением

$$y^j = K_v^{cp} V_{жилы}, \quad (2)$$

где $V_{жилы}$ – объемное содержание материала токопроводящей жилы в 1 м кабеля, мм³.

Отношение ущербов окружающей среде от кабелей с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжения 10 кВ имеет вид

$$\frac{y^{бми}}{y^{спз}} = \frac{y^j + y^{ф.и} + y^{п.и} + y^{св} + y^{п.бр} + y^{ст.бр} + y^{нар.п}}{y^j + y^{экр.ж} + y^{из} + y^{экр.и} + y^{р.сл} + y^{экр.пр} + y^{р.сл} + y^{об}}, \quad (3)$$

где $y^{спз}$, $y^{бми}$ – ущерб окружающей среде от материалов электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и бумажно-масляной изоляцией; y^j , $y^{ф.и}$, $y^{п.и}$, $y^{св}$, $y^{п.бр}$, $y^{ст.бр}$, $y^{нар.п}$ – то же от конструктивных элементов кабеля с бумажно-масляной изоляцией – жилы, фазной изоляции, поясной изоляции, свинцовой оболочки, подушки под броню, брони, наружного покрова; $y^{экр.ж}$, $y^{из}$, $y^{экр.и}$, $y^{р.сл}$, $y^{экр.пр}$, $y^{р.сл}$, $y^{об}$ – то же от конструктивных элементов кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена – жилы, экрана по жиле, изоляции, экрана по изоляции, разделительного слоя, экрана из медных проволок, разделительного слоя, оболочки.

Структура формулы (3) отражает, во сколько раз ущерб окружающей среде от материалов электрических кабелей с традиционной изоляцией превышает ущерб окружающей среде от материалов аналогичных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Результаты расчетов влияния материалов электрических кабелей напряжением 10 и 110 кВ на окружающую среду, с точки зрения применяемых материалов, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Отношение ущербов окружающей среде от материалов электрических кабелей с бумажно-масляной изоляцией по сравнению с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена
The ratio of environmental damages caused by materials of electric cables with paper-oil insulation compared with the one caused by cables with insulation of cross-linked polyethylene

$U_{\text{ном}}$ кВ	$U^{\text{бми}} / U^{\text{сп}}$							
	С полиэтиленовой оболочкой				С поливинилхлоридной оболочкой			
	Бронированный КСПЭ		Небронированный КСПЭ		Бронированный КСПЭ		Небронированный КСПЭ	
	Медная жила	Алюминиевая жила	Медная жила	Алюминиевая жила	Медная жила	Алюминиевая жила	Медная жила	Алюминиевая жила
10	1,539	1,587	1,954	2,064	1,349	1,376	1,659	1,722
110	1,436	1,447	1,672	1,692	1,314	1,321	1,522	1,535

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ в зависимости от наличия брони, материала жилы и типа оболочки будут оказывать меньшее влияние на окружающую среду по сравнению с линиями с традиционной изоляцией (до 2,064 раза). Для линий напряжением 110 кВ преимущество кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена достигает почти 1,7 раза.

Влияние окружающей среды на кабельные линии электропередачи

К основным факторам влияния окружающей среды на электрические кабели относят: влагу, воздействия тепловое, ультрафиолетового спектра солнечного излучения, кислорода воздуха, растворов щелочей и кислот, коррозионное [6]. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена характерно появление водных трингов в результате проникновения воды при диффузии через оболочку (нарушение целостности оболочки и соединительных муфт вдоль проволок токопроводящих жил). Для кабелей с традиционной изоляцией характерны коррозионные процессы разрушения металлических оболочек, а также защитных покровов в результате химического, механического и электрического воздействия окружающей среды, что приводит к потере герметичности, увлажнению бумажно-масляной изоляции, ухудшению электрических свойств кабелей [7].

Со стороны окружающей среды наблюдается тепловое воздействие на электрические кабели, вызывая деструкцию полимерных материалов и оказывая воздействие на тепловой режим кабеля, а значит, и на его пропускную способность. Так, для оценки воздействия параметров окружающей среды на тепловой режим электрических кабелей воспользуемся программой Elcut [8], в которой создана модель кабельной линии. При изменении температуры почвы на 10 °С (с 15 до 5 °С) температура жилы снизится на 8,8 °С (с 89,2 до 80,4 °С) при неизменной теплопроводности почвы (1,8 Вт/(К·м)). Следовательно, при снижении температуры почвы температура жилы кабеля при неизменной его нагрузке будет также снижаться. В результате представляется возможным увеличить токовую нагрузку

кабеля на такое значение, пока температура жилы не достигнет допустимой 90 °С. При уменьшении теплопроводности почвы на 0,6 Вт/(К·м) (с 1,8 до 1,2 Вт/(К·м)) температура жилы кабеля повысится на 25,1 °С (с 89,2 до 114,3 °С). В данных условиях температура жилы кабеля превышает допустимое значение. Для возврата ее в допустимые пределы необходимо снижать токовую нагрузку кабелей. Если этого не сделать, то возможен перегрев кабеля, т. е. превышение допустимой температуры нагрева его изоляции и последующий отказ.

Оценку влияния параметров окружающей среды на электрический кабель, прокладываемый на открытом воздухе, выполним также с помощью программы Elcut. Рассмотрим, каким образом будет изменяться температурный режим электрического кабеля при изменении температуры воздуха и коэффициента теплоотдачи с его поверхности. Заданы температура воздуха 25 °С и коэффициент теплоотдачи с поверхности кабеля 10 Вт/(К·м²). Результаты расчета для среднего кабеля представлены на рис. 3. Распределение температуры внутри электрического кабеля вдоль заданной линии (рис. 3) в зависимости от теплопроводностей материалов кабеля [9] отображает график на рис. 4. Прямой участок на рис. 4 соответствует температуре экрана из медных проволок, которая составит 72,2 °С в заданных условиях.

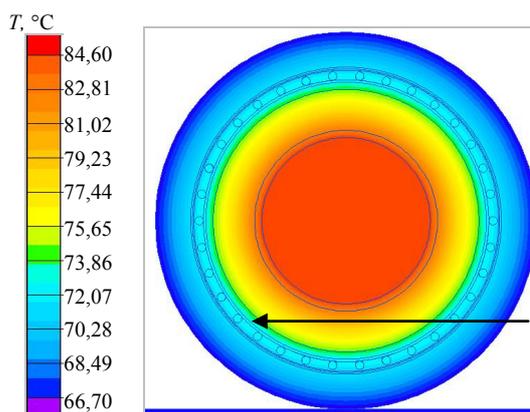


Рис. 3. Результаты теплового расчета для среднего кабеля при прокладке кабельной линии на открытом воздухе

Fig. 3. Results of thermal calculation for an average cable when laying the cable line in the open air

При изменении температуры окружающего воздуха на 15 °С (с 25 до 10 °С) температура жилы кабеля снизится аналогичным образом на 15 °С (с 84,6 до 69,6 °С). При уменьшении коэффициента теплоотдачи на 4 Вт/(К·м²) (с 10 до 6 Вт/(К·м²)) температура жилы кабеля повысится на 27,8 °С (с 84,6 до 112,4 °С). В данных условиях температура жилы превышает допустимое значение, следовательно, для возврата ее в допустимые пределы необходимо снижать токовую нагрузку кабелей. Задав температуру поглощающей поверхности кабеля 75 °С и коэффициент поглощения поверхности 0,8 [10], исследовалось влияние солнечной радиации на тепловой режим кабеля; в результате с учетом солнечной радиации температура жилы кабеля повысилась на 3,5 °С.

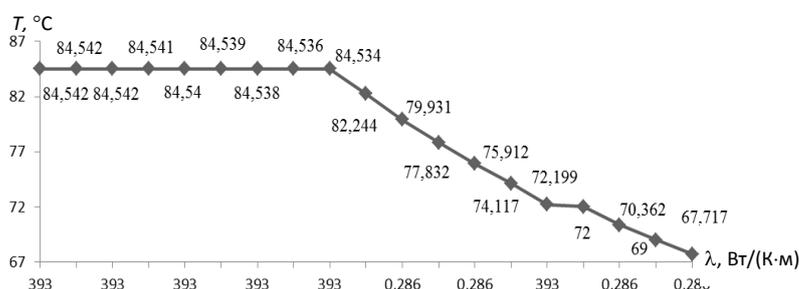


Рис. 4. Распределение температуры внутри электрического кабеля вдоль заданной линии

Fig. 4. Temperature distribution inside the electrical cable along a given line

Сопоставительный анализ воздействия на окружающую среду электрических кабелей с различной изоляцией

Большее тепловое воздействие на окружающую среду будут оказывать кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена ввиду их большей допустимой температуры нагрева токопроводящей жилы, а нагрев их экранов из медных проволок дополнительно повышает температуру на поверхности кабеля. Большее влияние на окружающую среду материалов электрических кабелей будут оказывать кабели с традиционной бумажно-масляной изоляцией за счет применения в них свинца и кабельного масла. Проведем сопоставительный анализ воздействия электрических кабелей с обоими видами изоляции на окружающую среду. Общий ущерб, наносимый окружающей среде кабельными линиями электропередачи, в относительных единицах может быть определен по формуле

$$Y_* = Y_*^{\text{тепл}} Y_*^{\text{матер}}, \quad (4)$$

где $Y_*^{\text{тепл}}$, $Y_*^{\text{матер}}$ – ущерб окружающей среде от теплового воздействия кабельных линий и материалов кабелей.

Формулу (4) приведем к виду

$$\frac{Y_{\text{бми}}}{Y_{\text{спз}}} = \frac{Y_{\text{бми}}^{\text{тепл}}}{Y_{\text{спз}}^{\text{тепл}}} \frac{Y_{\text{бми}}^{\text{матер}}}{Y_{\text{спз}}^{\text{матер}}}, \quad (5)$$

где $Y_{\text{бми}}^{\text{тепл}}$, $Y_{\text{спз}}^{\text{тепл}}$ – ущерб окружающей среде от теплового воздействия кабельных линий с кабелями с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена; $Y_{\text{бми}}^{\text{матер}}$, $Y_{\text{спз}}^{\text{матер}}$ – то же от материалов электрических кабелей с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена.

Рассматривать температуру на поверхности кабелей следует в некотором диапазоне, так как в течение суток она постоянно изменяется. Для проведения более корректного и полного сравнительного анализа примем превышение температуры на поверхности кабеля с изоляцией из

сшитого полиэтилена над температурой на поверхности кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 1,6; 1,5; 1,4; 1,3; 1,2; 1,1 раза. Для этих значений выполним расчеты по формуле (5), результаты которых представим в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ воздействия на окружающую среду кабелей с традиционной бумажно-масляной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена, в зависимости от соотношения температур на их поверхностях

Comparative analysis of the impact of cables with traditional paper-oil insulation and cross-linked polyethylene insulation on the environment depending on the temperature ratio on their surfaces

$U_{\text{ном}}$, кВ	$\frac{T_{\text{пов}}^{\text{спз}}, \text{ }^{\circ}\text{C}}{T_{\text{пов}}^{\text{бми}}, \text{ }^{\circ}\text{C}}$	$\frac{y_{\text{бми}}}{y_{\text{спз}}}$							
		С полиэтиленовой оболочкой				С поливинилхлоридной оболочкой			
		Бронированный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена		Небронированный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена		Бронированный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена		Небронированный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена	
		Медная жила	Алюминиевая жила	Медная жила	Алюминиевая жила	Медная жила	Алюминиевая жила	Медная жила	Алюминиевая жила
10	1,6	0,962	0,992	1,221	1,290	0,843	0,860	1,037	1,076
	1,5	1,027	1,059	1,303	1,377	0,90	0,918	1,107	1,149
	1,4	1,099	1,133	1,395	1,474	0,963	0,982	1,185	1,230
	1,3	1,183	1,220	1,503	1,587	1,037	1,058	1,276	1,324
	1,2	1,251	1,290	1,589	1,678	1,097	1,119	1,349	1,40
	1,1	1,399	1,443	1,776	1,876	1,226	1,251	1,508	1,565
110	1,6	0,897	0,904	1,045	1,057	0,821	0,826	0,951	0,959
	1,5	0,958	0,965	1,115	1,129	0,876	0,881	1,015	1,024
	1,4	1,025	1,033	1,194	1,208	0,938	0,943	1,087	1,096
	1,3	1,104	1,113	1,286	1,301	1,010	1,016	1,170	1,180
	1,2	1,167	1,176	1,359	1,376	1,068	1,074	1,237	1,248
	1,1	1,305	1,315	1,520	1,538	1,194	1,201	1,383	1,395

Ущерб окружающей среде от кабельных линий напряжением 10 кВ с небронированными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена (независимо от типа их оболочки) будет меньше, чем от линии с аналогичными кабелями с традиционной бумажно-масляной изоляцией на всем рассматриваемом диапазоне соотношения температур на их поверхностях (1,1–1,6 раза). Линии с бронированными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена в поливинилхлоридной оболочке будут наносить меньший ущерб окружающей среде, чем линии с аналогичными кабелями с традиционной изоляцией, пока температура на их поверхности будет не более чем в 1,35 раза выше температуры на поверхности традиционных кабелей, а в случае с полиэтиленовой оболочкой – не более чем в 1,55 раза.

Кабельные линии напряжением 110 кВ с небронированными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена и полиэтиленовой оболочкой будут наносить меньший ущерб окружающей среде по сравнению с аналогичными линиями с кабелями с традиционной изоляцией на всем рассматриваемом диапазоне соотношения температур. Если материал оболочки поливинилхлорид, то меньший ущерб окружающей среде по сравнению с линией с традиционными кабелями будет, пока температура на поверхностях кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена не превысит более чем в 1,5 раза температуру на поверхностях традиционных кабелей.

Ущерб окружающей среде от линий с бронированными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110 кВ в поливинилхлоридной или полиэтиленовой оболочке по сравнению с аналогичными линиями с кабелями с традиционной изоляцией будет меньше, пока температура на их поверхностях будет не более чем в 1,3 и 1,4 раза соответственно выше, чем на поверхностях аналогичных традиционных кабелей.

ВЫВОДЫ

1. Большее тепловое воздействие на окружающую среду будут оказывать электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, чем традиционные кабели.

2. Воздействие на окружающую среду материалов электрических кабелей на напряжение 10 и 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена меньше, чем традиционных кабелей, в 2 и 1,7 раза соответственно.

3. Определено, что при уменьшении теплопроводности почвы на 0,6 Вт/(К·м) (с 1,8 до 1,2 Вт/(К·м)) температура жилы кабеля повысится на 25,1 °С (с 89,2 до 114,3 °С). При уменьшении коэффициента теплоотдачи с поверхности кабеля, проложенного на открытом воздухе, на 4 Вт/(К·м²) (с 10 до 6 Вт/(К·м²)) температура жилы кабеля повышается на 27,8 °С (с 84,6 до 112,4 °С). Солнечная радиация повышает температуру жилы кабеля на 3,5 °С.

4. Проведен сопоставительный анализ комплексного влияния на окружающую среду линий электропередачи с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена и кабелями с традиционной бумажно-масляной изоляцией. Оказалось, что кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ наносят меньший ущерб окружающей среде при превышении температуры на их поверхностях от 1,1 до 1,35 раза по сравнению с температурой на поверхностях аналогичных традиционных кабелей с бумажно-масляной изоляцией, а для линий напряжением 110 кВ – при превышении температур от 1,1 до 1,3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2005. 364 с.
2. Силовые кабельные линии напряжением 6–110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки: ТКП 611–2017 (33240). Введ. 28.07.2017. Минск: Минскэнерго, 2017. 146 с.

3. Elcut. Новый подход к моделированию полей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elcut.ru/>. Дата доступа: 28.11.2018.
4. Белорусская государственная сельскохозяйственная академия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.baa.by/>. Дата доступа: 28.11.2018.
5. Мещанов, И. А. Экологические аспекты кабельного производства / И. А. Мещанов // Кабели и провода. 2000. № 5. С. 1–6.
6. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 2 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голлумузов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 505–522. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522>.
7. Malmedal, K. The Effect of Underground Cable Diameter on Soil Drying, Soil Thermal Resistivity and Thermal Stability / K. Malmedal, C. Bates, D. Cain // IEEE Green Technologies Conference, Kansas City, 2016. P. 35–39.
8. Elcut. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов: Версия 6.3.1. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elcut.ru/downloads/manual_r_rocket.pdf. Дата доступа: 28.11.2018.
9. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 2–1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления: ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009. Введ. 26.06.2009. М.: Федер. аг-тво по технич. регулир. и метрологии, 2009. 30 с.
10. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: БНТУ, 2016. 68 с.

Поступила 26.02.2019 Подписана в печать 10.05.2019 Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Korotkevich M. A. (2005) *Operation of Electrical Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 364 (in Russian).
2. TCP 611–2017 (33240). *Power Cable Lines of 6–110 kV. Design Standards for Installing Cables with Insulation of Cross-Linked Peroxide Crosslinking Polyethylene*. Minsk, Minskenergo, 2017. 146 (in Russian).
3. *QuickField. A New Approach to Field Modeling*. Available at: <https://quickfield.com/>. (Accessed 28 November 2018) (in Russian).
4. *Belarusian State Agricultural Academy*. Available at: <http://www.baa.by/en/> (Accessed 28 November 2018) (in Russian).
5. Meshchanov I. A. (2000) Environmental Aspects of Cable Production. *Kabeli i Provoda = Cables and Wires*, (5), 1–6 (in Russian).
6. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 2. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 505–522 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522>.
7. Malmedal K., Bates C., Cain D. (2016) The Effect of Underground Cable Diameter on Soil Drying, Soil Thermal Resistivity and Thermal Stability. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. Kansas City, 35–39. <https://doi.org/10.1109/greentech.2016.14>.
8. *Elcut. Modeling of Electromagnetic, Thermal and Elastic Fields by the Finite Element Method: Version 6.3.1. User's Manual*. Available at: https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf. (Accessed 28 November 2018) (in Russian).
9. State Standard R IEC 60287-2-1–2009. *Electric Cables. Calculation of Current Rating. Part 2–1. Thermal Resistance. Calculation of Thermal Resistance*. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2009. 30 (in Russian).
10. Korotkevich M. A. (2016) *Installation of Electrical Networks*. Minsk, BNTU. 68 (in Russian).

Received: 26 February 2019 Accepted: 10 May 2019 Published online: 30 September 2019