

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДЕ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ЕГО СОСТОЯНИЕ В ВЕТРОВОМ ПОТОКЕ

Известно, что формы поперечных сечений гололедных, снеговых, изморозевых отложений и их смесей на проводах (фазных проводах и грозотросах) воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) случайны и весьма разнообразны [1]. В наибольшей степени форма сечения отложений определяется видом осадков, из которых образуются отложения, температурой окружающего воздуха, скоростью и относительным направлением ветра. Только при отсутствии ветра из влаги, содержащейся в воздухе, при его температуре от минус  $6^{\circ}\text{C}$  до минус  $20^{\circ}\text{C}$ , на проводе образуются отложения в виде кристаллической изморози, которая, как правило, равномерно распределяется вдоль проводов ВЛЭП и имеет цилиндрическую форму, а в поперечном разрезе – имеет форму окружности с центром по оси провода, как показано на рис.1(а). В остальных случаях, когда образование отложений происходит из дождя, мокрого снега или их смеси, отложения в поперечном разрезе, как правило, имеют форму, отличающуюся от окружности. При этом при отсутствии ветра отложения, формирующиеся из дождя, имеют гребневидную форму с симметрией относительно вертикальной оси, представленную на рис.1(б). Воздействие ветра при намерзании отложений вызывает асимметрию формы поперечного сечения отложений по направлению действия ветра или ему навстречу. При прочих равных условиях наибольшая масса отложений накапливается, если ветер направлен перпендикулярно к проводам [2].

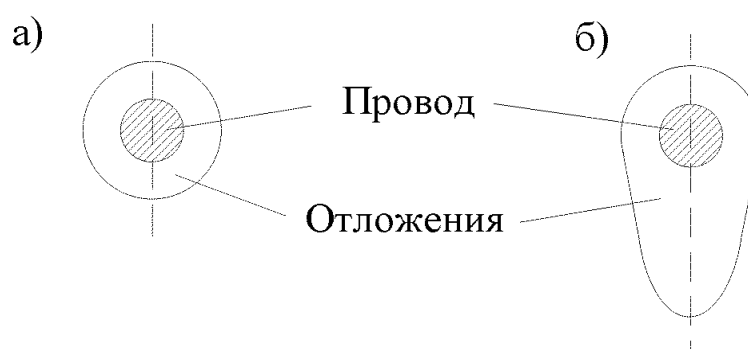


Рис.1. Формы поперечных сечений отложений

Гребневидные отложения, образующиеся на проводах при температуре провода от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-3^{\circ}\text{C}$  из переохлажденного дождя, мокрого снега и их смеси,

состоят из плотного прозрачного или матового гололеда с удельной плотностью 0,7-0,9 г/мм<sup>3</sup>.

Во всех известных методиках расчета механических воздействий на провод при определении ветрового давления принят коэффициент лобового сопротивления (КЛС)  $C_x=1,2$ , соответствующий цилиндрической форме отложений. Как показано выше, цилиндрическая форма отложений при образовании гололедных отложений маловероятна, и поэтому в расчетах нужно принимать гребневидную форму отложений, которая соответствует случаям максимальной статической механической нагрузки на провод, вызываемой отложениями с большим удельным весом.

Для определения значений КЛС рассмотрим процесс формирования гребневидных отложений во времени, показанный на рис.2(а, б, в, г, д). При этом будем считать форму отложений симметричной относительно вертикали и направление ветра перпендикулярным относительно линии симметрии отложений, т.к. в этом случае наблюдаются максимальные динамические нагрузки на провод (трос) с отложениями при первых порывах ветра.

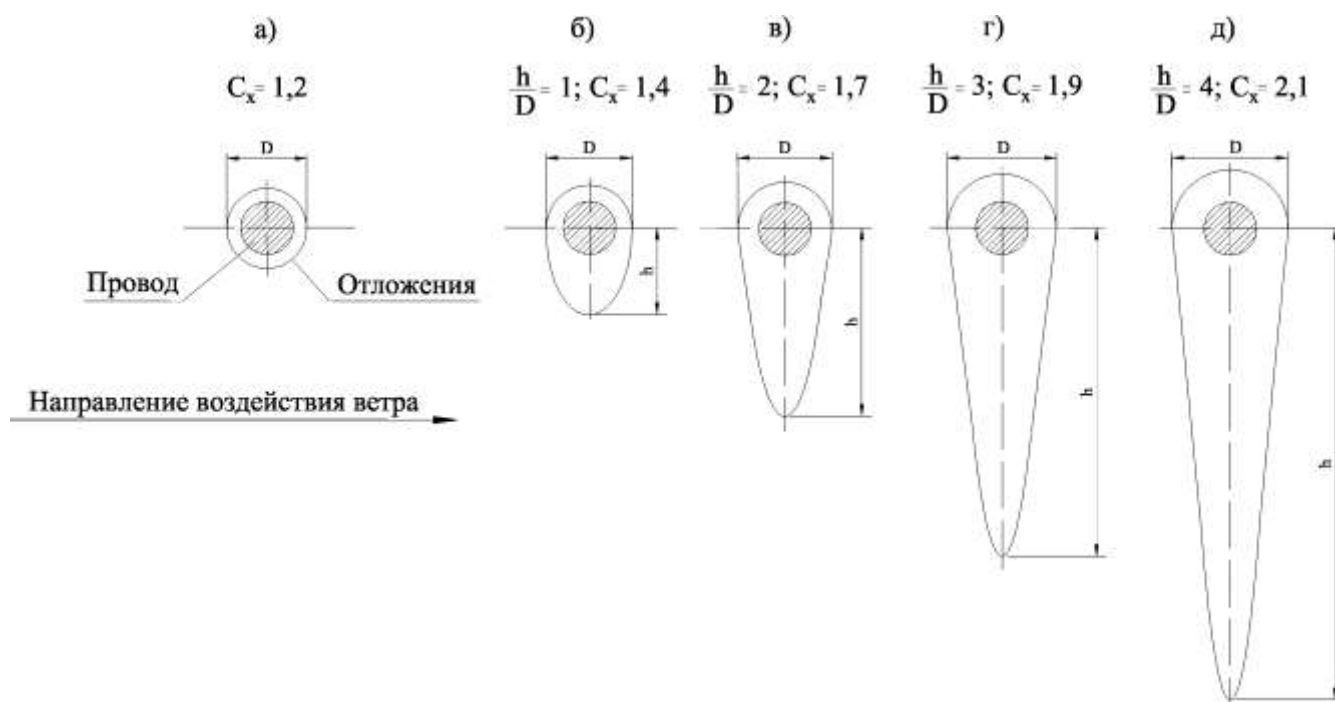


Рис.2. Этапы формирования гребневидных отложений во времени (а, б, в, г, д) и соответствующие им значения КЛС

На рис.2(а) в первоначальной стадии формирования отложений при небольшой толщине отложений форма их близка к цилиндрической и  $C_x=1,2$ . При  $h=D$ , как показано на рис.2(б),  $C_x=1,4$ . По мере роста отложений гребень приближается в сечении к прямоугольнику и в соответствии с [3] при  $h=2D$   $C_x=1,7$ ; при  $h=3D$   $C_x=1,9$ ; при  $h=4D$   $C_x=2,1$ .

Следует заметить, что принятая модель перпендикулярного направления ветра относительно оси симметрии гребневидных отложений не учитывает изменения ориентации отложений под действием силы ветра. Угол отклонения

оси симметрии гребневидных отложений от вертикальной оси зависит, как показано на рис.3, от направления и силы ветра, а также от жесткости провода по длине пролета. Исходя из этого, значение КЛС – величина непостоянная и изменяется в пределах от  $C_x=1,2$  до  $C_x=2,1$ .

Исследования авторов показали, что наиболее вероятно на практике отношение  $h \approx (1,7 \div 1,9) \times D$ , поэтому и значение  $C_x$  при расчетах нагрузок на провода и грозотросы воздушных линий электропередачи следует принимать равным среднему значению – 1,8 [4].

При гребневидной форме отложений на проводе под воздействием ветра возникают колебания провода. Колебания провода под действием ветра разделяются на отклонения (качания) всего провода относительно состояния свободного провеса, при котором центр массы пролета провода перемещается только в плоскости перпендикулярной линии визирования пролета, и на так называемую пляску провода, при которой центр массы пролета провода перемещается также и вдоль линии визирования.

Появление динамических колебаний проводов с отложениями гребневидной формы можно объяснить путем оценки распределения ветровой нагрузки и ее величины на отдельных участках провода с отложениями в пролете.

Пространственные положения провода с гребневидными отложениями в пролете при отсутствии ветра (а), при ветровом воздействии, способствующем возникновению волны динамических колебаний (б), и развитию пляски провода (в, г), представлены на рис.3.

Гребневидные отложения на проводе при воздействии ветрового потока проявляют свойства аэродинамического дозвукового крыла. Следствием этого является появление под воздействием ветра подъемной силы, действующей на провод с отложениями. При условии равномерно распределенного по пролету давления ветра на провод крыло гребневидных отложений, ориентируясь по ветровому потоку, отклоняется от вертикального положения под различными углами на различных участках пролета, т.е. на провод с отложениями воздействует момент вращения. Различия в угловом положении провода в этом случае обусловлены различными реакциями сопротивления провода моментам вращения. Так, чем ближе к месту крепления провода к опоре, тем реакция сопротивления провода больше, и наоборот, чем ближе к середине пролета (с увеличением расстояния от места крепления), тем реакция сопротивления провода меньше. Различные угловые положения крыла отложений по пролету по отношению к направлению поперечной составляющей ветрового потока обуславливают различия аэродинамических свойств провода на разных его участках по длине провода в пролете, как показано на рис.3. Вследствие этого, ветровой поток, обтекая ориентированное под разными углами к нему крыло отложений, вызывает на разных участках провода в пролете появление неодинакового силового воздействия на провод (подъемной силы) и, следовательно, способствует возникновению динамических колебаний.

Проведем анализ процесса развития динамических колебаний с ростом силы ветра при неизменной форме и мощности отложений, приняв воздействие ветрового потока на провод равномерно распределенным. С учетом принятых

условий при любом значении ветрового давления на участках по краям пролета, вблизи мест крепления провода к опоре (участки 1 и 9 на рис.3), угол отклонения крыла отложенный от вертикальной оси минимален. Чем ближе к середине пролета, тем угол отклонения крыла отложенный больше и достигает максимума в середине пролета (участок 5 на рис.3).

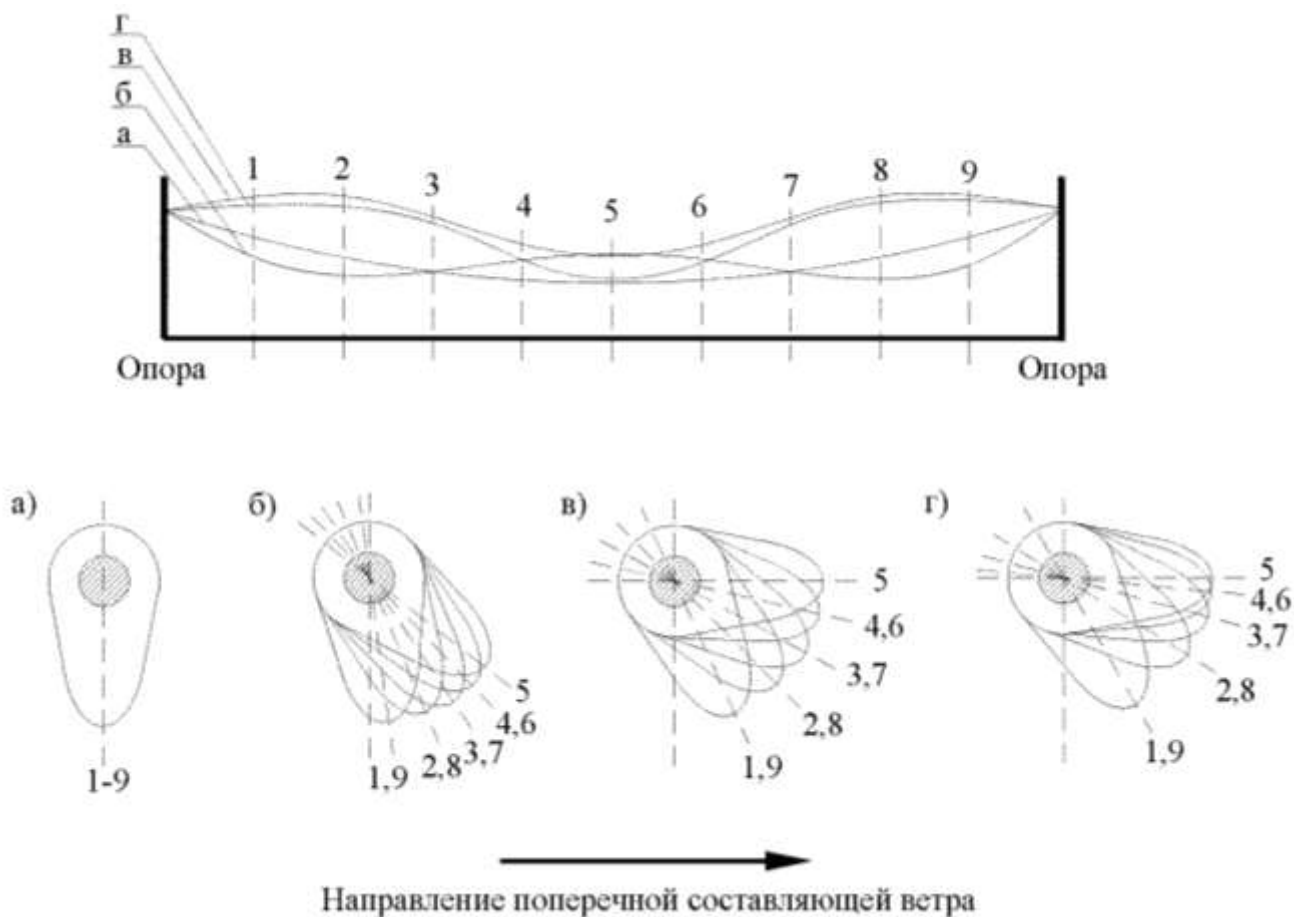


Рис.3. Пространственные положения провода с гребневидными отложениями в пролете при отсутствии ветра (а), при ветровом воздействии, способствующем возникновению волны динамических колебаний (б), и развитию пляски провода (в, г)

В условиях формирования гребневидных отложений и при отсутствии или близких к нулю значениях скорости ветра ( $V_{в}=0$ ) провод в пролете находится в свободном провесе, как представлено на рис.3(а). Увеличение скорости ветра способствует закручиванию провода с отложениями относительно своей оси (отклонение крыла от вертикальной оси), а также отклонению провода относительно начального положения и дальнейшему его раскачиванию. Это явление имеет место при значениях скорости ветра не превышающих некоторого критического значения ( $V_{в}<V_{кр}$ ), при котором подъемной силы давления ветра достаточно для подъема провода на высоту, превышающую уровень оси, соединяющей точки крепления провода к гирляндам изоляторов.

Представленное на рис.3(б) явление, при котором скорость ветра достигает критического значения ( $V_v=V_{кр}$ ), характеризуется переходом процесса качания провода в стадию возникновения волн динамических колебаний.

Дальнейшее увеличение ветрового воздействия ввиду изменения углов закручивания провода по пролету и, следовательно, перераспределения подъемных сил, как показано на рис.3(в, г), способствует развитию динамических колебаний провода с отложениями, о чем свидетельствует смещение фазы колебаний провода на  $180^\circ$ .

Явление динамических колебаний провода получает свое развитие в случае совпадения частоты воздействия подъемной силы ветра с частотой собственных колебаний провода (явление резонанса). При этом устанавливается режим устойчивых динамических колебаний – пляска провода с отложениями.

Как описано выше, пляска провода с гребневидными отложениями в промежуточном пролете сопровождается перемещением центра массы провода вдоль оси визирования ВЛЭП. Такое перемещение обуславливается воздействием продольной составляющей ветрового потока. При этом значение продольного тяжения провода изменяется с частотой его динамических колебаний, а амплитуда продольного тяжения значительно превышает исходное статическое значение.

В целом, перемещение центра массы провода при пляске вызывает возрастание значений моментов суммарной нагрузки на элементы опоры в 2-3 раза относительно исходной статической и, следовательно, увеличивает вероятность возникновения аварии на ВЛЭП [5].

#### Выводы

1. В большинстве случаев образования отложений на проводах ВЛЭП формы поперечных сечений отложений сильно отличаются от окружности, случайны и весьма разнообразны.
2. Гололедные отложения, имеющие максимальный удельный вес, имеют, как правило, гребневидную форму. Высокая плотность гололедных отложений (от 0,7 до 0,9 г/мм<sup>3</sup>) обуславливает высокую статическую нагрузку на элементы конструкции ВЛЭП.
3. Значение коэффициента лобового сопротивления ветру ( $C_x$ ) при расчетах нагрузок на провода и грозотросы воздушных линий электропередачи при наиболее аварийно опасных гребневидных отложениях следует принимать равным 1,8.
4. Гребневидные отложения и критический ветер являются необходимыми и достаточными условиями для возникновения динамических колебаний – пляски провода.
5. Пляска проводов с гребневидными отложениями устанавливается при совпадении частоты воздействия подъемной силы ветра с частотой собственных колебаний провода и сопровождается перемещением центра массы провода.
6. Перемещение центра массы провода при пляске вызывает возрастание значений моментов суммарной динамической нагрузки на элементы опоры в 2-3 и более раз относительно исходной статической нагрузки и, следовательно, увеличивает вероятность возникновения аварии на ВЛЭП.

## Литература

1. Бошнякович, А.Д. Механический расчет проводов и тросов воздушных линий электропередачи / А.Д. Бошнякович. – Спб.: Энергия. Ленинградское отделение, 1971. - 254 с.
2. Сердинов, С.М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог / С.М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1985.- 301 с.
3. Абрамовский Е.Р. Аэродинамика ветродвигателей: Учеб. пособие / Е.Р.Абрамовский, С.В.Городько, Н.В.Свиридов; Днепропетровск: ДГУ, 1987. – 220 с.
4. Кузнецов, П.А. Влияние формы отложений на проводе на коэффициент лобового сопротивления / П.А. Кузнецов, С.В. Аверьянов // Материалы III Всероссийской конференции. – Камышин, 2005. – с. 157-158.
5. Байрамгулов, Ю.Ж. Совершенствование сельских воздушных линий 6-10 кВ, подверженных динамическим нагрузкам: Дис.-... докт. техн. наук. СПб. 1993. - 281 с.