
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.315.175

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ
ЮЖНОГО РЕГИОНА**

© 2020 Е.С. Молошная, И.В. Мельников, В.Н. Козоброд

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

Актуальность плавки гололеда на воздушных линиях обусловлена значительным увеличением их протяжённости в электроэнергетической системе Южного региона в условиях эксплуатации 4-х блоков Ростовской АЭС. Произведён анализ различных методов борьбы с обледенением на воздушных линиях электропередачи напряжением 110-220 кВ, на основе которого даны рекомендации по их применению в данных климатических условиях.

Ключевые слова: ледообразование, обрыв проводов, аварии, плавка гололеда, короткое замыкание, электротермическое и электромеханическое воздействие, вибрация проводов.

Поступила в редакцию 14.02.2020

После доработки 19.03.2020

Принята к публикации 26.03.2020

В отличие от кабельных, воздушные линии больше всего подвержены влиянию различных природных явлений (грозовые перенапряжения, прямые удары молний, ветровая нагрузка, образование на проводах льда и прочее). Все эти явления не только снижают надёжность электроснабжения потребителей, но и являются прямой причиной аварий, крупных ущербов предприятий и экономики в целом [1].

Проблема борьбы с обледенением проводов линий электропередачи (рис.1) общеизвестна и весьма актуальна. В условиях эксплуатации Ростовской АЭС, 4 блока которой мощностью по 1000 мВт обеспечивают электроэнергией потребителей, расположенных в радиусе нескольких сотен километров. Это Ставропольские и Краснодарские края, Республика Крым, Астраханская, Волгоградская, Ростовская области, для климатических условий которых характерны повышенная влажность, ветры, внезапное падение температуры. Это обуславливает причины нежелательных последствий ледообразования на проводах воздушных линий. Ледяные отложения увеличивают вес провода в несколько раз, а толщина ледяного слоя иногда достигает 100 мм. Ледяной покров вызывает дополнительную механическую нагрузку на все элементы воздушных линий.



(a)



(б)

Рисунок 1 – Гололедные отложения: а) ВЛ 220кВ РoАЭС-Волгодонск II цепь, б) ВЛ 110кВ Зимовники-Ремонтное [Glazed blankets: a) VL 220kV RoNPP-Volgodonsk II circuit, b) VL 110kV Zimovniki-Remontnoye]

При значительных отложениях льда обрываются провода, происходят разрушения изоляторов и даже опор линий электропередачи. Ледяные отложения по всей длине линии могут быть довольно неравномерными [2]. В результате сетевая электроэнергетическая компания и потребители несут большие потери. Ремонт и восстановление линии электропередачи – это дорогостоящий и длительный процесс, это обуславливает важность проблемы выбора оптимального способа плавки гололеда.

Исследования показывают, что гололедные отложения на проводах воздушных линий происходят при температуре воздуха около минус 5°C и скорости ветра 5-10 м/с. Сильное влияние оказывает и влажность воздуха.

Физический процесс прост: капли воды из окружающего воздуха осаждаются и замерзают на поверхности проводов. Именно так и образуется иней и наледь (рис. 2).

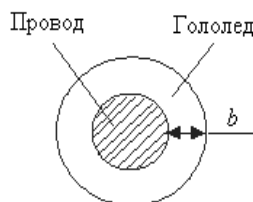


Рисунок 2 – Идеализированное представление гололеда на проводах
[An idealized view of ice on wires]

Существует несколько способов плавки гололеда, которые применяются в зависимости от конкретных условий [3]. На малых участках воздушных линий проводится непосредственно механическое удаление льда. Для этого используются шесты из бакелита, стекловолокна и другого изоляционного материала. Однако этот метод требует участия большого числа рабочих, много времени и далеко не всегда технически применим. Используется в сельской местности на тупиковых подстанциях небольшой мощности.

В 2008 г. был предложен новый способ борьбы с обледенением линий электропередач. Способ заключается в том, что, не отключая линию, на нее подается высокочастотный ток (50÷500 МГц), который нагревает провод. Для высокочастотной компоненты тока возникает так называемый «скин-эффект» или поверхностный эффект. Протекающий по проводу ток смещается к внешнему слою проводника и разогревает его, что приводит к устранению ледяного покрова. Данный способ предполагает применение преобразователей частоты и иного специального оборудования [4].

Толщина слоя, по которому может проходить ток рассчитывается по формуле (1):

$$\delta(f) = 10^{-3} \sqrt{\frac{\sigma}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f}}, \quad (1)$$

где σ – удельное сопротивление при постоянном токе;

μ_0 – магнитная постоянная;

μ – относительная магнитная проницаемость;

f – частота.

Утончение пути прохождения тока с возрастанием частоты ведет к увеличению сопротивления той части проводника, по которой течет ток (по сути это тонкостенная трубка). То есть, при одинаковой величине проходящего тока, чем выше частота сигнала, тем выше тепловая мощность проводника. Было показано, что такой метод требует около 2-х Ватт на 1 м провода, чтобы избежать образования льда. Однако имеются следующие недостатки:

- необходимость непрерывного прогрева проводов для предотвращения обледенения;

- большая стоимость высокочастотных источников питания требуемой мощности;
- реализация данного способа возможна только при использовании частот диапазоном 87,5...108 МГц, так как при других частотах это может привести к возникновению помех и даже к невозможности создания ОВЧ-радиосвязи и УВЧ-связи для различных экстренных служб;
- эффективность этого метода значительно понижается из-за использования для высоковольтных линий электропередачи многопроволочных проводов, так как уменьшается скин-эффект.

Пассивной мерой борьбы с обледенением можно считать использование высокопрочных проводов. По сути, это не борьба с гололедом как таковая, а повышение механического сопротивления провода и, следовательно, увеличение допустимой толщины льда. Повышение прочностных характеристик современных проводов происходит, в основном, за счет использования новых композитных материалов. Такие провода могут выдерживать большие нагрузки, по сравнению со стандартным сталеалюминевым проводом, и могут противостоять критическому воздействию, оказываемому на них льдом. Однако следует отметить, что прочность таких проводов не бесконечна, а значит, использование данного метода в регионе с интенсивным гололедообразованием может быть неэффективным, а в некоторых случаях вообще невозможным.

Одним из наиболее известных типов высокопрочных проводов являются провода и кабели с несущим сердечником из композитного материала. Общеизвестно, что стандартные стальные сердечники перегреваются при пиковых электрических нагрузках, а это, в свою очередь, приводит к растяжению провода и его провисанию ниже допустимого уровня. Напротив, провод с сердечником из композитов имеет более низкий коэффициент теплового расширения и поэтому они менее чувствительны к тепловому расширению, чем проводники со стальными сердечниками. Путем замены провода со стальным сердечником на провод с композитными материалами можно в разы увеличить пропускную способность линий.

Производители провода утверждают, что можно вдвое увеличить количество энергии в линии без риска образования провеса и обрыва проводов. Учитывая основные свойства композитных материалов (высокое отношение прочности к массе и небольшая величина провисания) можно увеличить промежуток между опорами, посредством уменьшения количества опор в линии на 15%. Реализация этого преимущества, конечно, возможна только при проектировании и вводе в эксплуатацию новых линий электропередач. Реконструкция старой электропроводки связана со значительными затратами. Обратим внимание на то, что стоимость таких композитных проводов все еще значительно выше, чем обычных.

Для борьбы с обледенением используют роботизированные устройства: маленькие мобильные роботы, путешествующие по проводам высоковольтных линий электропередач и выполняющие ряд простых операций, включая удаление льда. Существует образец такого робота (LineScout, Канада), который может перемещаться, маневрируя по линиям электропередачи и предоставляя информацию о состоянии линий [5]. Эксперты дистанционно управляют роботами, находясь на земле, чтобы они могли обнаружить повреждения, удалить лед с провода и выполнить простые операции по ремонту. Этот метод позволяет снизить риск, обеспечить бесперебойную работу и повысить безопасность людей. Преимущество робота LineScout – это возможность управления им в режиме реального времени. Однако есть и недостатки:

- необходимость участие вспомогательного персонала, а также специального оборудования (высотные рабочие машины) для установки робота на провода и управление им;

- протяженные линии требуют большое количество роботов и соответственно обслуживающего персонала;
- невысокая автономность работы и сложности в ремонте.

Плавка гололеда на проводах воздушных линий электропередач в условиях КЗ.

Основной путь борьбы со льдом при эксплуатации протяженных воздушных линий – это его таяние за счет проходящего тока, который нагревает провод. Учитывая большую протяженность высоковольтных воздушных линий в Южном регионе, этот метод достаточно эффективен, поскольку позволяет удалить десятки километров льда за 0,5-1 час, предотвращая опасные тяжелые нагрузки и устраняя «пляску» проводов.

Физика процесса плавки проста и ничем не отличается от работы любого нагревателя. Мощность, выделяемая на участке цепи с активным сопротивлением и протекающим током, определяется по формуле (2):

$$P = I^2 \cdot R, \quad (2)$$

где P – действующее значение активной мощности;

R – сопротивление;

I – действующее значение тока.

Выделяемое при нагревании тепло плавит гололед по всей длине проводов. Главное в этом способе – создание контура для протекания тока плавки. Чаще всего это искусственное короткое замыкание на отдельно выделенном участке линии. Существует достаточно большое количество схемных вариантов плавки гололеда [6], которые определяются схемой электрических сетей, нагрузкой потребителей, возможностью отключения линий и другими факторами (рис. 3).

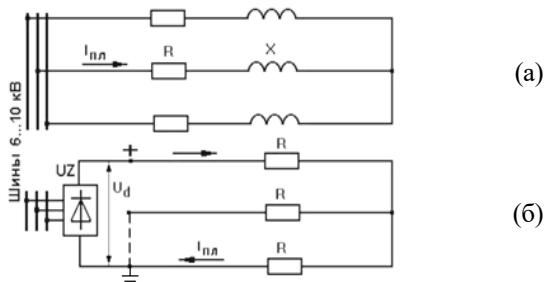


Рисунок 3 – Принципиальные схемы плавки гололеда переменным а) и выпрямленным б) током
[Schematic diagrams of ice melting with alternating a) and rectified b) current]

Способ заключается в том, что начало проводов воздушной линии подключается к источнику питания 6-10 кВ, а концы линии замыкаются накоротко [7]. Для высоковольтных линий на подстанциях устанавливается отдельный трансформатор с выходом 6-10 кВ, если нет соответствующего распределительного устройства плавка гололеда. Плавка на переменном токе имеет свои ограничения. Значение тока, протекающего по замкнутому контуру согласно закону Ома, равно (3):

$$I = \frac{U}{Z}; Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (3)$$

где U – напряжение, приложенное к контуру;

Z – модуль полного сопротивления контура;

R и X – активное и реактивное сопротивление участка воздушной линии.

Именно из-за наличия реактивного сопротивления величина тока в контуре будет меньше чем на постоянном токе. Соответственно, требуется и большая мощность источника для получения необходимого тока плавки.

При анализе способа плавки гололеда постоянным или переменным током был произведен расчет мощности и выбор напряжений (табл. 1), а также анализ термограмм при плавке гололеда на воздушных линиях электропередачи 110 и 220кВ (рис. 4, 5) подстанций 110/10 «Ремонтненская» и 220/110/10кВ Зимовники, а также технико-экономический анализ этих методов [8].

Таблица 1 – Расчетные значения плавки гололеда [Estimated ice melting values]

Плавка постоянным током	Сопротивление одной фазы, Ом	7,5
	Схема плавки	фаза–фаза
	Напряжение плавки, кВ	6
	Потребляемая мощность, МВА	4,7
Плавка переменным током	Сопротивление одной фазы, Ом	14,7
	Схема плавки	трехфазное КЗ
	Напряжение плавки, кВ	10
	Потребляемая мощность, МВА	6,8



Рисунок 4 – Термограмма плавки гололеда постоянным током. ВЛ 220 кВ РП 220кВ Волгодонск-Зимовники [Thermogram of smelting ice with direct current. VL 220 kV RP 220kV Volgodonk-Zimovniki]



Рисунок 5 – Термограмма плавки гололеда переменным током. ВЛ 110 кВ Зимовники-Ремонтное [Thermogram of ice melting by alternating current. VL 110 kV Zimovniki-Remontnoye]

Таким образом, из анализа видно [9], что использование переменного тока целесообразней на линиях не более 110кВ, для воздушных линий 220кВ и выше плавка

гололеда на постоянном токе оказывается более выгодной, так как линейные провода имеют большее сечение и реактивная составляющая сопротивлений на переменном токе уже достаточно велика, что приводит к увеличению поверхностного эффекта, тогда как при постоянном токе плотность тока по всему сечению проводника практически одинакова и теплоотдача стального троса улучшает качество плавки.

Недостатки электротермического способа:

- необходимость отключения линии на время плавки гололеда, что требует перераспределения нагрузки для остальной системы;
- необходим дополнительный трансформатор, а для плавки постоянным током еще и выпрямитель;
- тока плавки превышает максимально допустимый в 1,5-2 раза.

Теплограммы плавки гололеда электротермическим методом наглядно демонстрируют неравномерное нагревание проводов. Плавка гололеда *электрохимическим методом* может быть весьма актуальна, так как в климатических условиях Южного региона температура на всей протяженности воздушной линии зачастую неодинакова и наледь образовывается неравномерно. Некоторые участки могут оказаться вообще без гололедных образований. При протекании тока плавки эти участки будут подвержены чрезмерному нагреву, так как на них нет затрат энергии на плавку гололеда. Это так же является существенным недостатком электротермического способа [10]. В этом случае предпочтительней электрохимический метод в результате которого возникают колебательные движения проводов, разрушающие гололедные образования. Электрохимический метод позволяет уменьшить время плавки гололеда, а также энергозатраты и самое главное не требует отключения линий.

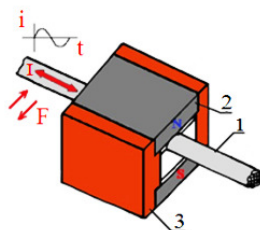


Рисунок 6 – Электрохимический ударный элемент, где 1-провод, 2-постоянные магниты, 3-прижимные пластины [Electromechanical shock element, where 1-wire, 2-permanent magnets, 3-pressure plates]

Суть его заключается в следующем: на проводе устанавливаются постоянные магниты, в зазоре которых, равном диаметру провода, создается постоянное магнитное поле, которое воздействует на переменный ток, протекающий по проводу, с силой Ампера. Направление действия этой силы будет изменяться дважды за период и вызовет смещение постоянных магнитов и, соответственно, вибрацию провода с частотой 50Гц, что будет способствовать встряхиванию влаги с поверхности проводов до того, как она превратится в наледь. Этот непрерывный процесс обеспечит удаление капель воды и наледи на ранней стадии образования гололеда. Однако, при более низких температурах, если гололед все же образовался, усилить встряхивающее воздействие на провода с целью разрушения налипшего льда, можно пропустив по проводам импульсы постоянного тока частотой до 5 Гц от дополнительного источника питания. Это позволит увеличить амплитуду колебания до 20-30 см с ускорением (0,5÷14g), что будет способствовать сбрасыванию льда с проводов по всей длине пролетов [11]. При использовании этого метода не приходится выводить линию электропередач из работы, что является главным его преимуществом. Время необходимое для очистки линии составляют от 0.5 до 1 часа.

К недостаткам следует отнести:

- необходимость источника импульсов постоянного тока;
- при механическом расчете воздушных линий электропередач следует учесть нагрузку от вибрации проводов.

Подводя итог проведенному анализу способов плавки гололеда для климатических условий Южного региона, можно сделать вывод, что наиболее применяемый электротермический метод далеко не всегда можно считать достаточно эффективным, так как требует отключения линии на время плавки. Кроме того, из-за неравномерности гололедных отложений может происходить недопустимый нагрев проводов. Электромеханический метод в этих условиях является более эффективным и менее затратным, так как не требует отключения линии и применения дополнительных дорогостоящих аппаратов специально для плавки гололеда-трансформаторов и выпрямителей. Выбор метода должен обосновываться номинальным напряжением воздушных линии и характером гололедных образований. Внедрение системы автоматического наблюдения за гололедом даст возможность вести круглосуточный мониторинг за гололедообразованием на большой территории [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок / Министерство энергетики РФ. – Москва : Госэнергонадзор, 2017 г. – 522 с.
2. Опыт эксплуатации ЛЭП 330-500 кВ в условиях интенсивных гололедно-ветровых воздействий. Распределенная система автоматического наблюдения за гололедом // Информационно-аналитический журнал ЭнергоINFO. 25.10.2011 г. – 94 с.
3. Никитин, И. Э. Способы удаления льда с проводов линий электропередач / И. Э. Никитин, Н. Х. Абдрахманов, С. А. Никитин // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 3. – С. 794-823.
4. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач. – Козин В. М., Соловьев В. А., Орлов Д. А., Сухоруков С. И., Малых К. С.: пат. 2442256 С1 Росс. Федерация, МПК Н 02 G 7/16; № 2010144485/07; заявл. 29.10.2010 опубл. 10.02.2012 г. – 40 с.
5. Управляемый выпрямитель для плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ВЛ. – Информационная система iElectro: Все об электротехнике. – URL : <http://www.ielectro.ru/news51718/index.html>. 01.10.2011 г. – 123 с.
6. Обзор новых технологий в энергетике. – Выпуск 1. – Департамент технического развития ОАО «МРСК Юга», 2008. – 11 с.
7. Гуревич, М. К. Способы предотвращения аварий, вызванных гололедообразованием на проводах и грозозащитных тросах ВЛ / М. К. Гуревич, М. А. Козлова, А. В. Репин, Ю. А. Шершнев // Известия НИИ Постоянного тока. – 2010. – № 64. – 235 с.
8. Море, Г. Метод расчета гололедной нагрузки на провода / Г. Море. – Москва : Госэнергоиздат, 1956. – 201 с.
9. Устройство для контроля гололедной нагрузки на воздушных линиях электропередачи: пат. №2145119 (РФ). – И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, А. В. Лубенец. – Бюл. №3, 2000. – 17 с.
10. СТО 70238424.29.240.20.002-2011. Воздушные линии напряжением 0,4-20 КВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Москва, 2011 г. – 189 с.
11. Электротехнический справочник. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общей редакцией В. Г. Герасимова [и др.]. – Москва : Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.
12. Нейман, А. А. Анализ эффективности внедрения плавки гололеда в воздушных линиях напряжением 35-500 кВ для повышения надежности их работы в гололедных условиях / А. А. Нейман // Материалы I Всесоюзного совета по плавке гололеда. – Львов, 1971. – 98 с.

REFERENCES

- [1] Pravila ustrojstva e`lektroustanovok [Rules for Electrical Installations]. Ministerstvo e`nergetiki RF [Ministry of Energy of the Russian Federation]. Moskva [Moscow]: Gose`nergonadzor [State Energy Supervision]. 2017. 522 p. (in Russian).
- [2] Opyt ekspluatatsii LEP 330-500 kV v usloviyah intensivnyh gololedno-etrovyh vozdeystviy [Operating Experience of Power Lines 330-500 kV in Conditions of Intense Icy-Wind Effects.]. Raspredelennaya sistema avtomaticheskogo nablyudeniya za gololedom [Distributed Ice Monitoring System]. Informacionno-analiticheskij zhurnal EnergoINFO [EnergoINFO Information and Analytical Journal]. 25.10.2011. 94 p. (in Russian).
- [3] Nikitin I.E., Abdrahmanov N.H., Nikitin S.A. Spособы udaleniya l'da s provodov linij eletroperedach [Ways to Remove Ice from Wires of Power Lines]. Neftgazovoe delo [Oil and Gas Business]. 2015. 823 p. (in Russian).

- [4] Kozin V.M., Solov'ev V.A., Orlov D.A., Suhorukov S.I., Malyh K.S. Sposob udaleniya obledeneniya s provodov linij elektroperedach: pat. 2442256 C1 Ross. Fed-raciya, MPK H 02 G 7/16; № 2010144485/07; zayavl.29.10.2010 opubl. 10.02.2012 [The Method of Removing Icing from Wires of Power Lines: Pat. 2442256 C1 Russian Federation, IPC H 02 G 7/16; No. 2010144485/07; declared 10/29/2010 publ. 02/10/2012]. 40 p. (in Russian).
- [5] Upravlyaemyj vypryamitel' dlya plavki gololeda na provodah i grozozashchitnyh trosah VL [A Controlled Rectifier for Melting Ice on Wires and Lightning Protection Cables of Overhead Lines]. Informacionnaya sistema iElectro: Vse ob elektrotekhnike [IElectro Information System: All About Electrical Engineering]. URL: <http://www.ielectro.ru/news51718/index.html>. 01.10.2011. 123 p. (in Russian).
- [6] Obzor novykh tekhnologij v energetike. Vypusk 1. Departament tekhnicheskogo razvitiya OAO «MRSK Yuga» [Overview of New Technologies in the Energy Sector. Issue 1. – Department of Technical Development of MRSK of the South, JSC]. 2008. 11 p. (in Russian).
- [7] Gurevich M.K., Kozlova M.A., Repin A.V., Shershnev Yu.A. Sposoby predotvra-shcheniya avarij, vyzvannyh gololedoobrazovaniem na provodah i grozozashchitnyh trosah VL [Ways to Prevent Accidents Caused by Icing on Wires and Lightning Protection Cables of Overhead Lines]. Izvestiya NII Postoyannogo toka [News Research Institute of Direct Current]. 2010. №64. 235 p. (in Russian).
- [8] More G. Metod rascheta gololednoj nagruzki na provoda [Method for Calculating Ice Load on Wires]. Moskva: Gosznergoizdat [Moscow: Gosznergoizdat]. 1956. 201 p. (in Russian).
- [9] Levchenko I.I., Zasyplin A.S., Alliluev A.A., Lubenec A.V. Ustrojstvo dlya kontrolya gololednoj nagruzki na vozdushnyh liniyah elektroperedachi: pat. №2145119 (RF). Byul. №3 [A Device for Controlling Icy Load on Overhead Power Lines: Pat. No. 2145119 (RF)]. 2000. 17 p. (in Russian).
- [10] STO 70238424.29.240.20.002-2011. Vozdushnye linii napryazheniem 0,4-20 kV. Organizaciya ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya. Normy i trebovaniya [STO 70238424.29.240.20.002-2011. 0.4-20 kV Overhead Lines. Organization of Operation and Maintenance. Norms and Requirements.]. Moskva [Moscow]. 2011. 189 p. (in Russian).
- [11] Elektrotekhnicheskij spravocnik. T. 3. Proizvodstvo, peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii [Electrical Reference Book. T. 3. Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy]. Pod obshch. red. V.G. Gerasimova i dr. [edited by V. G. Gerasimov]. Moskva: Izdatel'stvo MEI [Moscow: MPEI Publishing House]. 2004. 964 p. (in Russian).
- [12] Nejman A.A. Analiz effektivnosti vnedreniya plavki gololeda v vozdushnyh liniyah napryazheniem 35-500 kV dlya povysheniya nadezhnosti ih raboty v gololednyh usloviyah [Analysis of the Effectiveness of the Implementation of Ice Melting in Overhead Lines with a Voltage of 35-500 kV to Increase the Reliability of their Work in Icy Conditions]. Materialy I Vsesoyuznogo soveta po plavke gololeda [Materials of the I All-Union Council for Smelting Ice]. L'vov [Lvov]. 1971. 98 p. (in Russian).

Analysis of Ice Melting Techniques on Aerial Power Lines in the Southern Region

E.S. Moloshnaya¹, I.V. Melnikov², V.N. Kozobrod³

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID: 0000-0001-8766-2290

WoS Researcher ID: AAH-5369-2020

e-mail: elena_moloshnaya@mail.ru

²ORCID: 0000-0002-8613-9083

WoS Researcher ID: AHH-5335-2020

e-mail: comosabe@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0001-6558-4981

e-mail: kvn06@mail.ru

Abstract – The relevance of ice melting on air lines is due to a significant increase in their length in the electric power system of the Southern region under the conditions of operation of Rostov NPP 4 units. The paper makes the analysis of various methods of combating icing on overhead power lines with a voltage of 110-220 kV, on the basis of which recommendations for their use in these climatic conditions are given.

Keywords: ice formation, wire breakage, accidents, ice melting, short circuit, electrothermal and electromechanical effects, vibration of wires.