

Соловьев В. А., Попова В. С.
V. A. Solovyev, V. S. Popova

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ ЛЭП

EXPERT ASSESSMENT OF ICE EDUCATION PARAMETERS

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyev – Dr. habil. in Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Попова Валерия Сергеевна – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: valeriya_guzhvina@mail.ru.

Mrs. Valeriya S. Popova – Postgraduate, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: valeriya_guzhvina@mail.ru.

Аннотация. В статье приведены статистические данные измерений гололедообразования на гололедном станке, установленном на метеостанции Братолюбовка; проведён анализ этих данных, получена экспертная оценка влияния того или иного параметра на процесс гололедообразования.

Summary. The article presents statistical data for measuring icing on an icing machine installed at the Bratolyubovka meteorological station, analyzes these data, and obtains an expert assessment of the effect of various parameters on the process of icing.

Ключевые слова: прогнозирование, интеллектуальная система, гололедообразование, ЛЭП, нечёткая идентификация.

Key words: prediction, intellectual system, icing, power lines, fuzzy identification.

УДК 004.942

Важную роль при построении системы удаления гололёда с проводов линий электропередач (ЛЭП) играет своевременное определение массы отложившегося льда, время начала процесса ледоудаления.

На сегодняшний день существует большое количество систем удаления гололёда с проводов ЛЭП [1; 7; 8; 9; 10; 11]. Исследованием процесса гололедообразования и разработкой средств борьбы со льдом на проводах ЛЭП занимаются российские и зарубежные учёные. Например, коллектив Уфимского авиационного университета работает в области создания перспективных технических решений по обеспечению качественного и надёжного электроснабжения потребителей во время гололедообразования на проводах ВЛ. Была разработана и внедрена в эксплуатацию система контроля гололедно-ветровых нагрузок на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий (ВЛ) [14; 15]. Коллектив Саратовского технического университета занимается разработкой алгоритмов работы системы мониторинга гололедообразования для воздушных линий электропередачи и контактной подвески электротяговых сетей в соответствии с их специфическими особенностями. Предложены термодинамический способ мониторинга интенсивности гололедообразования, варианты технической реализации и алгоритмы функционирования системы мониторинга интенсивности гололедообразования для использования её на ВЛ и КС [12; 13].

Тем не менее на сегодняшний день имеющиеся системы мониторинга позволяют оперировать только по фактической величине гололёда на проводах ЛЭП, что не позволяет выбрать рациональное время включения системы гололедоудаления, а при высокой интенсивности гололедообразования не исключает возникновения аварийных ситуаций.

Кроме того, анализируемые системы мониторинга при оценке величины гололедообразования оперируют набором так называемых «основных параметров», исключая из рассмотрения целый ряд синоптических, геофизических и метеорологических факторов [2; 3].

Одним из путей, устраняющих вышеизложенные недостатки систем мониторинга, является путь, направленный на наделение их функцией прогнозирования гололедообразования.

В настоящее время прогнозирующие системы широко применяются в науке и технике. Существуют адаптивные прогнозирующие системы управления полётом, системы прогнозирования ледообразования для авиационной техники, системы прогнозирующего нейрорегулирования нелинейными динамическими объектами, прогнозирующие инверсное нейрорегулирование в условиях возмущений для позиционно-следающего пневмопривода и т. д. [4;5].

Заблаговременное прогнозирование даёт возможность проводить упреждающие мероприятия по удалению льда, позволяет снизить энергозатраты, обеспечивает проведение профилактических мероприятий, даёт запас времени на предотвращение аварии, то есть позволяет проводить планирование противогололедных мероприятий в масштабах всей сети энергоснабжения.

Созданию моделей гололедообразования посвящена работа [6], но приведённые в ней модели гололедообразования довольно просты и не учитывают всех факторов, влияющих на гололедообразование, причём выборка факторов производилась условно.

Следует отметить, что в технической литературе имеются отрывочные попытки провести оценку влияния того или иного фактора на процесс гололедообразования. К примеру, в [2] приводится оценка влияния на гололедообразование таких факторов, как температура воздуха, влажность, скорость, направление ветра и т. д., однако оценка проводится на основании недостаточного количества данных, что в итоге не позволяет разработать адекватное математическое описание процесса гололедообразования. Поэтому целью настоящей статьи является оценка влияния того или иного фактора на гололедообразование.

Анализ проводился на основе статистических данных, предоставленных Дальневосточным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

В качестве примера ниже приводится выборка измерений гололедообразования на гололедном станке, установленном на метеостанции «Братолюбовка», при этом выбраны случаи отложений на проводах диаметром более 5 мм за последние 10 лет.

В качестве измеряемых параметров, в той или иной степени влияющих на процесс гололедообразования, использовались: вид отложения, время начала нарастания отложения, продолжительность стадии нарастания, продолжительность случая нарастания отложения, температура воздуха в начале нарастания отложения, температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, скорость и направление ветра в начале нарастания отложения, скорость и направление ветра при достижении отложением максимального диаметра, диаметр отложения, толщина отложения, день начала случая отложения, температура поверхности почвы, температура точки росы, относительная влажность, атмосферное давление на уровне станции, атмосферное давление на уровне моря, облачность (в том числе формы облаков), погода (в том числе наличие и вид осадков).

Сводная таблица метеорологических данных приведена на рис. 1 и 2, где

S – шифр вида отложения (13 – кристаллическая изморось, 14 – зернистая изморось, 16 – гололёд);

T_{nach} – время начала нарастания отложения, час;

$Pr1$ – продолжительность стадии нарастания, час;

$Pr2$ – продолжительность случая нарастания отложения, час;

t_{nach} – температура воздуха в начале нарастания отложения, °С;

N_{nach} – направление ветра в начале нарастания отложения, град;

v_{nach} – скорость ветра в начале нарастания отложения, м/с;

t_{max} – температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, °С;

N_{max} – направление ветра при достижении отложением максимального диаметра, град;

v_{max} – скорость ветра при достижении отложением максимального диаметра, м/с;

- D – диаметр отложения, мм;
 L – толщина отложения, мм;
 Day – дата начала случая отложения;
 t_{pp} – температура поверхности почвы, °С;
 t_{tr} – температура точки росы, °С;
 H – относительная влажность воздуха, %;
 D_n – дефицит насыщения, гПа;
 P_s – атмосферное давление на уровне станции, мм рт. ст.;
 $P_{ум}$ – атмосферное давление на уровне моря, мм рт. ст.;
 O_O – облачность (общее количество облаков), в баллах;
 O_N – облачность (количество облаков нижнего яруса), в баллах;
 O_{Cc-Cs} – облачность формы Cc-Cs, в баллах;
 O_{Ac-As} – облачность формы Ac-As, в баллах;
 O_{Cu-Cb} – облачность формы Cu-Cb, в баллах;
 O_{St-Sc} – облачность формы St-Sc, в баллах;
 O_{Fr-nb} – облачность формы Fr-nb, в баллах;
 W – погода в срок наблюдения;
 ww – погода в последний час наблюдения.

Анализ приведённых данных показывает, что в общем виде толщина гололедного образования является функцией как минимум 16 параметров $D=F(T_{nach}, Pr1, t_{nach}, V_{nach}, t_{max}, t_{pp}, t_{tr}, H, P_s, O_O, W, D_n, Pr2, S, P_{ум}, V_{max})$.

Для полноты эксперимента при выявлении влияния того или иного фактора на процесс леодообразования предложено учитывать и геофизические параметры местности расположения измерительного станка.

Для приведённых в таблице данных использовались следующие параметры:

1. Метеостанция расположена между долинами рек Горбыль и Чергали на ровной возвышенности, в восточной части села. Возвышенность имеет превышение над долинами 10...15 м, вытянута с юга на север, заросла негустым смешанным лесом, состоящим из берёзы, осины, кустарника.

2. Уровень грунтовых вод не выявлен.

3. Ближайшее окружение метеоплощадки: К С, СВ, ВСВ, В, ВЮВ, Ю, СЗ, на расстоянии 100...120 м, негустой смешанный лиственный лес из берёзы, кустарника высотой 8...10 м. К ССВ, ССЗ и З, на расстоянии около 60...70 м, негустой смешанный лиственный лес из берёзы, кустарника высотой 8...10 м.

4. Село – к З, ЗС – одноэтажные частные дома на расстоянии 150 м и далее.

5. К ЗЮЗ, на расстоянии 69 м, новое служебное здание высотой 5 м 90 см.

6. К ЗСЗ, на расстоянии около 150 м, группа тополей высотой 15...20 м.

7. На ЮВ, на расстоянии около 400 м, деревья и кустарник высотой 4...5 м.

При оценке толщины отложения использовалась принятая технология определения диаметра отложения на проводах гололедного станка, состоящая в следующем. Вид и продолжительность гололедно-изморозевого отложения определяется визуальным осмотром провода на гололедном станке.

Размеры отложения определяются измерением наибольшей по величине оси поперечного сечения отложения (диаметр D) и расстояния между двумя наиболее удалёнными точками в направлении, перпендикулярном линии диаметра (толщина T).

S	Tnach	Pr1	Pr2	tnach	Nnach	unach	tmax	Nmax	umax	D	L	Day	tpp
13	21	5	8	-27.5	275	1	-28.7	240	1	5	4	04.01.2017	-36
13	22	5	7	-22.8	352	1	-13.8	351	2	5	4	05.02.2017	-33
13	17	7	9	-17.7	273	1	-15.7	327	1	7	6	06.03.2017	-25
13	21	5	7	-22.7	104	2	-22.4	119	2	6	5	22.12.2017	-28
13	16	8	12	-22.0	0	0	-17.5	138	2	6	5	23.12.2017	-21
13	21	5	7	-24.9	307	1	-28.0	269	1	6	5	24.12.2017	-30
13	22	6	8	-27.2	258	2	-22.5	266	2	5	4	02.01.2016	-33
13	19	5	8	-18.2	102	1	-20.0	0	0	6	5	02.03.2016	-22
13	17	6	10	-18.0	0	0	-17.0	98	1	14	13	04.03.2016	-27
13	16	9	11	-13.0	109	1	-14.1	0	0	24	23	17.03.2016	-22
13	18	6	10	-24.7	326	1	-26.2	303	1	5	4	23.12.2016	-33
13	22	3	6	-26.7	107	1	-25.8	116	2	5	4	22.01.2015	-27
13	18	8	10	-28.7	123	2	-24.3	134	2	6	4	23.01.2015	-31
13	15	9	13	-14.8	247	2	-20.5	0	0	8	5	13.02.2015	-21
13	15	9	11	-13.5	271	2	-18.8	317	1	7	4	14.02.2015	-24
13	15	8	12	-17.8	234	1	-20.7	118	1	10	8	26.02.2015	-20
13	16	8	10	-20.9	0	0	-21.7	0	0	9	8	27.02.2015	-30
13	17	3	10	-13.7	262	2	-15.6	253	1	10	7	02.03.2015	-21
13	16	8	10	-16.8	265	1	-16.8	0	0	21	19	03.03.2015	-25
13	16	5	9	-17.8	258	1	-23.6	0	0	6	5	04.03.2015	-26
14	17	5	10	-8.0	286	2	-9.7	255	2	9	8	17.03.2015	-17
13	21	3	6	-19.6	0	0	-15.4	0	0	5	4	12.03.2014	-30
13	22	3	5	-22.0	108	1	-19.2	126	1	5	4	14.03.2014	-28
13	12	14	15	-14.0	0	0	-17.9	113	1	5	3	20.11.2014	-11
13	18	6	11	-30.6	246	1	-31.0	253	1	5	4	11.12.2014	-37
13	18	6	12	-20.3	173	1	-21.6	0	0	8	6	28.12.2014	-27
13	19	6	11	-19.9	0	0	-18.8	291	1	9	7	29.12.2014	-19
13	14	9	12	-14.7	0	0	-14.9	0	0	9	6	01.03.2013	-24
13	18	5	8	-18.2	169	1	-19.2	218	1	5	4	18.03.2013	-24
13	19	5	6	-12.4	322	1	-11.6	288	1	5	3	29.03.2013	-20
13	21	2	3	-12.3	226	2	-12.3	226	2	5	4	31.03.2013	-24
13	15	6	13	-13.5	0	0	-15.0	0	0	23	23	17.11.2013	-5
13	21	6	8	-27.6	298	1	-23.1	320	2	5	3	05.01.2012	-32
13	19	5	8	-19.8	0	0	-22.5	0	0	9	8	05.03.2012	-32
16	9	2	16	0.2	315	6	-0.2	144	1	28	25	13.04.2012	1
13	17	8	11	-15.5	0	0	-16.6	0	0	10	9	10.12.2012	-24
13	17	6	12	-24.4	248	1	-31.1	230	1	10	9	07.01.2011	-35*
13	21	3	8	-24.9	0	0	-25.9	0	0	6	5	25.01.2011	-34*
13	16	8	9	-13.4	99	4	-12.4	126	4	5	4	22.02.2011	-22
13	19	5	6	-12.5	0	0	-12.3	108	2	12	11	26.03.2011	-18
14	19	5	5	-5.0	0	0	1,04	115	1	11	9	22.04.2011	-4
13	21	5	8	-34.4	276	1	-35.0	268	1	5	4	24.12.2011	-36*
13	17	9	11	-22.3	125	2	-18.6	247	1	8	3	08.01.2010	-30
13	22	5	10	-31.8	0	0	-26.4	135	2	6	5	30.01.2010	-42*
13	16	8	14	-22.4	45	2	-24.9	0	0	8	4	09.02.2010	-27
14	21	3	7	-8.8	0	0	-3.8	0	0	6	5	31.03.2010	-16
13	16	5	14	-14.2	0	0	-18.2	357	1	13	11	30.12.2010	-22
13	21	3	7	-28.8	0	0	-29.0	0	0	6	4	06.01.2009	-36*
13	18	6	12	-31.8	0	0	-29.2	0	0	5	3	08.01.2009	-36
13	18	6	13	-23.0	0	0	-20.3	0	0	13	12	14.01.2009	-37*
13	22	3	4	-15.3	0	0	-13.6	67	1	7	6	16.03.2009	-24
13	18	6	8	-21.7	0	0	-23.3	0	0	8	7	21.03.2009	-32
13	17	6	9	-15.2	0	0	-18.5	0	0	13	12	26.03.2009	-27
13	18	5	8	-9.0	0	0	-13.0	0	0	14	14	29.03.2009	-20
13	18	6	10	-20.8	0	0	-21.3	180	1	6	4	21.11.2009	-26
13	22	5	8	-28.0	225	1	-24.9	270	1	5	4	13.12.2009	-38*

Рис. 1. Метеорологические данные



ttr	H	Dn	Ps	Pym	OO	ON	OCc-Cs	OAc-As	OCu-Cb	OST-Sc	OFr-nb	W	ww
-30.9	73	0.18	993.6	1025.9	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-25.4	79	0.21	988.4	1019.9	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-19.9	83	0.26	987.3	1018.1	75	0	0	0	0	0	0	1	2
-25.5	78	0.22	985.6	1017.0	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-24.7	79	0.22	990.1	1021.6	57	10	0	8	2	0	0	7	71
-27.9	76	0.20	989.2	1021.0	57	4	0	1	0	0	0	1	10
-30.2	75	0.17	989.0	1021.1	78	0	0	0	0	0	0	0	2
-21.1	82	0.25	992.0	1023.1	58	10	0	5	0	0	0	1	10
-20.2	83	0.26	1000.0	1031.2	56	0	0	0	0	0	0	0	10
-14.3	90	0.23	983.5	1013.3	75	0	0	0	0	0	0	0	2
-27.6	77	0.19	999.5	1031.6	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-29.8	75	0.17	995.3	1027.5	56	10	0	5	0	0	0	1	10
-31.9	74	0.15	993.6	1026.0	81	0	0	0	0	0	0	0	2
-16.3	88	0.24	982.8	1013.1	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-15.3	86	0.31	981.3	1011.4	84	0	0	0	0	0	0	1	2
-19.7	85	0.23	991.8	1022.8	81	10	0	3	0	0	0	2	2
-23.0	83	0.20	992.2	1023.6	77	0	0	0	0	0	0	0	2
-15.1	89	0.24	981.0	1011.1	76	10	0	3	0	0	0	7	2
-18.5	87	0.22	986.3	1017.0	62	10	0	3	0	0	0	1	2
-19.6	86	0.21	989.5	1020.4	66	0	0	0	0	0	0	0	2
-8.6	94	0.21	984.3	1013.8	62	0	0	0	0	0	0	0	2
-19.6	99	0.00	993.4	1024.7	50	0	0	0	0	0	0	0	10
-22.6	96	0.05	988.2	1019.6	80	4	0	1	0	0	0	0	2
-13.9	70	0.91	988.6	1018.5	84	10	0	8	4	0	0	2	2
-34.0	72	0.14	992.0	1024.6	59	10	0	3	0	0	0	2	10
-22.3	84	0.20	989.1	1020.3	83	0	0	0	0	0	0	1	2
-22.0	83	0.22	984.3	1015.3	50	10	0	8	2	0	0	7	71
-14.7	100	0.00	988.3	1018.8	56	0	0	0	0	0	0	0	10
-18.8	97	0.07	974.6	1005.1	84	0	0	0	0	0	0	7	2
-13.7	88	0.24	983.4	1013.4	84	10	0	3	0	0	0	2	2
-12.3	98	0.00	986.1	1016.1	99	0	0	0	0	0	0	0	2
-8.4	75	1,13	991.0	1020.3	99	10	0	8	2	0	0	2	2
-29.3	87	0.10	994.4	1026.7	72	0	0	0	0	0	0	0	2
-21.0	92	0.13	994.9	1026.2	84	0	0	0	0	0	0	0	2
0.2	100	0.00	964.3	992.3	6	10	10	8	8	2	0(*600)	8	86
-16.1	96	0.09	994.0	1024.7	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-25.6	88	0.09	987.9	1019.5	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-26.8	86	0.12	1000.8	1032.9	84	1	0	1	0	0	0	0	2
-17.9	95	0.08	992.8	1023.7	68	0	0	0	0	0	0	0	2
-13.1	96	0.12	991.7	1021.9	80	6	0	1	0	0	0	1	2
-5.0	100	0.01	994.9	1024.4	7	0	0	0	0	0	0	4	44
-36.2	83	0.05	991.4	1024.4	81	0	0	0	0	0	0	0	2
-23.4	89	0.10	994.3	1025.8	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-34.1	82	0.09	981.2	1013.7	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-24.2	86	0.15	984.2	1015.5	58	10	0	3	0	0	0	7	70
-8.8	100	0.00	982.7	1012.3	50	6	0	1	0	0	0	1	10
-14.8	95	0.10	989.1	1019.5	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-30.5	87	0.09	998.9	1031.6	70	0	0	0	0	0	0	0	2
-34.1	81	0.09	1002.3	1035.5	84	4	0	1	0	0	0	0	2
-28.8	81	0.14	996.9	1029.1	84	0	0	0	0	0	0	7	2
-15.9	94	0.09	975.8	1005.9	57	10	0	5	0	0	0	1	10
-22.3	94	0.05	989.1	1020.5	57	0	0	0	0	0	0	1	10
-18.2	97	0.08	989.1	1020.0	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-10.1	92	0.26	1001.4	1031.6	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-22.0	88	0.12	985.9	1017.0	64	0	0	0	0	0	0	7	2
-29.8	84	0.09	990.8	1023.0	57	10	0	3	0	0	0	7	71

Рис. 2. Метеорологические данные (продолжение)

Из результатов измерений диаметр провода d исключается.

Схема измерения диаметра и толщины отложения представлена на рис. 3.

В силу того, что процесс ледообразования (формирование массы отложившегося льда) описывается многопараметрической нелинейной зависимостью и формализовать её в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений очень затруднительно, поэтому для идентификации математического описания процесса целесообразно обратиться к интеллектуальным методам идентификации. Методы идентификации, базирующиеся на нечётком подходе, ориентируются на экспертные знания, которые не всегда имеются.

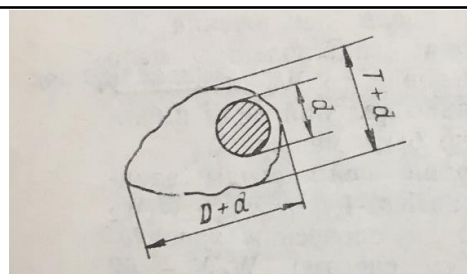


Рис. 3. Схема измерения диаметра и толщины гололедно-изморозевого отложения

Целью обработки полученных статистических данных измерения гололедных отложений является получение экспертной оценки влияния того или иного параметра на процесс гололедообразования, при этом можно оперировать качественными характеристиками.

Обработка результатов базировалась на следующих условиях:

1. За фиксированную величину принимался вид гололедообразования, например, изморозь.
2. Фиксировался диаметр гололедного образования.
3. Для конкретных фиксированных значений строились однопараметрические зависимости базовых параметров для всего имеющегося набора измерений.

Данные зависимости реализовывались на соответствующей плоскости параметров (см. рис. 4–11).

Для определения влияния геофизического месторасположения точки измерения графики зависимостей при одинаковых значениях вида гололедообразования и одинаковых диаметрах приведены на одном рисунке (обозначены литерами а и б).

В рамках данной статьи из-за ограниченности её объёма на рис. 4–11 показаны временные зависимости только ряда основных параметров ледообразования: температуры воздуха в начале нарастания отложения, °С; скорости ветра в начале нарастания отложения, м/с; температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра, °С; скорости ветра при достижении отложением максимального диаметра, м/с; относительной влажности воздуха, %.

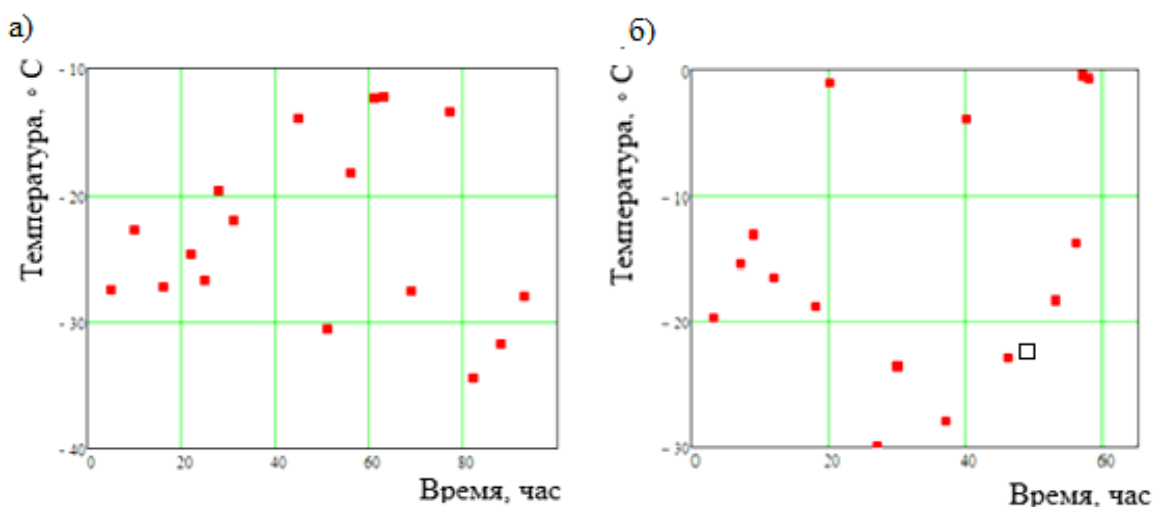


Рис. 4. Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

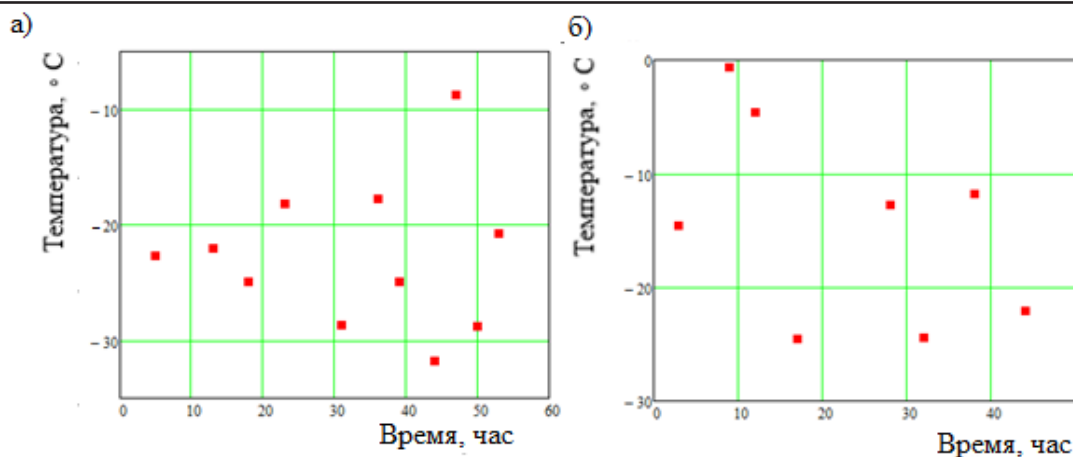


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 6 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

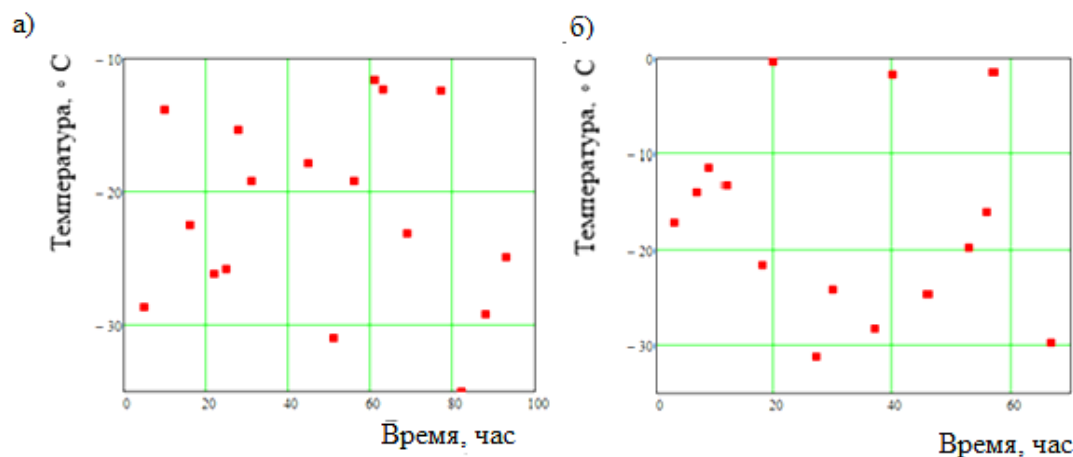


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

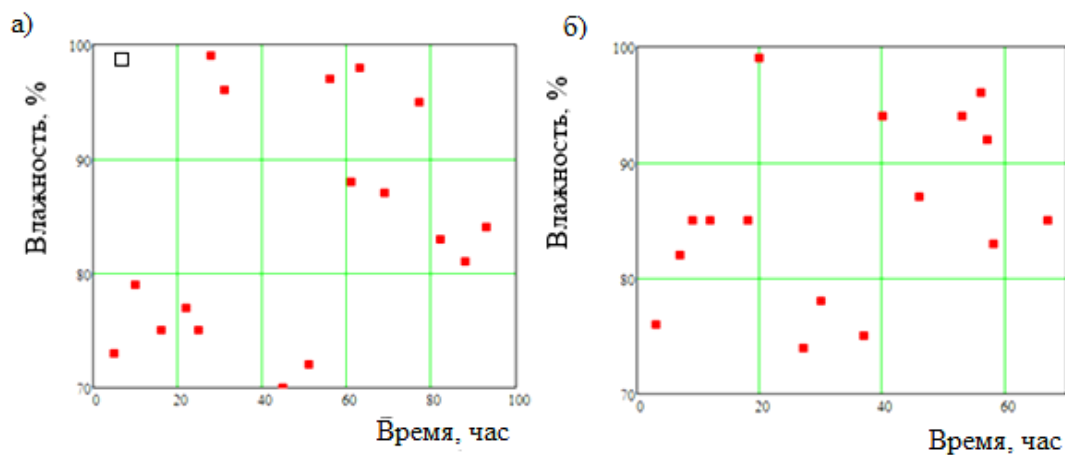


Рис. 7. Зависимость относительной влажности воздуха от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

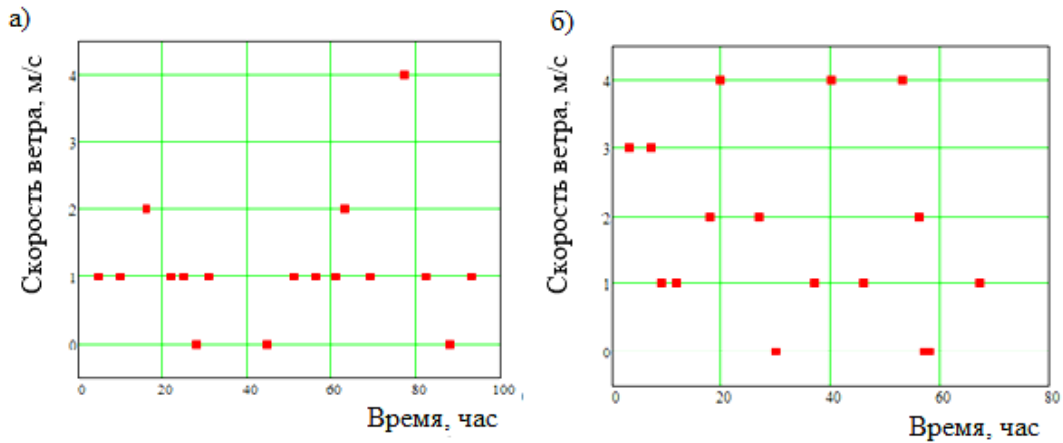


Рис. 8. Зависимость скорости ветра в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

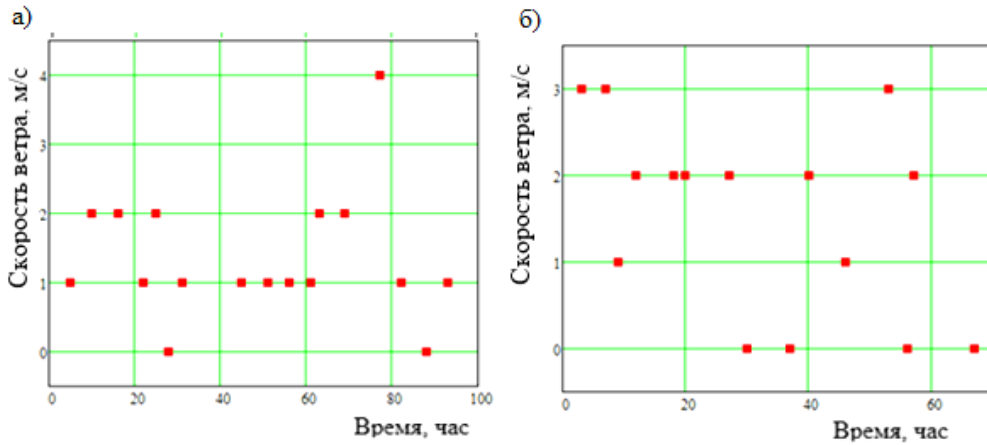


Рис. 9. Зависимость скорости ветра при достижении отложением максимального диаметра от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

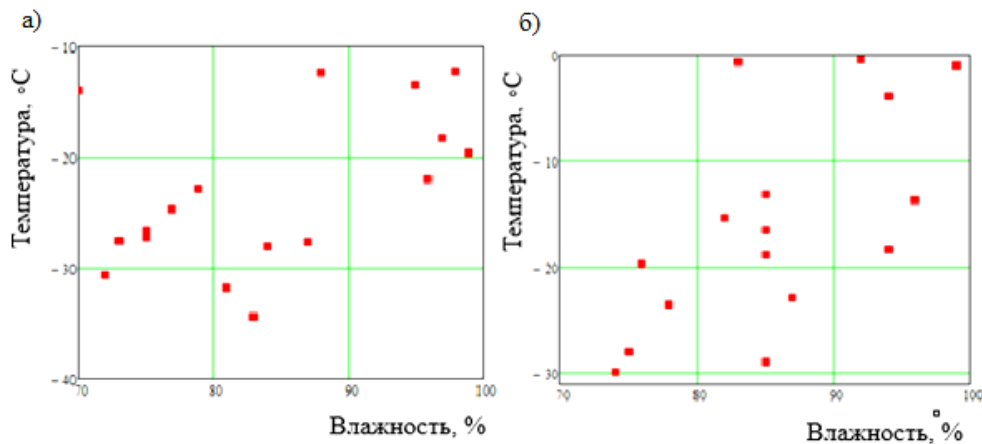


Рис. 10. Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от относительной влажности воздуха при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

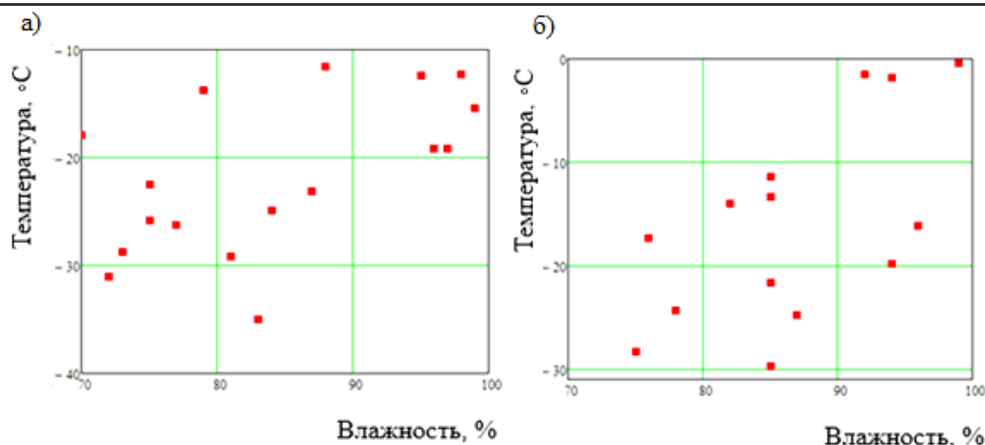


Рис. 11. Зависимость температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра от относительной влажности воздуха при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

Анализ обработанных результатов измерения, приведённых на рис. 4–11, позволяет утверждать, что описать аналитически временную зависимость ни одного из параметров ледообразования не представляется возможным. Вместе с тем использованный подход посредством попарного сравнения для одной фиксированной точки измерения позволяет выявить, какие из параметров оказывают влияние на процесс ледообразования.

Следует отметить, что оценка влияния может быть описана только качественными характеристиками. Это, в свою очередь, наталкивает на мысль о целесообразности вынесения математического описания процесса ледообразования в область нечётких отношений, то есть поиска адекватного математического описания процесса гололедообразования как некой динамической системы вести на базе принципов нечёткой идентификации. Кроме того, показанные на рис. 4–11 результаты обработки чётко отражают диапазоны изменения каждого параметра в ходе ледообразования, а распределения точек измерения на плоскости в виде некой концентрированной области позволяют использовать её как некий «информационный сгусток» при составлении правил базы знаний.

Таким образом, один из возможных путей создания математического описания процесса ледообразования базируется на принципах нечёткой идентификации. Вышеизложенный подход обработки статистических данных позволяет на качественном уровне оценить влияние того или иного параметра на процесс ледообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков, С. И. К оценке возможностей удаления льда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С. И. Сухоруков, В. А. Соловьев, К. Е. Костин // Информатика и системы управления. – 2014. – № 3(41). – С. 148-158.
2. Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним / В. Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 192 с.
3. Бургсдорф, В. В. О физике гололедно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф // Труды ГГО. – 1947. – Вып. 3. – С. 3-12.
4. Буков, В. Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом / В. Н. Буков. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
5. Ноткин, Б. С. Метод синтеза оптимальных нейросетевых регуляторов / Б. С. Ноткин, В. В. Степанюк, К. В. Змеу // Сборник докладов конференции «Молодёжь и научно-технический прогресс». Часть 1. – Владивосток: ДВГТУ, 2004. – С. 232-234.
6. Дьяков, А. Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах / А. Ф. Дьяков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 161 с.
7. Засыпкин, А. С. Интегральная оценка эффективности схем плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / А. С. Засыпкин, А. Н. Щуров // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 42-45.

8. А. с. 909739 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления льда с проводов линий электропередачи / И. Р. Пекарь, И. Г. Голикова, В. А. Бочаров (СССР). – № 2961501/24-07; заявл. 15.07.1980; опубл. 28.02.1982. Бюл. № 8. – 3 с.
9. А. с. 936149 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 2929276/24-07; заявл. 23.05.1980; опубл. 15.06.1982. Бюл. № 22. – 3 с.
10. А. с. 957332 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / В. Ю. Кабашов (СССР). – № 3215097/24-07; заявл. 04.12.1980; опубл. 07.09.1982. Бюл. № 33. – 4 с.
11. Алмаев, М. А. Электромеханическое вибрационное устройство очистки линий электропередачи от гололедных отложений / М. А. Алмаев, А. В. Трофимов // Сборник научно-исследовательских работ аспирантов – финалистов конкурса аспирантов и молодых учёных в области энергосбережения в промышленности, г. Новочеркасск, октябрь 2010 г. – Новочеркасск: Лик, 2010. – С. 3-5.
12. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередач и в контактных сетях: дис. ... на соискание учёной степени канд. техн. наук / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
13. Титов, Д. Е. Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи / Д. Е. Титов // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 31-34.
14. Елизарьев, А. Ю. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей / А. Ю. Елизарьев, А. Р. Валеев // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 4(70). – С. 59-65.
15. Елизарьев, А. Ю. Вопросы гололедообразования на территории РБ / А. Ю. Елизарьев, А. И. Семендяев // Электротехнические комплексы и системы. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 7-10.