ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОТОКОМ ВОЗДУХА С СОДЕРЖАНИЕМ КАПЕЛЬ ВОДЫ

АВТОРЫ:

М.Х. ГАДЖИЕВ,
К.Ф.-М.Н.,
ОИВТ РАН

Э.Х. ИСАКАЕВ,
Д.Т.Н.,
ОИВТ РАН

П.А. КОНОВАЛОВ,
ОИВТ РАН

Д.В. ТЕРЕШОНОК,
К.Ф.-М.Н.,
ОИВТ РАН

А.С. ТЮФТЯЕВ,
Д.Т.Н.,
ОИВТ РАН

Гололедные отложения на воздушных линиях электропередачи могут приводить к тяжелым авариям в энергосистеме. При этом ветровые потоки способствуют интенсивному образованию гололеда на всех элементах ВЛ. Для своевременного применения мер по предотвращению больших образований гололеда необходимо иметь полную информацию о скорости его образования при различных метеорологических условиях.

Ключевые слова: воздушный поток; влажность; обледенение; цилиндр.

Обледенение проводов ВЛ представляет серьезную опасность для функционирования ЛЭП и может привести к аварии

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обледенение металлических изделий при набегании воздушного потока с содержанием микрокапель воды является актуальной проблемой. Данное обстоятельство связано с обледенением как летательных аппаратов [1–3], так и элементов высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) [4–6].

Во многих регионах России также имеют место нарушения работы в электрических сетях под действием гололедно-ветровых нагрузок. Образование гололедных отложений на проводах воздушных линий (ВЛ) приводит к авариям в энергосистеме (обрыв проводов, разрушение опор, повреждение изоляторов и т.д.). Для ликвидации последствий зачастую необходимы большие трудозатраты и материальные ресурсы.

Ветровые потоки не только способствуют быстрому образованию гололедных отложений на линиях электропередачи, но также приводят к увеличению нагрузки и на самих проводах, и на креплениях за счет колебаний. Например, такой вид колебаний, как субколебания, может приводить к амплитуде колебаний на порядок больше диаметра самих проводов.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований скорости нарастания гололедных образований на металлической поверхности. Данные экспериментов могут быть полезны при определении скорости образования льда на проводах в различных регионах России. Для проведения экспериментальных исследований в ОИВТ РАН был создан стенд размером 2 м × 1,7 м × 10 м, позволяющий создавать продолжительный по времени воздушный поток с температурой и влажностью, максимально приближенными к натурным погодным условиям [4–6]. Данный стенд использовался для исследования образования гололедных отложений на круглых цилиндрах. Исходя из анализа исследований по гололедообразованию на проводах ЛЭП, можно выработать ряд мер с целью формирования системного подхода к решению проблемы обеспечения надежности работы ВЛ в сложных климатических условиях.

РАЗМЕРЫ ИСПЫТУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ, ММ

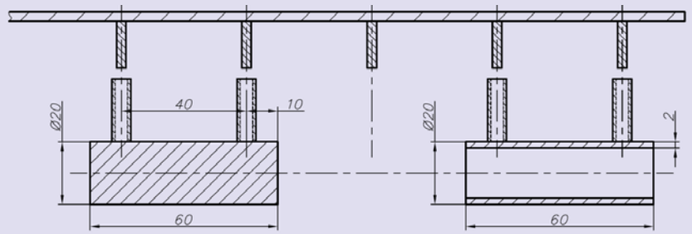

Рис. 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАСХОДЕ 0,6 Г/С

Время, t, мин	Температура в ХК по сплит-системам, $T_{сс}$, °С	Температура в ХК по датчикам, $T_{датч.}$, °С	Влажность в ХК по датчикам, %	Прирост наледи на образцах (по оси с распылителем)	
				полый цилиндр	целый цилиндр
0	–6	–6	73	0	0
6	–6	–6	80	1	1
9	–5,5	–5	82	1,5	1
14	–5,5	–6	81	3,5	2,5
19	–6	–6	83	5	4,5
23	–6	–5,5	83	6,5	5,5

Таблица 1

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В холодильной камере размещены два цилиндрических образца из алюминия, один из них полый, другой — цельный. Размеры образцов в первых двух экспериментах представлены на рис. 1. На расстоянии 600 мм от образцов установлена форсунка, распыляющая двухкомпонентную мелкодисперсную смесь на образцы. Вода на форсунку подается через медный змеевик, находящийся в баке с холодной водой (для подачи максимально холодной воды на форсунку, а не воды комнатной температуры). Непосредственно перед распылителем установлен еще один датчик температуры воды.

Холодильная камера (ХК) охлаждалась до температуры –6 °С. Затем

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАСХОДЕ 0,75 Г/С

Время, t, мин	Температура в ХК по сплит-системам, $T_{сс}$, °С	Температура в ХК по датчикам, $T_{датч.}$, °С	Влажность в ХК по датчикам, %	Прирост наледи на образцах (по оси с распылителем)	
				полый цилиндр	целый цилиндр
0	–10,5	–10,5	86	0	0
5	–11	–10,5	87	3,5	3
10	–11	–11	86	6,5	6
15	–11	–11	87	8,5	8
20	–11	–11	88	11	11

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАСХОДЕ 0,5 Г/С

Время, t, мин	Температура в ХК по сплит-системам, $T_{сс}$, °С	Температура в ХК по датчикам, $T_{датч.}$, °С	Влажность в ХК по датчикам, %	Прирост наледи на образцах (по оси с распылителем)	
				полый цилиндр	целый цилиндр
0	–4	–4	85	0	0
6	–4	–4	87,3	1,5	1,5
12	–4	–4	89,6	2,5	2,5
18	–4	–4	89	3,4	3,8
24	–4	–4	90,3	4,3	4,6
30	–4	–4	90,7	5,2	5,6

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАСХОДЕ 0,4 Г/С

Время, t, мин	Температура в ХК по сплит-системам, $T_{сс}$, °С	Температура в ХК по датчикам, $T_{датч.}$, °С	Влажность в ХК по датчикам, %	Прирост наледи на образцах (по оси с распылителем)	
				полый цилиндр	целый цилиндр
0	–5	–5	83	0	0
6	–4,5	–4,5	87,5	1,8	1,8
12	–4,5	–4,5	90,7	3,2	3,2
18	–4	–4	90,4	4,5	4,3
24	–4	–4	91,9	5,3	5,3
30	–4	–4	92	6,2	6,4

Таблица 4

ОБРАЗОВАНИЕ ЛЬДА НА ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рис. 2

включался распылитель, и исследуемые образцы обтекались потоком воздуха с содержанием капель воды размером в несколько десятков микрон. Расход и температура воды составляли 0,6 г/с и 1 °С соответственно. Влажность в камере была на уровне 73%.

По истечении 6 мин. после начала эксперимента таймер останавливался, распыление прекращалось и производились измерения толщины наледи на цилиндрах. Затем снова начиналось распыление и включался таймер. Следующие измерения проводились через каждые 3 мин. (табл. 1).

В следующем эксперименте был увеличен расход воды до 0,75 г/с. Результаты экспериментов представлены в табл. 2, где показано, что максимальное значение толщины гололедных образований на поверхности полого и целого цилиндров одинаково и составляет 11 мм.

В последующих двух экспериментах внешний диаметр цилиндров был уменьшен до 16 мм, а внутренний диаметр полого — до 12 мм. Результаты экспериментов для этих цилиндров с расходом воды 0,5 г/с и 0,4 г/с представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

СТРУКТУРА ЛЬДА НА ПОВЕРХНОСТИ (А) ПОЛОГО И (Б) МОНОЛИТНОГО ЦИЛИНДРОВ

а) б)

Рис. 3

В третьем и четвертом экспериментах максимальное значение толщины гололедных образований на поверхности целого цилиндра больше, чем на поверхности полого. Возможно, данное обстоятельство связано с тем, что в этих экспериментах более заметную роль начинает играть образование льда на торцах цилиндров (рис. 2).

Распределение плотности гололедных образований на поверхности цилиндра является неоднородным. В точке торможения потока и в ее окрестности гололед имеет монолитную структуру, а при продвижении вдоль поверхности цилиндра строение льда выглядит как отдельные игольчатые образования, причем в случае полого цилиндра игольчатая структура выражена более четко (рис. 3).

Для цельного образца стоит отметить наличие более ярко выраженной резкой границы между частью поверхности цилиндра, где есть гололедные отложения, и областью, где их нет (см. рис. 3).

Измерить распределение плотности льда в гололедных отложениях не представлялось возможным, тем не менее, при внешнем осмотре образцов после эксперимента отчетливо видно, что гололед в центральной части (вблизи точки торможения) более плотный, чем сбоку (рис. 4). По всей видимости, это связано с тем, что в начальный момент образования гололеда в точке торможения концентрация капель воды, оседающая на поверхности, больше, чем в любом другом месте поверхности (движение вдоль поверхности минимально). Такое распределение приводит к формированию льда с более пористой структурой на поверхности по сравнению с со структурой льда в точке торможения.

ПЛОТНОСТЬ ЛЬДА В ТОЧКЕ ТОРМОЖЕНИЯ ПОТОКА И СБОКУ ЦИЛИНДРА

Рис. 4

ВЫВОДЫ

В результате измерений толщины льда не было обнаружено ярко выраженной разницы между полым и целым цилиндрами. Небольшое различие в толщине льда, по всей видимости, связано с краевыми эффектами. Структура гололедных образований неоднородна вдоль поверхности цилиндра и имеет игольчатую структуру сбоку от точки торможения потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 14-08-00389 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson C.L. Wing Loading, Icing and Associated Aspects of Modern Transport Design // Journal of the Aeronautical Sciences. 1940. Vol. 8. No. 2. P. 43–54.
2. Fortin G., Ilinca A., Laforte J.-L., Brandi V. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing // Journal of Aircraft. 2004. Vol. 41. No. 1. P. 119–127.
3. Sand W.R., Cooper W.A., Politovich M.K., Veal D.L. Icing Conditions Encountered by a Research Aircraft // Journal of Climate and Applied Meteorology. Vol. 23. No. 10. P. 1427–1439.
4. Антонов Б.М., Исакаев Э.Х., Коновалов П.А., Королев В.А., Мордынский В.Б., Сон Э.Е., Терешонок Д.В., Тюфтяев А.С. Создание мобильной установки для плавки гололеда на проводах ВЛ и энергоэффективность ее использования // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 4. С. 155–159.
5. Сон Э.Е., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Терешонок Д.В., Антонов Б.М., Королев В.А., Мордынский В.Б., Коновалов П.А. Мобильная установка для плавки гололеда на ВЛ 110–220 кВ // Электрические станции. 2013. № 2. С. 46–49.
6. Антонов Б.М., Исакаев Э.Х., Королев В.А., Мордынский В.Б., Сон Э.Е., Терешонок Д.В., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И. Мобильная установка для плавки гололеда на проводах высоковольтных линий электропередач 110–220 кВ и ее энергоэффективность // Энергия единой сети. 2013. № 5. С. 26–31.