

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ им. А. И. ВОЕЙКОВА

ТРУДЫ
ВЫПУСК 333

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
НАГРУЗКИ НА СООРУЖЕНИЯ

Под редакцией
д-ра геогр. наук М. В. ЗАВАРИНОЙ
и канд. геогр. наук И. Д. КОПАНЕВА

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1974

Приводятся результаты исследований, направленных на уточнение расчетов климатических параметров, используемых при определении метеорологических нагрузок на сооружения (гололедных, ветровых, снеговых, температурных).

Предназначен для климатологов, метеорологов и инженеров проектных и строительных организаций.

ОЦЕНКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГОЛОЛЕДНЫХ И ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

За последние годы в Советском Союзе получили значительное развитие работы по проблеме гололедных и гололедно-ветровых нагрузок на провода воздушных линий (ВЛ) и различные сооружения.

В результате проведенных разработок уточнена карта гололедного районирования территории СССР, составленная впервые в 1965 г., и внесен ряд коррективов в указания по определению гололедных нагрузок [31], подготовленные для нового издания СНиП, глава «Нагрузки и воздействия».

Успехи в решении этой проблемы достигнуты благодаря тому, что на сети метеорологических станций Гидрометслужбы СССР накопился значительный материал наблюдений над гололедом, над которым визуальные наблюдения велись с первых лет организации метеорологической сети станций России.

В 20-х годах текущего столетия в связи с авариями, вызванными гололедом на железнодорожном транспорте и на линиях связи (ЛС), появилась необходимость в организации более тщательных наблюдений за этим явлением, в частности инструментальных.

Первые специальные гололедные станции были созданы в Советском Союзе в 30-х годах. Позднее стали развиваться инструментальные наблюдения на постоянно действующей сети станций. Перед Великой Отечественной войной инструментальные наблюдения вели более 100 станций, в 50-х годах — более 1000, а в 60-х — около 3000 станций.

На основании этих наблюдений в каждом УГМС ежегодно составляются обзоры гололедно-изморозевых явлений и вызываемых ими аварий на ВЛ. Большая часть материалов наблюдений обобщается в виде климатических справочников [30]. Подготовлены 34 выпуска справочников.

Уточнению карты гололедного районирования территории СССР в значительной степени способствовали региональные исследования, выполненные ГГО, ВНИИЭ [4], САРНИГМИ [20], КазНИГМИ [2, 3] и проектными институтами.

Однако имеющиеся достижения не исключают необходимости совершенствования существующих методов расчета гололедных нагрузок и климатических параметров, требуемых для этой цели.

Именно теперь, когда накоплен значительный материал наблюдений, остро встает вопрос о правильном, наиболее эффективном его использовании.

С развитием строительства в СССР, с увеличением густоты сети железных дорог, ЛС и ЛЭП, со строительством высоких мачт и башен требования к правильному использованию климатических данных повышаются. В связи с этим необходим значительно более точный расчет гололедных и гололедно-ветровых нагрузок с учетом особенностей конструкции объектов, подвергающихся обледенению.

Несмотря на то что при последнем издании СНиП [31] нормативные гололедные нагрузки в ряде районов СССР увеличены по сравнению с прежними, все же ежегодно на ЛС и ЛЭП возникают аварии, вызываемые или гололедом, или в результате совместного действия гололеда и ветра.

За сезон 1971-72 г. убытки от аварий, вызванных гололедом, составили более 2 млн. руб. Избежать их в будущем было бы довольно просто. Для этого достаточно повысить соответствующие климатические нормативы, используемые для расчета гололедных и гололедно-ветровых нагрузок. Однако любое увеличение нормативных гололедных нагрузок вызывает сопротивление проектных организаций, так как это связано с повышением стоимости сооружений.

Оптимальное решение этого вопроса возможно лишь на основе тщательных исследований климатических условий и их воздействия на различные объекты. Поэтому-то становятся актуальными и получают развитие работы по данной проблеме.

При эффективном использовании результатов этих работ представляется возможным подготовить для следующего издания СНиП климатические параметры, позволяющие точнее рассчитать гололедные и гололедно-ветровые нагрузки на различные сооружения.

Основными вопросами данной проблемы являются следующие.

1. Повышение качества метеорологических и климатологических данных, используемых при расчете гололедных нагрузок.

2. Совершенствование методов пересчета гололедных нагрузок с провода гололедного станка на провода рабочих уровней ВЛ; учет конструктивных особенностей ВЛ и других объектов, подверженных обледенению, а также физико-географических условий местности.

3. Разработка методов учета комплексных метеорологических воздействий (гололед, ветер, температура) на различные объекты.

4. Расчет гололедных и гололедно-ветровых нагрузок на высотные сооружения.

Повысить качество климатологических данных можно путем тщательного анализа и контроля результатов многолетних наблюдений, проводимых метеорологическими станциями, а также путем совершенствования методов инструментальных наблюдений и методов их обработки.

Контроль материалов наблюдений осуществляется ГГО и всеми ГМО УГМС, некоторыми региональными НИГМИ и частично Одесским гидрометеорологическим институтом. Эта работа была начата при составлении первых выпусков справочника «Гололедно-изморозевые явления и обледенение проводов» и продолжается до настоящего времени.

Вспомогательным средством для анализа и контроля результатов наблюдений служат две номограммы.

Первая номограмма используется для определения плотности гололедно-изморозевых отложений по весу и размерам [15], вторая — для расчета вероятностных значений веса отложения на проводе гололедного станка.

С помощью первой номограммы устанавливается правильность соотношений между весом и размерами отложений различного вида. Кроме того, эта номограмма используется для расчета средних и наиболее вероятных значений плотности гололедно-изморозевых отложений в зависимости от физико-географических условий.

В работе [14] было показано, что при расчете толщины нормативной стенки гололеда (и гололедной нагрузки) по размерам отложений и по средней плотности, принятой для каждого вида отложений одинаковой на всей территории СССР, получаются ошибки, достигающие 50—100%. Величину ошибки можно значительно уменьшить, если воспользоваться дифференцированными значениями плотности отложений.

Следовательно, проводящиеся в настоящее время в ГМО УГМС разработки по определению удельного веса (плотности) отложений в зависимости от местоположения станции могут быть использованы для уточнения расчетов гололедных нагрузок, а также для объяснения физических процессов гололедообразования.

На второй номограмме (рис. 1) строятся кривые распределения повторяемости годовых максимумов веса отложений и определяются их значения заданной обеспеченности (весовые нагрузки, возможные раз в 2, 5, 10, 15 и 20 лет). Они легко могут быть пересчитаны на толщину стенки гололеда.

Качество климатологических данных в значительной степени зависит от качества наблюдений. До сих пор наблюдения за гололедом производятся с помощью гололедных станков и мало уделяется внимания внедрению автоматических и дистанционных приборов.

При полной автоматизации наблюдений, проводимой Белорусским территориальным гидрометцентром, сведения о гололеде ограничиваются только его весом [5], что далеко не достаточно для расчета гололедно-ветровых нагрузок. Отсутствие соответствующих достаточно надежных приборов для наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями приводит к тому, что данные, получаемые при автоматизации наблюдений, хуже данных, получаемых с помощью гололедных станков.

Для совершенствования методов обработки материалов наблюдений необходимо использовать современную вычислительную технику. Пока что расчеты на ЭВМ проводят лишь отдельные научно-исследовательские институты Минэнерго СССР [6, 27] и могут рассматриваться как опытные.

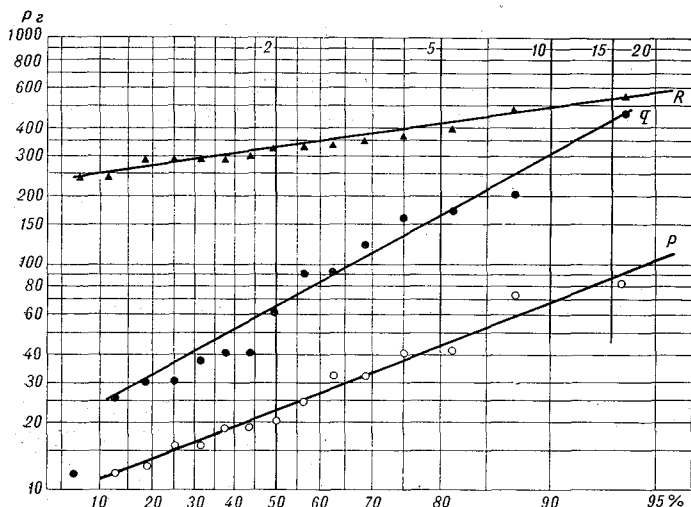


Рис. 1. Номограмма для расчета вероятностных значений веса отложений на проводе гололедного станка:

P — интегральная кривая распределения годовых максимумов веса отложений, q — интегральная кривая распределения годовых максимумов ветровой нагрузки, R — интегральная кривая распределения максимумов результирующей нагрузки.

Автоматизация обработки материалов наблюдений всей сети метеорологических станций возможна при наличии массива перфокарт, созданного по единому макету.

Поскольку данные наблюдений по 1970 г. обобщены в виде таблиц справочника, по-видимому, целесообразно перфорацию наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями начать с 1971 г.

Для уточнения методов пересчета гололедных нагрузок с провода гололедного станка на провода рабочих уровней ВЛ нужны теоретические и экспериментальные исследования. Последние легче организовать проектным институтам при участии сотрудников Гидрометслужбы. Попытка организации таких исследований, к сожалению, пока не дала плодотворных результатов. Главной геофизической обсерваторией (ГУГМС при СМ СССР) и Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (Минэнерго СССР) в 1970 г. разработаны методические указания по наблюдениям над обледенением проводов на рабочих уровнях ВЛ [20]. Однако опытные пролеты энергосистемами до сих пор не созданы. Наблюдения над гололедом на опытных пролетах могли бы

дать очень ценные материалы для пересчета гололедных нагрузок с провода гололедного станка на провода рабочих уровней ВЛ.

Хорошо известно, что коэффициент $K_{b_{dh}}=1,5$, принятый для пересчета толщины стенки гололеда b (приведенной к плотности $0,9 \text{ г/см}^3$) с провода гололедного станка на провод диаметром $d=10 \text{ мм}$, подвешенный на высоте $h=10 \text{ м}$, получен по ограниченному числу наблюдений в нескольких пунктах ЕТС как произведение двух коэффициентов K_a и K_h .

В свое время введение этого коэффициента было большой заслугой ВНИИЭ. Однако теперь уже накоплен значительный материал наблюдений, позволяющий заключить, что этот коэффициент находится в зависимости от физико-географических условий, от вида гололедообразования и т. д. Наблюдения за гололедом на опытных пролетах и преследуют цель — установить закономерность изменения $K_{b_{dh}}$ в различных районах СССР.

В результате разработок, выполненных в ГГО [8], установлено, что коэффициент пересчета гололедной нагрузки с одного диаметра провода на другой зависит от размеров отложений, от температуры воздуха (следовательно, от вида отложения) и от скорости ветра. Естественно, что от этих факторов зависит и величина K_h , а следовательно, и $K_{b_{dh}}$.

Пока для определения этого коэффициента имеются материалы наблюдений, проведенных Украинским отделением Сельэнергопроекта, Киргизским и Таджикским научно-исследовательскими отделами энергетики (КиргНИОЭ и ТаджНИОЭ), а также на опытных гололедных станциях в Новояпятигорске [16, 28]. Эти материалы использованы Завариной и Глуховым (см. наст. сборник), которые получили коэффициенты пересчета для высоты $h=10 \text{ м}$ и диаметра $d=10 \text{ мм}$.

Наряду с уточнением коэффициента $K_{b_{dh}}$ возникает вопрос о необходимости учета влияния на величину гололедной нагрузки закручивания провода ВЛ и электрического поля. Работы, выполняемые во ВНИИЭ и КиргНИОЭ в этом направлении [23—26], позволяют внести соответствующие коррективы в расчеты гололедных нагрузок.

В ГГО выполнялись также работы, связанные с определением коэффициента пересчета гололедной нагрузки с одного периода повторения на другой (с одной обеспеченности на другую).

В работе [12] показано, что при умножении нормативной гололедной нагрузки на величину 1,3 (называемую в [31] коэффициентом перегрузки) толщина нормативной стенки гололеда увеличивается только в 1,2 раза. Следовательно, умножением на этот коэффициент осуществляется переход от 5-летнего периода к периоду менее 10 лет. Для того чтобы перейти от 5-летнего периода к 10-летнему или от 10-летнего к 20-летнему, следует увеличить исходные значения толщины стенки гололеда в 1,3—1,5 раза в зависимости от района гололедности, а гололедную нагрузку соответственно с этими данными следует увеличивать в районах I—III в 1,6 раза, в районах IV—V в 1,5 раза.

Для перехода от гололедной нагрузки, возможной один раз в 5 лет, к гололедной нагрузке, возможной один раз в 20 лет, следует пользоваться коэффициентами 2,5 в районах гололедности I—III и 2,3 — в районах гололедности IV—V.

В настоящее время, по существу, не применяется метод учета одновременного комплексного воздействия на провода ВЛ и другие объекты, определяемого весовой частью нагрузки (вертикальной) и ветровой (действующей в горизонтальном направлении). Независимо от двух указанных воздействий учитываются также температурные воздействия.

С особенно большими погрешностями определяется ветровая нагрузка на обледеневшие предметы. Расчет ветровой нагрузки на обледеневший провод производится по формуле

$$q = c_x \alpha q_0 S, \quad (1)$$

где c_x — аэродинамический коэффициент сопротивления обледеневшего провода. Согласно [31] он принимается равным 1,2; q_0 — нормативный скоростной напор ветра, определяемый по расчетной скорости ветра v_p ; $\alpha = 0,25$ — коэффициент снижения скоростного напора при гололеде, т. е. расчетная скорость ветра при гололеде принимается равной $0,5v_p$; S — площадь осевого сечения провода, определяемая по толщине нормативной стенки гололеда b . Принимается $S = (2b + d) \cdot 100 \text{ см}^2$, где b и d в см (d — диаметр провода).

Очевидно, погрешности при расчете ветровой нагрузки определяются:

- 1) погрешностью c_x ,
- 2) погрешностью расчетной скорости ветра при гололеде,
- 3) ошибкой определения площади осевого сечения провода по толщине нормативной стенки гололеда, т. е. приведенной к плотности $0,9 \text{ г/см}^3$.

Поэтому прежде всего следовало бы уточнить значение коэффициента c_x путем продувок в аэродинамической трубе моделей разнообразных гололедно-изморозевых отложений на различных предметах.

Использование расчетной скорости ветра для определения ветровой нагрузки при гололеде значительно упрощает расчеты, однако такие расчеты являются весьма приближенными. Получаемые при этом погрешности способствуют или завышению ветровой нагрузки, или ее занижению в районах, отличающихся сильным ветром при гололеде [32].

Погрешность при расчете ветровой нагрузки из-за ошибки при определении площади осевого сечения обледеневшего провода не превосходит 10% при гололеде, но достигает 200% при смешанных отложениях [14].

Расчет ветровых нагрузок может быть выполнен по действительным размерам отложений и по действительно наблюдаемой в этих случаях скорости ветра. Этот метод расчета был кратко изложен в [15].

Для того чтобы действие гололедной и ветровой нагрузок привести к одной и той же высоте, необходимо пересчитать размеры отложений, наблюдавшихся на проводе гололедного станка (на высоте 2 м) на высоту 10—12 м над поверхностью земли, на которой производились наблюдения над скоростью ветра, или же пересчитать скорость ветра с высоты 10—12 м на уровень 2 м.

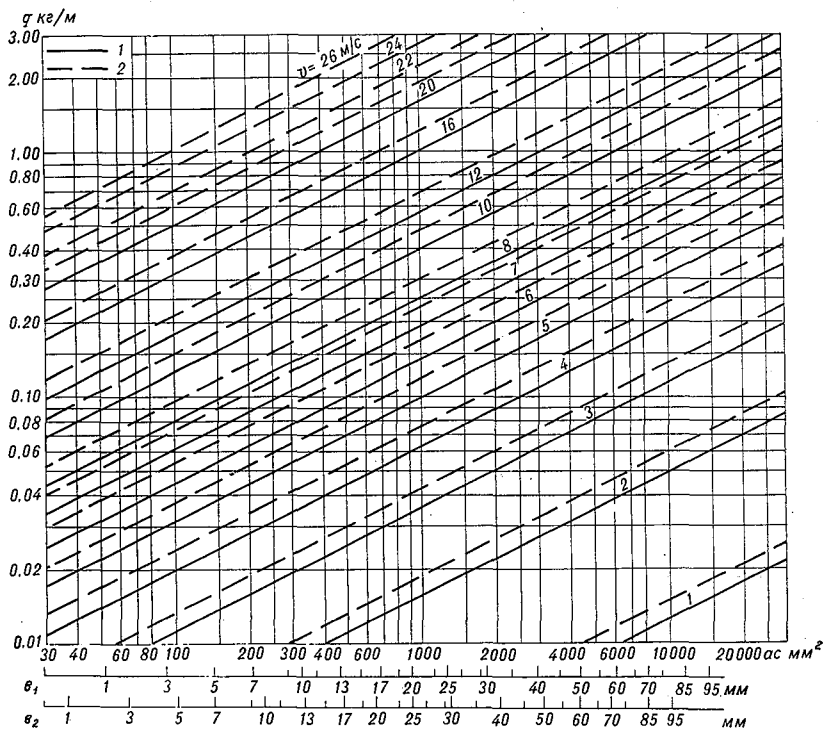


Рис. 2. Номограмма для определения ветровых нагрузок q :
1 — q_1 , 2 — q_2

При опытных расчетах, выполненных в ГГО и ГМО УГМС, ветровая нагрузка определена на один метр провода, имеющего диаметр 10 мм и высоту подвеса 10—12 м. Площадь осевого сечения провода определена по среднему геометрическому значению диаметра, измеренного на гололедном станке ($D_2 = \sqrt{ac}$) и пересчитанного на высоту, на которой измеряется скорость ветра. При этом были использованы два коэффициента пересчета: 1,6 и 2. Первый из них соответствует $K_{dh} = 1,5$, второй получен из условия, что $K_{dh} = 2$.

Если принять, согласно [31], $c_x = 1,2$, то формулы для расчета ветровых нагрузок принимают следующий вид:

$$q_1 = 0,12v^2 \sqrt{ac} \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}, \quad (2)$$

$$q_2 = 0,15v^2 \sqrt{ac} \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}. \quad (3)$$

Для облегчения расчетов по этим формулам построена номограмма (рис. 2).

Определив максимальное значение q_1 или q_2 для каждого года и рассчитав интегральные повторяемости максимумов, можно построить интегральную кривую распределения годовых максимумов. Спрямив ее на соответствующей вероятностной сетчатке, представляется возможным определить вероятностные значения q_1 и q_2 . Эти расчеты целесообразно выполнить, если требуются вероятностные значения P и q , независимые друг от друга. Расчеты ветровых нагрузок при гололеде можно произвести точнее, если раз-

Таблица 1

Гололедные и ветровые нагрузки на провода ЛЭП и скорость ветра при гололеде, возможные один раз в 10 лет

Станция	n	b мм	Нагрузка, кг/м					Скорость ветра, м/с				$K_{p_{dh}}$
			P_c	P_d	$P+p$	R	q	v_p	v_{pm}	v_y	$v_p/2$	
Аксаково	19	15	0,50	1,25	1,45	2,20	1,60	18	19	23	14	2,5
Верещагино	17	5	0,15	0,56	0,76	0,95	0,39	11	15	16	11	3,7
Высокая Дубрава	19	5	0,10	0,40	0,60	0,63	0,11	6	10	9	10	4,0
Дуван	17	10	0,23	0,70	0,90	1,15	0,27	10	10	11	12	3,0
Чёрмоз	16	5	0,12	0,48	0,68	0,75	0,32	14	15	15	10	4,0
Туринск	15	5	0,07	0,28	0,48	0,49	0,31	9	10	14	12	4,0

Примечание. P_c —вес отложения на проводе гололедного станка, P_d —гололедная нагрузка на провод диаметром 10 мм, подвешенный на высоту 12 м, p —вес провода, равный 200 г/м, R —результатирующая гололедно-ветровая нагрузка, q —ветровая нагрузка, v_p , v_q и v_y —расчетные скорости ветра, $K_{p_{dh}}$ —коэффициент пересчета веса отложения с провода гололедного станка на провод диаметром 10 мм с высотой подвеса 10 м.

меры отложений на проводах определять не с помощью постоянного коэффициента, как указано выше, а варьируя его с учетом зависимости от размеров отложения на гололедном станке и от скорости ветра [17].

Результатирующая (суммарная) гололедно-ветровая нагрузка, складывающаяся при одновременном действии веса гололеда и давления ветра, может быть для каждого случая определена по формуле

$$R = \sqrt{(\lambda P + p)^2 + (\eta q)^2}, \quad (4)$$

где $\lambda = K_{p_{dh}}$ —коэффициент пересчета гололедной нагрузки P с провода гололедного станка на провод, подвешенный на высоту h диаметром d , p —вес провода; $\eta = K_{D_{dh}}$ —коэффициент для пересчета размеров отложения с провода гололедного станка на провода ЛЭП.

Для определения вероятностных значений суммарной гололедно-ветровой нагрузки на провод необходимо рассчитать вероятности различных сочетаний гололедных и ветровых нагрузок, определяющих значения R . По аналогии с расчетом вероятностных значений веса (или толщины стенки гололеда) можно для этой цели воспользоваться климатологическим рядом, состоящим из годовых максимумов R .

Каждый годовой максимум определяется соответствующим сочетанием гололедной и ветровой нагрузок. Очевидно, что максимальное за год значение R может быть как при максимуме гололедной нагрузки, так и при максимуме ветровой нагрузки (т. е. когда наблюдалась наибольшая скорость ветра и размеры отложения значительны, хотя вес был меньше максимального значения за год).

Определив годовые максимумы R и рассчитав интегральные повторяемости различных значений максимумов, легко найти значения этой величины заданной обеспеченности.

В качестве примера на рис. 1 нанесены интегральные кривые распределения повторяемостей веса отложений на гололедном станке, величины ветровой нагрузки q и результирующей гололедно-ветровой нагрузки R .

Интегральные кривые построены по данным за 20-летний период наблюдений.

В табл. 1 приводятся значения нагрузок и скоростей ветра, возможные один раз в 10 лет на проводе диаметром 10 мм на высоте 10 м. Они рассчитаны по данным наблюдений нескольких метеорологических станций Уральского УГМС, для которых были построены интегральные кривые распределения годовых максимумов, аналогичные приведенным на рис. 2.

В этой таблице расчетные скорости ветра v_p и v_{pm} получены: первая — по распределению скоростей ветра при максимальных отложениях, вторая — по максимальным скоростям за гололедный период (за каждый случай гололеда, вошедший в таблицу годовых максимумов). В графе v_y приведена условная скорость ветра, которую нужно ввести в расчеты q , если ветровую нагрузку рассчитывать по толщине нормативной стенки гололеда b . Эта условная скорость рекомендована для расчетов ветровых нагрузок Украинским отделением института «Сельэнергопроект». В данной таблице она определена из формулы.

$$q = c_x \frac{v_y^2}{16} (2b + d) = 0,075 v_y^2 (2b + 10). \quad (5)$$

Условную скорость ветра v_y можно определить по номограмме (рис. 2). Для этой цели под осью x номограммы указаны значения b , рассчитанные по формулам (2) и (3), в которых $\sqrt{as}$ было заменено на $2b + d$. Так, для ст. Чёрмоз ветровая нагрузка, возможная один раз в 10 лет, рассчитанная по распределению q при действительно наблюдаемых скоростях в размерах отложения, ока-

залась равной 0,32 кг/м, толщина нормативной стенки $b=2$ мм. По номограмме находим $v_y=15$ м/с.

В предпоследней графе приводятся для сравнения расчетные скорости ветра, используемые согласно [31] для расчета ветровых нагрузок при гололеде (как половина расчетной скорости без гололеда).

При расчете годовых максимумов ветровых нагрузок приняты осредненные значения η . Для ст. Аксаково $\eta=1,6$, т. е. q определено по формуле (2). Для остальных станций $\eta=2$, что соответствует формуле (3).

Значения другого коэффициента $\lambda=K_{p_{dh}}$ указаны в последней графе таблицы. Оба коэффициента (η и λ) зависят от размеров отложений и от скорости ветра при гололеде. На основании теоретических исследований и экспериментальных данных они уточнены [17].

Приведенные примеры расчета показывают, что весовая часть результирующей нагрузки (ее вертикальная составляющая) несколько больше ветровой части (направленной горизонтально), однако в отдельных пунктах, где гололед сопровождается сильным ветром, ветровая часть нагрузки превосходит нагрузку от гололеда. Так, например, на ст. Аксаково это превышение достигает 11%. Если для этого пункта рассчитать ветровую часть нагрузки по условной скорости ветра (23 м/с), учитывающей истинные размеры отложений, и по расчетной скорости (14 м/с), то их отношение, равное отношению квадратов скоростей, будет равно 2,6.

В районе ст. Чёрмоз ветровая часть нагрузки меньше ее весовой части, однако при определении ее по половине расчетной скорости и толщине нормативной стенки гололеда она занижается в 2,25 раза.

Точно так же, если считать ветровую часть нагрузки по половине расчетной скорости на ст. Верещагино, она будет значительно занижена.

Особо сложным и вместе с тем чрезвычайно важным является вопрос, связанный с методом расчета гололедных и гололедно-ветровых нагрузок на высотные сооружения. Практическое значение этих расчетов очевидно, так как за последние годы в нашей стране строится много высоких сооружений, а стоимость их, в основном, определяется величиной гололедной и ветровой нагрузок.

Сложность и трудность решения этого вопроса связаны с отсутствием необходимых данных наблюдений. Они проводились в течение шести лет на нескольких уровнях (до высоты 300 м) метеорологической мачты Института экспериментальной метеорологии в Обнинске и в настоящее время проводятся только в одном пункте СССР — Центральной высотной гидрометеорологической обсерваторией (ЦВГМО) на Останкинской телевизионной башне (Москва).

Совершенно очевидно, что гололедные нагрузки на высотные сооружения нельзя рассчитывать по данным наблюдений у поверх-

ности земли (на высоте 2 м). Поскольку наблюдения на высотах слишком ограничены, приходится прибегать к косвенному приближенному методу расчета путем использования аэроклиматических данных об облачности, температуре, скорости ветра в облачных слоях. Результаты методических разработок, связанных с этими расчетами, выполненных за последние годы в ГГО, изложены в монографии и статье В. Г. Глухова [9, 10].

Даже для контроля и оценки результатов косвенных расчетов максимальных гололедно-изморозевых отложений на высотах, к сожалению, имеется слишком мало фактических данных.

Вот почему очень ценными были бы наблюдения над гололедом на метеорологической мачте в Обнинске и на телевизионных мачтах в других районах СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бошнякович А. Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. Изд. 2-е. Л., «Энергия», 1971. 294 с.
2. Белоус И. М. О расчете максимальных стенок гололеда на проводах линий электропередач в горных районах Тянь-Шаня.— «Труды ГГО», 1969, вып. 246, с. 31—39.
3. Белоус И. М. Влияние физико-географических и метеорологических условий на плотность гололедно-изморозевых отложений.— «Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 45—50.
4. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 206 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
5. Волобуева Г. В. К определению размеров гололедно-изморозевых отложений по их весу.— «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 34—40.
6. Гарцман Л. Б. Методы математического моделирования и расчетов распределения вероятностей гололедно-ветровых нагрузок на провода воздушных линий электропередачи.— Информ. письмо ГУГМС № 19. М., Гидрометеиздат, 1972, с. 114—119.
7. Глухов В. Г. К определению количества влаги, оседающей на элементы высотных сооружений в процессе гололедообразования.— «Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 3—8.
8. Глухов В. Г. Об интенсивности обледенения проводов различного диаметра.— «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 11—23.
9. Глухов В. Г. Метеорологические условия образования гололеда на высотных сооружениях. Л., 1972. 98 с. (Труды ГГО. Вып. 311.)
10. Глухов В. Г. К расчету гололедных нагрузок на высотные сооружения по аэрологическим данным.— См. наст. сборник.
11. Драневич Е. П. Гололед и изморозь. Л., Гидрометеиздат, 1971. 226 с.
12. Заварина М. В. К расчету гололедных нагрузок.— «Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 21—29.
13. Заварина М. В. Удельный вес гололедно-изморозевых отложений.— «Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 30—44.
14. Заварина М. В., Сорокина Н. С. К определению ветровых нагрузок на обледеневшие провода.— «Труды ГГО», 1971, вып. 283, с. 74—78.
15. Заварина М. В. О расчете гололедных, гололедно-ветровых и ветровых нагрузок при гололеде.— «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 3—10.
16. Заварина М. В., Арнаутов П. К. Коэффициенты пересчета гололедных нагрузок.— «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 154—159.
17. Заварина М. В., Глухов В. Г. О приведении данных гололедного станка к рабочим уровням линий электропередачи.

18. Клинов Ф. Я. Изморозь и гололед в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970. 112 с.
19. Клинов Ф. Я., Бойков В. П. О гололедно-изморозевых отложениях в нижнем 500-метровом слое атмосферы по наблюдениям на телевизионной башне в Останкино.—См. наст. сборник.
20. Леухина Г. Н. Гололедно-изморозевые явления и обледенение проводов в Средней Азии. Л., Гидрометеиздат, 1972. 115 с. (Труды САННИГМИ. Вып. 2.)
21. Меламед М. Н., Гарцман Л. Б. Принципы комплексного учета метеорологических факторов при расчетах механических нагрузок на линии электропередачи.—Науч. труды Ташкентского ун-та, 1966, вып. 270.
22. Методические указания по наблюдениям над обледенением проводов на рабочих уровнях воздушных линий электропередачи. Л., Гидрометеиздат, 1970. 15 с.
23. Никифоров Е. П. Влияние переменного электрического поля на вес отложения гололеда на проводе линии электропередачи.—«Электричество», 1962, № 6, с. 52—57.
24. Никифоров Е. П. Влияние закручивания провода на вес отложения гололеда. М.—Л., 1963. (Труды ВНИИЭ. Вып. 15.)
25. Никифоров Е. П. Влияние конструкций воздушных линий электропередачи на гололедные нагрузки.—См. наст. сборник.
26. Подрезов О. А. Некоторые задачи экспериментального изучения обледенения проводов в горных условиях.—«Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 131—137.
27. Подрезов О. А., Федорова С. А. Опыт использования системы критических Пирсона для оценки вероятных величин гололедных отложений.—См. наст. сборник.
28. Савченко Л. А. Некоторые закономерности формирования гололедных нагрузок на провода ЛЭП и ЛС в горных районах.—См. наст. сборник.
29. Современное состояние и перспективы развития инструментальных наблюдений за гололедно-изморозевыми явлениями.—Труды Межведомственного совещания. Под ред. М. В. Завариной и Ф. Я. Клинова. Л., Гидрометеиздат, 1970. 92 с.
30. Справочник по климату СССР. Гололедно-изморозевые явления и обледенение проводов. 1970—1972.
31. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.
32. Швер Ц. А. Повторяемость скоростей ветра при обледенении проводов.—«Труды ГГО», 1969, вып. 246, с. 114—121.
33. Электротехнический справочник. Т. 2. М.—Л., «Энергия», 1964, 758 с.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Гололедные нагрузки на проводах воздушных линий (ВЛ), влияя на конструкцию ВЛ, сами зависят от ее конструктивного выполнения. Поэтому при определении нормативных гололедных нагрузок на провода ВЛ по данным гидрометеорологических станций (ГМС), которые гололед измеряют на проводе диаметром 5 мм на высоте 2 м от поверхности земли, приходится учитывать влияние конструкции ВЛ на величину этих нагрузок.

Исследования влияния конструкции ВЛ на гололедные нагрузки проводились различными авторами и были обобщены Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ) [1]. Наряду с этим проводилось дальнейшее исследование этого вопроса во ВНИИЭ [2—5] и в Украинском отделении института Сельэнергопроект (СЭП) [6]. Обобщение этих исследований позволило дать уточненные рекомендации по учету влияния конструкции ВЛ на гололедные нагрузки.

С теоретической точки зрения влияние конструкции ВЛ на гололедные нагрузки становится ясным из рассмотрения механизма образования гололеда на проводе.

Движение в потоке воздуха капель тумана, мороси и дождя, из которых образуются гололед и изморозь, определяется третьим законом механики

$$\bar{f}_g + \bar{f}_t + \bar{f}_n + \bar{f}_{тр} = 0, \quad (1)$$

где $\bar{f}_g = \frac{1}{3} r_k^3 \text{grad } \bar{E}^2$ — сила воздействия электрического поля провода на поляризованную каплю, $\bar{f}_t = mg$ — сила тяжести, $\bar{f}_n = ma$ — сила инерции, $\bar{f}_{тр} = 6\pi\mu r_k(\bar{\omega} - \bar{v})$ — сила трения, r_k — радиус капли, $\bar{E}$ — напряженность электрического поля провода, m — масса капли, g — ускорение силы тяжести, a — ускорение капли, μ — динамический коэффициент вязкости воздуха, $\bar{\omega}$ — скорость потока воздуха в данной точке, $\bar{v}$ — скорость капли.

Траектория движения капли определяется соотношением сил, действующих по уравнению (1). При малом размере капель и $\bar{f}_g = 0$ сила тяжести $\bar{f}_t$ мала по сравнению с силами инерции $\bar{f}_n$ и трения $\bar{f}_{тр}$, вследствие чего капли в основном движутся горизонтально совместно с потоком, имея незначительную вертикальную состав-

ляющую. В дальнейшем анализируется случай малого размера каплей.

Наличие провода раздваивает воздушный поток и искажает его линии тока (рис. 1). В области искажения потока меняется соотношение сил в уравнении (1). Существенно увеличивается

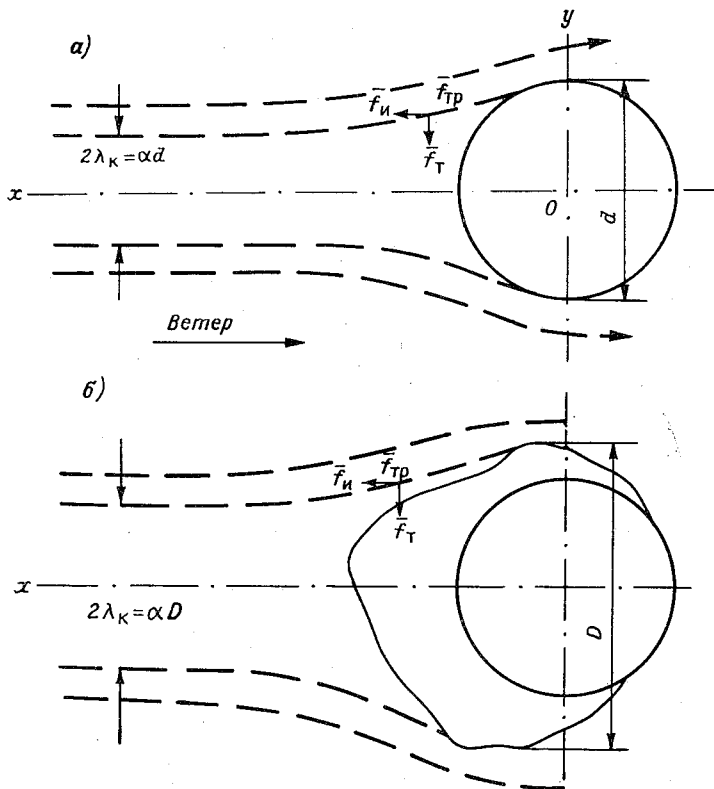


Рис. 1. Движение капель тумана в потоке воздуха:

а — возле провода без гололеда, б — в зле провода с гололедом

сила трения $\bar{f}_{тр}$, что приводит к захвату капель потоком воздуха, вследствие чего капли данного размера оседают на проводе из полосы $2\lambda_k$, ширина которой меньше диаметра провода (рис. 1 а).

В любой интервал времени приращение веса гололеда определяется количеством влаги, оседающей на проводе. Если капли данного размера r_k оседают из полосы шириной $2\lambda_k$, то за время dt на единице длины количество осевшей влаги равно

$$dP = 200\lambda_k H_k v_k dt, \quad (2)$$

где H_k — содержание влаги в единице объема воздуха, обуслов-

ленное каплями данного размера, v_k — установившаяся скорость движения этих капель в потоке воздуха.

Ширина полосы λ_k определяется следующим уравнением, полученным в [2]

$$\lambda_k = \frac{d}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{\left[\frac{2m}{Kd} (v_{kx} - v_{k0}) \right] + 1} \right\}, \quad (3)$$

где d — диаметр провода, $K=6\pi\mu$, v_{kx} — скорость капли, наиболее удаленной от оси потока в момент ее касания провода в точке с координатами $x=0$, $y=\frac{d}{2}$, v_{k0} — горизонтальная составляющая скорости капли в неискаженном потоке, практически равная его скорости.

Таким образом, в начале процесса, когда провод не покрыт гололедом, приращение веса в единицу времени зависит от диаметра провода, содержания влаги, размера капель, скорости неискаженного потока воздуха. При обледенении проводов ВЛ диаметр провода, содержание влаги, скорость ветра будут отличаться от тех же величин, имеющих место при обледенении провода на ГМС. Помимо этого, электрическое поле ВЛ поляризует капли, а появляющаяся сила взаимодействия $\bar{f}_a$ притягивает дополнительные капли, увеличивая ширину полосы λ_k до $\lambda_{ок}$, что в конечном итоге увеличивает интенсивность приращения веса гололеда.

Следовательно, при определении нормативных гололедных нагрузок на провода ВЛ по данным наблюдений ГМС необходимо учитывать влияние конструкции ВЛ — диаметра проводов, высоты их подвеса (так как с увеличением высоты над поверхностью земли увеличивается скорость ветра и содержание влаги), воздействие электрического поля.

Величина λ_k в начале процесса гололедообразования определяется диаметром провода. В последующем провод покрывается гололедной муфтой D , форма которой близка к цилиндру (рис. 1 б), что дает основание допустить для качественного анализа подобие влияния на λ_k диаметра провода и размера гололедной муфты.

Зависимость $2\lambda_k$ от диаметра провода при фиксированном размере капель имеет максимум. Увеличение диаметра провода до определенных значений способствует увеличению веса гололеда на провода, после чего на проводах большего диаметра образуется меньший вес гололеда.

Если влияние размера гололедной муфты D подобно влиянию диаметра провода, то изменение D в процессе гололедообразования должно влиять на интенсивность приращения веса гололеда. Ускоренное увеличение D до определенных значений должно способствовать более интенсивному образованию гололеда.

В частности, провода ВЛ под действием момента от одностороннего отложения гололеда закручиваются на большей части

пролета, что существенно увеличивает размер муфты D и до определенных значений способствует более интенсивному образованию гололеда на проводе ВЛ по сравнению с жестко закрепленным отрезком провода на ГМС. Следовательно, при определении нормативных гололедных нагрузок на провода ВЛ по данным наблюдений ГМС необходимо учитывать влияние кручения провода на гололедную нагрузку.

Влияние каждого из перечисленных конструктивных факторов на гололедную нагрузку на провода ВЛ было исследовано ВНИИЭ в полевых условиях на гололедном стенде в районе под-

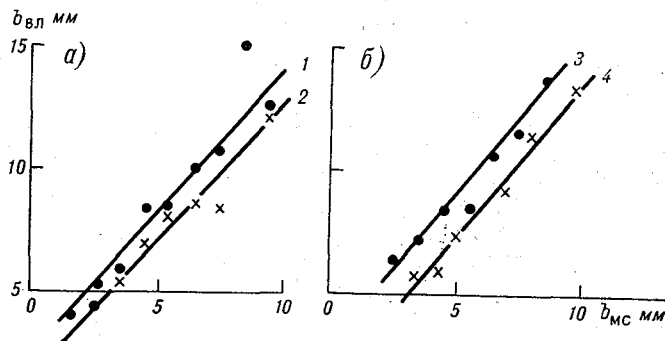


Рис. 2. Зависимость $b_{вл} = f(b_{мс})$:
а — для ВЛ 400 кВ с напряжением (1) и без напряжения (2), б — для троса $d = 11,5$ мм (3) и провода АС-120 (4)

станции Машук и даны рекомендации по учету каждого из этих факторов [2—5]. Эти результаты нашли также отражение в [7].

Для практических целей на опытных пролетах гололедного стенда ВНИИЭ в результате измерений, проведенных Г. М. Сарухановым и Е. А. Дроздовым, получены зависимости толщины стенки b цилиндрического гололеда на проводах ВЛ и ГМС

$$b_{вл} = f(b_{мс})$$

для ВЛ 400, 110, 35 и 10 кВ — провода АСУ-400 ($d = 29,3$ мм), АС-120 ($d = 15,3$ мм), АС-35 ($d = 8,4$ мм) и стального троса $d = 11,5$ мм, а на опытных пролетах института СЭП — для ВЛ 6—10 кВ — провода АС-25 ($d = 6,6$ мм), АС-70 ($d = 11,4$ мм). Гололедная нагрузка $b_{вл}$ измерена на уровне средней высоты подвеса провода.

Наблюдения ВНИИЭ охватывают период с 1953 по 1972 г., а результаты института СЭП получены за период с 1963 по 1966 г. по данным 30 опытных пролетов в различных областях Украины. Всего выполнено более 200 измерений гололедных нагрузок на проводах ВЛ различных конструкций и одновременно на проводе гололедного станка, расположенного рядом с ВЛ.

При обработке результатов вычислялось среднее значение $b_{вл}$

в интервале $\Delta b_{мс} = 1,0$ мм. Среднеквадратическое отклонение σ составляло 1,9—2,6 мм.

На рис. 2 а представлены зависимости $b_{вл} = f(b_{мс})$ для двух ВЛ с проводами АСУ-400 (длина пролета 320 м), одна из которых находилась под напряжением 400 кВ, а другая была обесточена. Как видно, воздействие электрического поля увеличивает гололедную нагрузку.

Детальные исследования этого вопроса показали, что действие сил электрического поля становится особенно существенным при малом размере капель и большой напряженности электрического поля. Поэтому, чем меньше объемный вес гололедного осадка и больше напряженность поля, тем больше увеличение гололедной нагрузки под воздействием электрического поля.

В лабораторных исследованиях при диаметре капель тумана $r_k \approx 5$ мкм (объемный вес $\gamma = 0,09$ г/см³) измерено 10—20-кратное увеличение веса гололедного осадка с напряжением по сравнению с проводом без напряжения. Это приводит к выводу, что в полевых условиях увеличение гололедной нагрузки под воздействием электрического поля должно происходить в основном за счет захвата полем мелких капель тумана. И действительно, в полевых измерениях на стенде при $\gamma = 0,2$ г/см³ получено более чем двукратное увеличение нагрузки, тогда как при $\gamma = 0,5$ г/см³ вес увеличивался только в 1,3 раза.

На рис. 2 б представлены зависимости $b_{вл} = f(b_{мс})$ при образовании гололеда на тросе $d = 11,5$ мм (длина пролета 320 м) и на проводе АС-120 при напряжении 110 кВ (длина пролета 160 м). Как видно, гололедная нагрузка на тросе ВЛ больше, чем на проводе, что объясняется влиянием большей высоты подвеса и более интенсивным закручиванием троса по сравнению с проводом АС-120.

Таким образом, гололедные нагрузки на проводах ВЛ намного

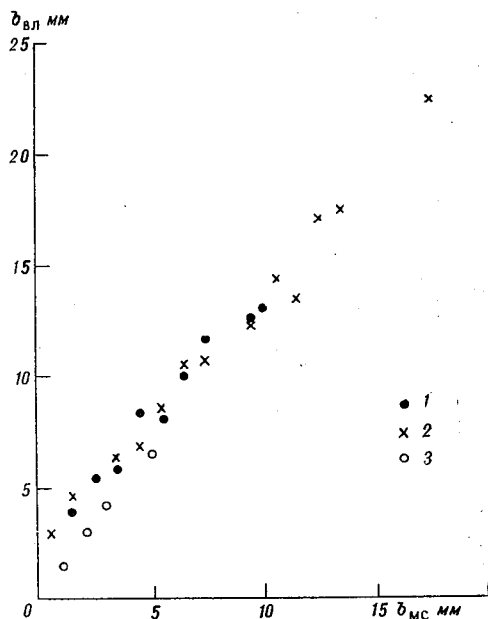


Рис. 3. Зависимость $b_{вл} = f(b_{мс})$
1 — данные ВНИИЭ при мороси, 2 — данные института СЭП при мороси, 3 — данные института СЭП при дожде.

больше, чем на проводе гололедного станка. Наряду с этим гололедные нагрузки на проводах ВЛ различной конструкции, расположенных в одном районе, могут несколько различаться между собой.

Отклонение нормативных гололедных нагрузок в пределах $\Delta b_{\text{вл}} = \pm 2,5$ мм допускается нормами на проектирование ВЛ. Поэтому для практического применения имеет смысл получить общую для всех ВЛ зависимость $b_{\text{вл}} = f(b_{\text{мс}})$.

На рис. 3 представлены зависимости $b_{\text{вл}} = f(b_{\text{мс}})$ для ВЛ 110—400 кВ (по данным ВНИИЭ) и для ВЛ 6—10 кВ (по данным института СЭП).

Данные ВНИИЭ и института СЭП хорошо согласуются друг с другом, что дает основание рекомендовать одну зависимость для ВЛ напряжением от 6 до 500 кВ. Этот вывод подтверждает правильность принятого в СССР метода расчета всех ВЛ на одну и ту же нормативную толщину стенки гололеда. При этом в реальных условиях возможны отклонения гололедных нагрузок в пределах $\pm 2,5$ мм для ВЛ различных конструкций.

Следует отметить, что зависимость на рис. 3 при $b_{\text{мс}} > 1$ см подтверждена незначительным количеством измерений и в последующем необходимо ее уточнение в этой зоне.

Удовлетворительная согласованность данных ВНИИЭ, полученных на Северном Кавказе, и данных института СЭП, полученных во многих областях Украины, дает основание сделать вывод, что влияние конструкции ВЛ на гололедные нагрузки существенно не зависит от географического района. Это было подтверждено также сопоставлением результатов ВНИИЭ и Рира [8] в ФРГ. Существенное значение имеет размер капель, из которых образуется осадок. В частности, данные на рис. 3 получены для гололедного осадка, образовавшегося из капель тумана и мороси. При образовании гололеда из капель переохлажденного дождя зависимость $b_{\text{вл}} = f(b_{\text{мс}})$ будет иной.

При крупных каплях дождя силы инерции $\bar{f}_{\text{и}}$ и тяжести $\bar{f}_{\text{т}}$ будут существенно больше силы трения $\bar{f}_{\text{тр}}$ и силы притяжения капель электрическим полем $\bar{f}_{\text{э}}$. Вследствие этого ширина полосы $2l_{\text{к}}$ в начале процесса будет практически равна диаметру провода, а в последующем — размеру гололедной муфты D . Содержание влаги при дожде практически не зависит от высоты над уровнем земли, поэтому увеличение гололедной нагрузки с высотой будет в основном определяться увеличением скорости ветра.

Проведенные исследования использованы в «Методике составления региональных карт гололедных нагрузок», разработанной ВНИИЭ. В качестве кривой, характеризующей влияние конструкции ВЛ, принята зависимость $K_{\text{вл}} = b_{\text{вл}}/b_{\text{мс}} = f(b_{\text{мс}})$, полученная пересчетом на рис. 3 (в отличие от ранее принятого постоянного $K = 1,5$ [1]). Введенные изменения позволили увеличить нормативные нагрузки в слабогололедных районах, что важно для повышения надежности сельских ВЛ, перегрузочная способность которых меньше, чем ВЛ 110 кВ и выше.

Выводы

1. Проведены комплексные исследования влияния конструкции ВЛ на гололедные нагрузки и даны рекомендации по определению гололедных нагрузок на проводах ВЛ по данным наблюдений ГМС.

2. Показано, что влияние конструкции ВЛ на гололедные нагрузки практически идентично для обширных районов Северного Кавказа и Украины и данные рекомендации применимы для всех районов СССР, исключая горные.

3. В последующих работах необходимо организовать исследования в сильногололедных районах с тем, чтобы уточнить зависимость $b_{вл} = f(b_{мс})$ при $b_{мс} > 1$ см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 206 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
2. Никифоров Е. П. Распределение веса гололедообразования на проводах различного диаметра.—«Труды ВНИИЭ», 1961, вып. 11, с. 274—288.
3. Никифоров Е. П. Влияние высоты подвеса провода на вес отложения гололеда.—«Электрические станции», 1962, № 6, с. 62—66.
4. Никифоров Е. П. Влияние переменного электрического поля на вес отложения гололеда на проводе линии электропередачи.—«Электричество», 1962, № 6, с. 52—58.
5. Никифоров Е. П. Влияние закручивания провода на вес отложения гололеда.—«Труды ВНИИЭ», 1963, вып. 15, с. 220—227.
6. Холмский Д. В. и др. К выбору оптимальной надежности воздушных линий электропередачи в гололедно-ветровых режимах.—«Электричество», 1968, № 6, с. 7—12.
7. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.
8. Rier W. Nebelfrostablagerungen als Zusatzlast für Freileitungen ETZ-A, 1955, Nr. 8, S. 128—135.

О ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ В НИЖНЕМ 500-МЕТРОВОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С ТЕЛЕВИЗИОННОЙ БАШНИ В ОСТАНКИНО

Ранее выполненные исследования гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы освещены в работах [1—5].

В данной статье рассматриваются некоторые характеристики гололедно-изморозевых отложений в нижнем 500-метровом слое атмосферы, полученные по наблюдениям с телевизионной башни в Останкино (Москва) в гололедно-изморозевые сезоны 1969—1971 гг. (ноябрь—март). В этих наблюдениях использовалась в основном методика, разработанная на высотной метеорологической мачте в Обнинске [5].

В рассматриваемые сезоны суммарная длительность периодов гололедно-изморозевых отложений в нижнем 500-метровом слое атмосферы $\sum_{i=1}^n t_i$ (t_i — период отложения) относительно продолжи-

тельности всего сезона T составляла $\sum_{i=1}^n t_i/T \cdot 100 = 50\%$.

Эта характеристика может рассматриваться как занятость (обозначим ее через χ) периодами гололедно-изморозевых отложений всего промежутка времени рассматриваемых сезонов.

Ежемесячная занятость периодами отложений в сезоны 1969—1971 гг. составляла 20% в ноябре, 73% в декабре, 75% в январе, 33% в феврале и менее 5% в марте.

Длительность отдельных периодов гололедно-изморозевых отложений составляла от 20—25 ч (февраль, ноябрь 1970 г.) до 500—600 ч (январь 1969 г., декабрь 1971 г.).

Число случаев n с различными видами отложений и их повторяемость (в %) на разных уровнях 500-метрового слоя даны в табл. 1.

Длительность и число случаев с отложениями различались по уровням слоя; наибольшие значения этих характеристик наблюдались на верхних уровнях нижнего 500-метрового слоя атмосферы, что связано с увеличением длительности существования и частоты низких облаков на этих высотах. С периодами низкой облачности связано и явное преобладание случаев зернистой изморози, характерными условиями образования которой являются низкие облака. Кристаллическая изморозь и гололед наблюдались значительно реже — в 5—10% случаев.

Таблица 1

Повторяемость случаев с различными видами
отложений по слоям

z м	Вид отложения			
	V	S	$\dot{V}$	$\dot{V}, S$
0—100	32	—	9	2
100—200	17	7	13	14
200—300	17	31	21	23
300—400	17	31	28	30
400—500	17	31	29	31
n	30	58	325	125

Наблюдавшееся распределение гололедно-изморозевых отложений в нижнем 500-метровом слое атмосферы представлено на рис. 1 — сгруппированными (а) и «индивидуальными» характерными (б) профилями. Характерные профили вида I—IV типичны для отложений зернистой изморози в низких облаках и обусловлены благоприятными температурными условиями ($\theta < 0^\circ\text{C}$) и длительным периодом низкой облачности (> 70 ч) с нижней границей на уровне $z > 100$ м (профиль вида I), периодом низкой облачности малой продолжительности (10—40 ч) с нижней границей до уровня $z < 80$ —100 м (профиль вида II), периодом низкой облачности средней продолжительности (50—70 ч) с нижней границей на уровне $z > 100$ —200 м (профили вида III и IV). Профиль вида IV близок к средним из всех сгруппированных (рис. 1 а). Профиль вида V (отложения зернистой изморози) обусловлен низкой облачностью (или приподнятым туманом) с верхней и нижней границей соответственно между уровнями 400 и 150 м. Профиль вида VI показателен для наблюдавшегося распределения кристаллической изморози в нижнем 500-метровом слое атмосферы при радиационном выхолаживании. Профиль вида VII построен для случая наблюдавшегося отложения чистого гололеда в нижнем 500-метровом слое атмосферы. Отклонение (разброс) веса отложений от средних значений ($\pm \sigma_p$ г/пог. м) составляло 1000 г на высоте 503 м, 800 г на высоте 385 м, 400 г на высоте 253 м и 100 г на высоте 138 м.

Профили вида I—IV и VII, характерные для отложений зернистой изморози и гололеда, могут быть аппроксимированы по методу наименьших квадратов заданной в узлах $x_1, x_2, \dots, x_n$ функцией:

$$Q(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_nx^n. \quad (1)$$

Коэффициенты полинома по видам профилей рассчитаны на ЭВМ Мир-1 (расчет выполнен А. Г. Бондиной и Т. Э. Кренкелем) и приведены в табл. 2.

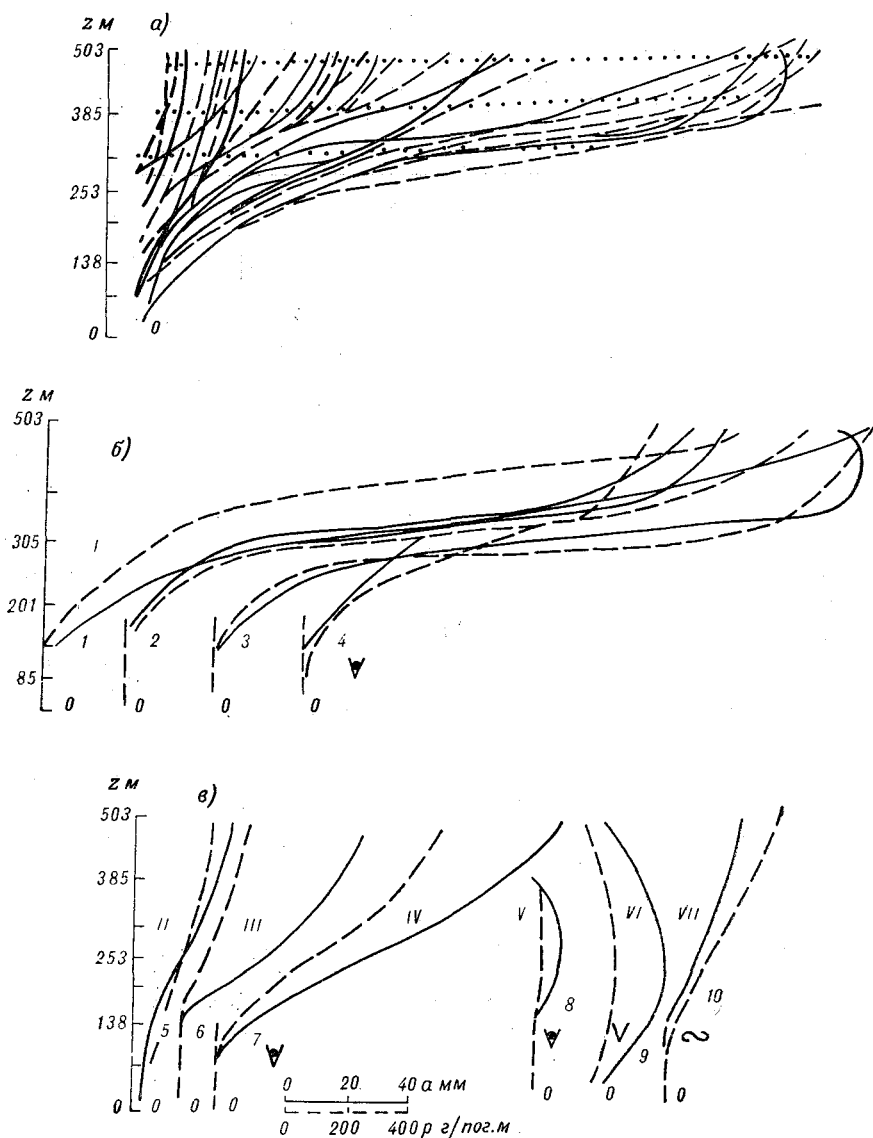


Рис. 1. Профили гололедно-изморозевых отложений в нижнем 500-метровом слое атмосферы:

a — сгруппированные, b и c — «индивидуальные».

Соотношения между размерами отложений зернистой изморози и гололеда (a мм) на элементах сооружения и размерами самих элементов (D мм) даны в табл. 3. Как видно из табл. 3, соотношение a/D изменялось от 3 до 20.

Таблица 2

Коэффициенты полинома для различных видов профилей отложений

Профиль	A_0	A_1	A_2	A_3
I	-20,2	328	-257,1	41,2
II	0,32	-3,3	8,0	-1,0
III	2,4	-17,4	9,7	-0,4
IV	6,8	-48,6	40,7	-1,9
VII	2,5	-47,6	39,6	-2,8

Размеры большого a и малого c диаметров и вес P гололедно-изморозевых отложений, измеренных на стандартных стержнях в сезоны 1969—1971 гг. в нижнем 500-метровом слое атмосферы, даны в табл. 4. Таблица показывает быстрое возрастание отложений по размерам и весу с высотой в 500-метровом слое атмосферы.

Процентное соотношение между размерами (a , c) и весом (P) отложений на горизонтальных и вертикальных стержнях диаметром 15 и 35 мм дано в табл. 5.

Таблица 3

Соотношение между большим диаметром отложений a и размерами D элементов сооружения

Элемент сооружения	D мм	a/D_B	a/D_T
Трос	15	20	—
Стержень	15	17,3	16,6
	35	7,0	6,7
Вибратор	40	—	10,0
	100	4,5	—
Труба	120	3,3	—
Стрела крана	200	—	2,2

С увеличением диаметра стержней как горизонтальных, так и вертикальных большой диаметр отложения уменьшается, а малый наоборот возрастает. Вес отложения с увеличением диаметра стержня увеличивается, несмотря на уменьшение большого диаметра отложения. Размеры и вес отложений на вертикальных основах на 15—25% больше, чем на горизонтальных. Это может

Таблица 4

Размеры (a и c) и вес (P) отложений на стандартных стержнях телевизионной башни в Останкине

z м	D=15 мм						D=35 мм					
	a мм		c мм		P г/пог. м		a мм		c мм		P г/пог. м	
	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до
Горизонтальный стержень												
503	12	250	13	26	140	2430	12	235	25	48	180	3350
385	сл ¹	200	12	28	135	1530	сл	190	25	46	160	2850
305	сл	170	12	32	24	950	сл	120	24	45	—	1020
253	сл	150	9	22	20	470	сл	75	26	40	—	735
138	сл	42	9	14	—	250	сл	65	—	—	—	—
85	сл	сл	—	—	—	—	сл	сл	—	—	—	—
2	сл	сл	—	—	—	—	сл	сл	—	—	—	—
Вертикальный стержень												
503	26	260	16	35	165	2550	18	242	30	51	275	3435
385	—	—	—	—	—	—	20	218	32	53	195	3550
305	сл	300	10	65	—	4100	сл	260	20	72	—	3880
253	—	—	—	—	—	—	сл	205	17	40	—	920

¹ Отложения, большой диаметр которых менее 10 мм.

быть объяснено тем, что интенсивность нарастания отложений на вертикальном стержне не зависит от направления влагонесущего потока. Максимальные значения размеров и веса отложений в сезон 1969—1971 гг. на различных элементах сооружения (телевизионной башни) во всем 500-метровом слое даны в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что наибольших размеров и веса отложения достигали на вертикальных элементах и поверхности антенны.

Таблица 5

Соотношение размеров и веса отложений на горизонтальных и вертикальных стержнях разного диаметра

Стержень	D мм	a		c		P	
		мм	%	мм	%	г/пог. м	%
Горизонтальный	15	52	100	19	100	450	100
	35	47	90	37	190	590	131
Вертикальный	15	66	127	23	120	520	116
	35	60	115	39	205	670	150

Таблица 6

Размеры (а) и вес (Р) отложений на конструктивных элементах телевизионной башни

г м	Дата	Вид отложения	Элемент сооружения	D см	a мм	P г/пог. м
2	28 XII 1970 г.	Кристаллическая изморозь	Стержень горизонтальный	1,5	10	—
35	23 XII 1969 г.	То же	То же	1,5	25	38
138	24 XII 1970 г.	Гололед, зернистая изморозь	"	1,5	65	105
253		Кристаллическая изморозь	"	1,5	35	52
	21 XII 1970 г.	Гололед, зернистая изморозь	"	1,5	90	425
305	24 XII 1970 г.	То же	"	1,5	170	1 600
	18 I 1970 г.	"	"	3,5	120	1 020
	1 II 1970 г.	"	Стержень вертикальный	1,5	360	4 400
385		"	То же	3,5	260	3 880
		"	"	3,5	218	3 550
		"	Стержень горизонтальный	3,5	190	2 830
		"	То же	1,5	200	1 530
	14 II 1969 г.	"	Вибратор горизонтальный	30×40× ×100	400	10 200
		"	Труба вертикальная	10,0	450	8 050
		"	Поверхность антенны	500	150 ¹	27 500 ²
		"	Стержень горизонтальный	1,5	250	2 430
503		"	Стержень вертикальный	1,5	260	2 550
		"	То же	3,5	242	3 435
		"	Стержень горизонтальный	1,5	235	3 350
		"	Труба вертикальная	12,0	400	12 500
		"	Вибратор вертикальный	80	140 ¹	25 800 ²
		"	Трос вертикальный	1,5	300	5 700
		"	Стрела крана	20,0	450	12 150

¹ Толщина отложения.² Вес отложения в г/м².

Полная нагрузка от гололедно-изморозевых отложений на телевизионной башне в периоды интенсивного гололедообразования ориентировочно рассчитана по весу гололеда на основных элементах башни, подверженных обледенению: антенне ($P_{\text{ант}}$), диполях ($P_{\text{дп}}$), балконах (P_6), вспомогательном оборудовании — лебедках, метеорологических реях, подвесных люльках, тросах — ($P_{\text{всп}}$) и др. В частности, нагрузка на балконах рассчитана по отложениям на перилах балкона и по насту на нем. Величина этой нагрузки (в кг) составила

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{ант}} + P_{\text{дп}} + P_6 + \dots \approx 30\,000.$$

В периоды гололедно-изморозевых отложений наблюдались стадии нарастания, устойчивого сохранения, испарения и отвалов

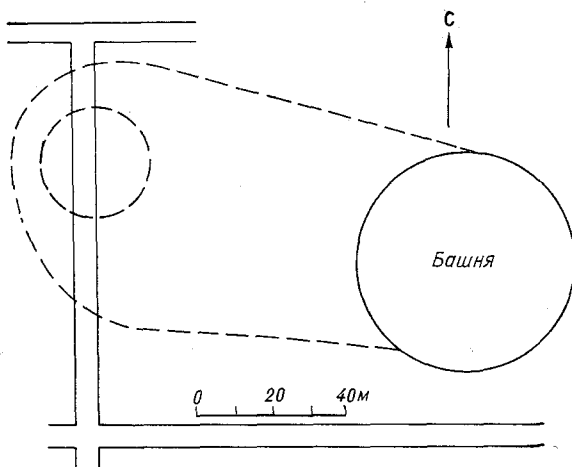


Рис. 2. Зона опадания отвалов отложений с телевизионной башни в Останкине (Москва). 24 XI 1969 г.

отложений. При этом имело место изменение во времени структуры, размеров и веса отложений. За время нарастания вес отложений изменялся в 5—7 раз, а размеры в 10 раз.

Отвалы отложений от элементов сооружения наблюдались в периоды устойчивого повышения температуры до значений, близких к 0°C . Чаще всего отвалы отложений с телевизионной башни в Останкине наблюдались при северо-восточных — юго-восточных ветрах и зона их опаданий по площади отмечалась с северо-западной — юго-западной сторон башни. В этой зоне в основном происходило опадание отвалов отложений в 6 случаях из 7 наблюдавшихся. В случае интенсивного опадания отвалов отложений 24/XI 1969 г. (рис. 2) площадь опадания составляла примерно

Таблица 7

Повторяемость различных значений коэффициента охвата на стандартных стержнях

z м	Коэффициент охвата K										n
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Горизонтальный стержень											
503	—	8	10	8	8	10	15	13	15	13	38
385	—	10	20	—	10	10	10	10	20	10	20
305	3	7	16	6	11	14	9	6	14	14	63
300—500	1	8	15	4	10	11	11	10	18	12	121
253	—	7	19	7	19	22	8	8	3	17	30
201	7	20	20	14	14	—	7	—	6	12	15
138	3	14	40	33	—	—	3	—	3	—	30
85	15	10	35	30	10	—	—	—	—	—	20
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2—300	6	12	30	20	11	5	4	2	3	7	95
Вертикальный стержень											
503	—	—	—	2	10	13	13	19	24	19	38
305	—	2	4	8	16	8	16	19	11	16	63

0,7 га, при этом зона опадания простиралась до 100—120 м от сооружения в направлении ветрового сноса. Наибольшая плотность опадания составляла 1 отвал/м². Отвалы достигали по размеру 30×40 см, а по весу 3—4 кг. Отдельные отвалы меньших размеров и веса наблюдались на расстоянии до 300 м от основания мачты.

Охват отложениями предметов в нижнем 500-метровом слое атмосферы на элементах башни, оцениваемый коэффициентом охвата K [5], наблюдался в широком диапазоне значений от 0,1 до 1,0. Такой широкий диапазон значений коэффициента охвата определялся размерами и формой предмета, его ориентацией по отношению к направлению влагонесущего потока, продолжительностью и интенсивностью нарастания отложений, а также скоростью влагонесущего потока, спектром облачных капель и др.

Повторяемость значений коэффициентов охвата (в %), определенных в сезоны 1969—1971 гг. по высотам в нижнем 500-метровом слое на горизонтальных и вертикальных стержнях диаметром 15 и 35 мм, дана в табл. 7. Из табл. 7 видно, что отложения с $K \geq 0,6$ в слое $z=300—500$ м отмечались в 52% случаев наблюдений, а в слое $z \leq 300$ м — лишь в 21% случаев. Чаще всего коэффициент охвата составлял 0,3—0,4 на высотах менее 300 м и 0,6—

0,7 в слое 300—500 м. Коэффициент охвата для вертикальных стержней на высотах 305 и 503 м изменялся от 0,2 до 1,0. На высоте 503 м отложения с $K \approx 0,6$ отмечались несколько чаще, чем на высоте 305 м. Сравнение показывает, что K больше для вертикальных стержней (в среднем 0,74), чем для горизонтальных (в среднем 0,61). Коэффициент охвата $K=0,6$ отмечался на горизонтальных стержнях в 61% случаев, а на вертикальных в 79% случаев. На

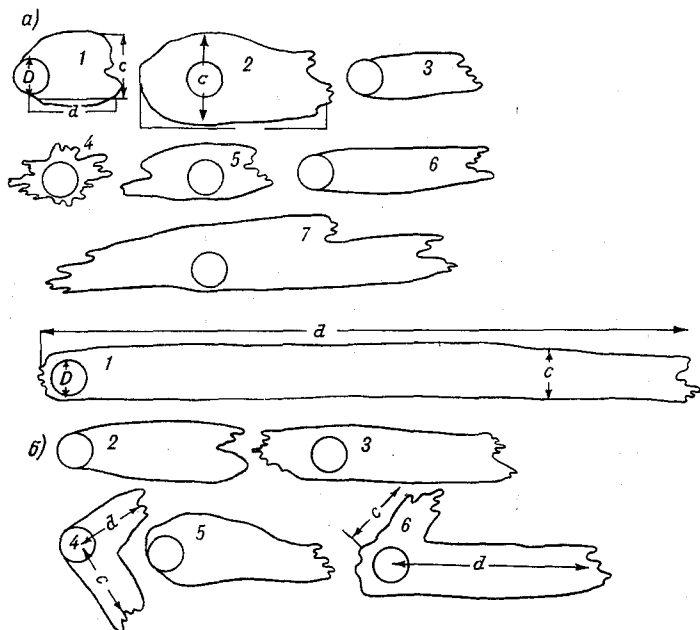


Рис. 3. Конфигурация гололедно-изморозевых отложений на стандартных горизонтальных (а) и вертикальных (б) стержнях.

горизонтальных стержнях диаметром 15 и 35 мм величина $K \geq 0,6$ наблюдалась соответственно в 59 и 45% случаев, а на вертикальных — в 79 и 50%. Коэффициент K с увеличением диаметра стержней уменьшается. На подвижных тросах $K=1,0$, на неподвижных $K < 1$. На диполях, стрелах кранов, трубах и близких им по форме и размерам элементах башни коэффициент охвата менялся в пределах 0,1—0,8. Для антенны $K \approx 0,6$. При этом с увеличением ее диаметра D коэффициент охвата уменьшался от 0,6 при $D=0,9$ м до 0,2—0,3 при $D=5$ м (рис. 3).

По измеренным значениям a и c составлен график $c=f(a)$, изображенный на рис. 4, из которого очевидно, что соотношение c/a изменяется довольно существенно, особенно при $a \geq 80 \div 100$ мм. Последнее объясняется очень малыми изменениями параметра c при указанных значениях параметра a . При начальном росте отложений ($a \leq 30 \div 50$ мм) малый диаметр отложений c растет быст-

рее. На графике точки группируются около прямой с отношением $c/a \approx 0,50$ — для горизонтальных стержней и $c/a = 0,60$ — для вертикальных. При $a > 50$ мм отношение c/a быстро уменьшается. В среднем $c/a = 0,27$ для горизонтальных стержней и $c/a = 0,30$ для вертикальных. Таким образом, величина c/a практически не зависит от ориентации стержня. Величина c/a на высотах в нижнем слое атмосферы меньше величины c/a на наземных уровнях более чем в 2 раза — в среднем 0,75 [3]. По данным измерений 1969—1971 гг. получены следующие средние значения c/a :

Диаметр a , мм	<50	50—100	100—150	150—200	>200
Горизонтальный стержень	0,50	0,36	0,22	0,20	0,09
Вертикальный стержень	0,60	0,38	0,25	0,22	0,11

Как видно, при $a < 50$ мм соотношение c/a на вертикальной основе было больше, чем на горизонтальной. При $a \geq 50 \div 100$ мм со-

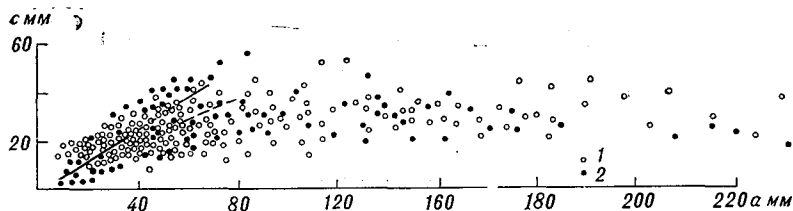


Рис. 4. Характерные размеры гололедно-изморозевых отложений большого (a) и малого (c) диаметров стандартных горизонтальных (1) и вертикальных (2) стержней.

отношение c/a выравнивается и в дальнейшем остается практически одинаковым. Отложения на горизонтальных вибраторах и вертикальных трубах вблизи вибраторов вокруг башни распределяются симметрично вдоль корпуса башни. Наибольшие отложения отмечаются на боковых сторонах башни, что, по-видимому, обусловлено увеличением скорости ветра соответственно увеличению числа капель, оседающих на этих сторонах тела башни. Тело башни оказывает существенное влияние на особенности распределения отложений в связи с полем ветра вокруг башни. Обычно распределение отложений вокруг тела башни на высоте 503 м на расстоянии 1,5 м от нее по измерениям отложений на вертикальных стержнях имеет диаметр 0,8 м и незначительно возмущает влагонесущий поток. Размеры и направленность отложений на вертикальных стержнях вокруг башни на этом уровне одинаковы. На уровнях 305 и 385 м, где диаметр корпуса башни значительно больше и искажения скорости направления ветра вблизи корпуса довольно велики, характер отложений (размеры и направленность) на вертикальных стержнях вокруг башни различен.

На уровне 305 м наибольшие нагрузки на вертикальных основах наблюдаются на северо-западной и юго-восточной стороне башни, что было обусловлено преобладанием ветров в гололедные периоды с юго-западной составляющей.

В наблюдениях исследовалась зависимость изменения во времени гололедно-изморозевых отложений по записи гололедографа на уровне 503 м и по данным инструментальных измерений на стандартных стержнях на уровне 305 м. Была определена скорость нарастания и испарения отложений: $v_f = (f_2 - f_1) / (t_2 - t_1)$. Наибольшая скорость роста по данным инструментальных измерений составляла 2,2 мм/ч — по размеру и 12 г/пог.м.ч — по весу. Малое число наблюдений с не менее чем двухразовыми измерениями в течение стадии нарастания не позволило выявить экстремум величины v_f . Наблюдения в Обнинске [5] показали, что в отдельных случаях могут наблюдаться значительно большие скорости роста отложений: $v_a \approx 4,0 \div 12,8$ мм/ч, $v_p = 120 - 222$ г/пог. м.ч.

Оценки роста отложений по данным инструментальных измерений следует рассматривать как приближенные, так как при этом методе измерений начало и конец процесса не всегда могут быть точно установлены, так же, как не во всех случаях в промежутке измерений можно различить смену процесса нарастания испарением или стабилизацию состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойков В. П. О постановке наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями в нижнем 500-метровом слое атмосферы.—«Труды ЦВГМО», 1971, вып. 1, с. 131—138.
2. Глухов В. Г. К вопросу о распределении гололедно-изморозевых отложений в нижнем 300-метровом слое атмосферы.—«Труды ГГО», 1969, вып. 246, с. 63—71.
3. Заварина М. В., Борисенко М. М. О расчете гололедно-ветровых нагрузок на высотные сооружения.—«Труды ГГО», 1967, вып. 210, с. 39—47.
4. Клинов Ф. Я. Вода в атмосфере при низких отрицательных температурах. М., Изд-во АН СССР, 1960. 171 с.
5. Клинов Ф. Я. Изморозь и гололед в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970, 66 с.

К РАСЧЕТУ ГОЛОЛЕДНЫХ НАГРУЗОК НА ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ПО АЭРОКЛИМАТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ НИЗКОЙ ОБЛАЧНОСТИ

В нашей стране ежегодно проектируются и вводятся в эксплуатацию разного рода высотные сооружения, конструктивные параметры и стоимость которых во многом определяются нагрузками от гололеда и изморози.

Существующие нормативы по гололедным нагрузкам на высотные сооружения [11] для большей части территории СССР были приняты по данным наблюдений только в одном пункте — Обнинске. [Результаты наблюдений на Обнинской высотной мачте обобщены в [1, 5] и на основании анализа повторяемости низких облаков с отрицательной температурой снижены в 2—2,2 раза для Азиатской территории СССР с нагрузками района гололедности I (по приземному районированию).]

Естественно, что такие нормативы не могут характеризовать всю территорию СССР и с этой точки зрения не отвечают требованиям сегодняшнего дня. В настоящее время необходимо знать распределение гололедных нагрузок до высот 800—1000 м в различных районах страны. Это может быть достигнуто только с помощью районирования территории СССР по гололедным нагрузкам на высотные сооружения.

Поскольку до сих пор соответствующие экспериментальные наблюдения проводятся только в двух близко расположенных пунктах (Обнинске и Москве), исходные данные для такого районирования можно получить только косвенным путем, т. е. с помощью аэроклиматических характеристик облаков с отрицательной температурой (продолжительность непрерывного существования и вертикальной мощности этих облаков, скорость их переноса, высота нижней границы, водность и микроструктура).

Рабочая формула для определения гололедной нагрузки (веса отложения) на круглоцилиндрические элементы высотных сооружений (тросы, стержни, трубы и т. п.) по аэроклиматическим характеристикам облачности, полученная в работе автора [1], имеет вид

$$P = \bar{E} \beta \omega u d \tau, \quad (1)$$

где P — гололедная нагрузка кг/пог.м; ω — водность облаков, кг/м³; u — скорость переноса облаков, м/с; τ — продолжительность

их существования, c ; d — диаметр троса или стержня, m ; $\bar{E}$ — полный интегральный коэффициент захвата, показывающий, какая часть капельножидкой влаги, переносимой за время τ через осевое сечение цилиндра, оседает на его поверхности; β — коэффициент намерзания, показывающий, какая доля оседающей на поверхности тела влаги превращается в лед.

Как показано в [6]

$$\bar{E} = f[u, d, r_{\text{ср}}, n(r)],$$

$$\beta = f(u, d, t, w, \bar{E}), \quad (2)$$

где $n(r)$ — функция распределения облачных капель по размерам $r_{\text{ср}}$ — средний радиус капель, t — температура воздуха.

В [1] были рассчитаны величины $\bar{E}$ и β при различных значениях определяющих их параметров $u, d, r_{\text{ср}}, t, w$.

Так как значения водности облаков w и скорости ветра u в процессе нарастания отложений не остаются постоянными, а их максимумы и минимумы кратковременны, для расчетов как средних, так и экстремальных значений гололедных нагрузок следует использовать средние величины $\bar{w}$ и $\bar{u}$. Для расчета максимальных значений P , представляющих наибольший интерес для практики, необходимо знать максимальную продолжительность существования облаков с отрицательной температурой (τ_{max}).

И. П. Половиной были рассчитаны τ_{max} за 6-летний период (1955—1960 гг.) для облаков St—Sc в холодное полугодие над некоторыми пунктами Украины (Киев, Львов, Харьков и Одесса). Эти данные приведены в [4, 9] и составляют 110 ч для Львова, 153 ч для Киева, 186 ч для Одессы и 297 ч для Харькова.

По данным Г. Ф. Прихотько [10], обработавшего материалы по облачности для тех же пунктов за тот же период, низкая облачность с $\tau > 30$ ч над Львовом и Киевом наблюдалась в слое 0—300 м, а над Одессой и Харьковом — в слое 0—600 м. Так как слоистые облака в холодное время года довольно редко опускаются ниже 100 м, полученные Половиной значения τ_{max} для Львова и Киева можно, очевидно, отнести к слою 100—300 м, а для Харькова и Одессы — к слою 100—600 м.

Средние скорости переноса St—Sc над рассматриваемыми пунктами в холодное полугодие, согласно данным Прихотько [10], близки друг к другу и составляют 6 м/с на уровне 100 м и 10 м/с на уровне 500 м. Для промежуточных высот значения u нетрудно получить путем линейной интерполяции.

Величины средней водности облаков St—Sc для рассматриваемых пунктов были взяты из работ [4, 8], в которых даны значения $\bar{w}$ для St—Sc над различными районами по месяцам. Эти данные относятся к определенному уровню над нижней кромкой облаков. Для определения значений $\bar{w}$ на разных высотах были ис-

использованы средние величины вертикального градиента водности γ_w в St—Sc при отрицательной температуре [7, 12].

В целях удобства сравнения полученных значений гололедных нагрузок с соответствующими нормативами, расчеты производились для круглого цилиндра диаметром 10 мм и длиной 1 м.

При расчетах по формуле (1) можно принять, что $\beta=1$, так как используемые характеристики облачности относятся к широкому диапазону температуры (от 0 до -15°C), а для $d=10$ мм, $u=6-10$ м/с и $w=0,12-0,28$ кг/м³ $\beta=1$ уже при t от -1 до -2°C .

Тогда формула (1) примет вид

$$P_{\max} = 0,01 \bar{E} \bar{w} \bar{u} \tau_{\max}. \quad (3)$$

По этой формуле были рассчитаны максимумы гололедных нагрузок для рассматриваемых пунктов на различных высотах. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где $b_{\max}$ — толщина стенки гололеда с плотностью 0,9 г/см³, b_n — нормативная толщина стенки гололеда, возможная один раз в 5 лет, согласно СНиП.

Из таблицы видно, что расчетные величины гололедных нагрузок оказались наибольшими для Харькова и наименьшими для Львова. Это объясняется тем, что максимальная продолжительность непрерывного существования облаков в Харькове больше, чем во всех других рассматриваемых пунктах.

Величина нагрузки на уровне 100 м в 2,2—2,5 раза меньше, чем на высоте 300 м и в 5 раз меньше нагрузки, полученной для высоты 500 м. Такое вертикальное распределение $P_{\max}$ объясняется увеличением водности облаков и скорости ветра с высотой.

Согласно [11], значения нормативной толщины стенки гололеда b_n , возможные один раз в 5 лет на высотах 200, 300 и 400 м, должны быть одинаковыми во всех рассматриваемых пунктах. Между тем, как видно из табл. 1, расчетные максимумы толщины стенки за 6-летний период на высоте 200 м, например во Львове, в 1,4 раза меньше, чем в Одессе и в 1,7 раза меньше, чем в Харькове.

Из табл. 1 также видно, что полученные значения $b_{\max}$ на высотах 200, 300 и 400 м во всех рассматриваемых пунктах ниже соответствующих нормативов: во Львове в среднем на 20%, в Одессе на 30%, в Киеве на 35% и в Харькове на 50%.

Это приводит к выводу, что районирование территории, например Европейской части СССР, по гололедным нагрузкам на высотные сооружения, произведенное с учетом аэроклиматических характеристик облачности, позволит, по-видимому, в какой-то мере снизить существующие нормативы для ряда пунктов, что приведет к удешевлению конструкций и экономии ценных материалов.

Результаты, полученные в настоящей работе, следует считать ориентировочными по ряду причин. Во-первых, взятые из [11] значения u относятся не к конкретным периодам существования облаков с продолжительностью τ_i , а ко всему 6-летнему периоду наблюдений над облачностью в холодное время года. Во-вторых,

Таблица 1

Максимальные (за период 1955—1960 гг.) значения
гололедных нагрузок, рассчитанные
по аэроклиматическим данным

H м	u м/с	$w \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	$\tau_{\max}$ ч	$P_{\max}$ кг/м	$b_{\max}$ мм	b_H мм
Киев						
100	6	0,15	153	1,34	17	10
200	7	0,18	153	2,08	23	35
300	8	0,21	153	2,96	28	45
Львов						
100	6	0,15	110	0,95	14	20
200	7	0,18	110	1,46	18	35
300	8	0,21	110	2,09	23	45
Одесса						
100	6	0,15	186	1,60	19	20
200	7	0,18	186	2,47	25	35
300	8	0,21	186	3,53	31	45
400	9	0,23	186	5,08	38	60
500	10	0,25	186	6,49	43	—
600	11	0,27	186	8,09	49	—
Харьков						
100	6	0,12	297	2,07	23	10
200	7	0,15	297	3,38	30	35
300	8	0,18	297	4,93	37	45
400	9	0,20	297	7,12	45	60
500	10	0,22	297	9,17	52	—
600	11	0,24	297	11,56	59	—

высота нижней кромки облаков условно принималась равной 100 м, что является грубым приближением.

Более точные расчеты гололедных нагрузок могут быть выполнены по аэроклиматическим характеристикам всех отдельных периодов непрерывного существования облаков St, Sc, Ns, Frnb и их сочетаний в холодное время года. Располагая данными о продолжительности каждого из таких периодов, можно путем статистической экстраполяции рассчитать вероятностные значения τ , что позволит определить величины гололедных нагрузок, возможные один раз в заданное число лет. Для каждого из периодов существ-

ования облачности необходимо определить среднюю скорость переноса облаков на различных высотах, температуру в облачных слоях, а также средние значения высоты нижней границы и вертикальной мощности облаков. При этом желательно производить расчеты отдельно для St—Sc, Ns—Frnb и их сочетаний, как это сделано, например, в [4].

Результаты, представленные в табл. 1, как уже указывалось выше, относятся к круглому цилиндру диаметром 10 мм. Для расчета нагрузок на круглоцилиндрические элементы других диаметров можно использовать соответствующие поправочные коэффициенты, данные в [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов В. Г. Метеорологические условия образования гололеда на высотных сооружениях. Л., Гидрометеиздат, 1972. 98 с. (Труды ГГО. Вып. 311.)
2. Глухов В. Г. Об интенсивности обледенения проводов разного диаметра.—«Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 15—23.
3. Дубровина Л. С. Некоторые характеристики водности облаков над территорией СССР.—«Труды НИИАК», 1967, вып. 44, с. 39—54.
4. Заварина М. В., Михель В. М. Климатические характеристики облаков в зоне недостаточного увлажнения Европейской территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1968. 117 с. (Труды ГГО. Вып. 219.)
5. Клинов Ф. Я. Изморозь и гололед в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970. 66 с.
6. Мазин И. П. Физические основы обледенения самолетов. М., Гидрометеиздат, 1957, 120 с.
7. Минервин В. Е., Мазин И. П., Бурковская С. Н. Некоторые новые данные о водности облаков.—«Труды ЦАО», 1958, вып. 19, с. 3—33.
8. Минервин В. Е. Сезонное и географическое распределение водности облаков.—«Труды ЦАО», 1961, вып. 36, с. 27—33.
9. Половина И. П. Водозапасы слоистых и слоисто-кучевых облаков в холодное полугодие над Украиной.—«Труды УкрНИГМИ», 1965, с. 69—79.
10. Прихотько Г. Ф. Некоторые характеристики низкой облачности на Украине.—«Труды УкрНИГМИ», 1958, вып. 13, с. 87—97.
11. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.
12. Физика облаков. Под ред. А. Х. Хргиана. Л., Гидрометеиздат, 1961. 458 с.

К РАСЧЕТУ НОРМАТИВНОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ГОЛОЛЕДЕ

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) скорость ветра при гололеде для воздушных линий (ВЛ) электропередачи должна приниматься равной половине максимальной расчетной скорости ветра, но не менее 15 м/с при толщине стенки гололеда 15 мм и более, т. е. выбор скорости ветра при гололеде производится по карте ветрового районирования с учетом гололедного районирования. При этом предлагается определить гололедные нагрузки на провода и тросы, используя толщину стенки гололеда, приведенную к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$.

Исследования, проведенные В. В. Бургсдорфом и Н. С. Муретовым [1] по данным о гололедных образованиях в СССР (830 случаев), а также по данным отдельных, характерных для каждого района гололедности, гидрометеорологических станций (ГМС), показали, что в районах гололедности I и II скорость ветра при гололеде, равная 11—12 м/с, повторяется не чаще одного раза в 15 лет, 13—14 м/с — не чаще одного раза в 25 лет; для районов гололедности III и IV скорость ветра при гололеде, равная 15 м/с, бывает один раз в 12—15 лет.

Более высокие скорости ветра — около 16—20 м/с — могут наблюдаться при обледенении в районах гололедности III, IV и особом примерно один раз в 20 лет, а скорости 12—15 м/с — частично в районе гололедности II, а также в районах гололедности III и IV один раз в 12—15 лет.

Указанные исследования подтверждают рекомендации ПУЭ только в общих чертах, не определяя периода повторяемости нормативных сочетаний гололеда и ветра и не учитывая действительного объемного веса гололедно-изморозевых отложений.

В табл. 1 приведены значения нагрузок от ветра и гололеда на провода АС-35, АС-150 и АСО-240, рассчитанные по нормативам различных стран [2, 3]. В таблице приняты следующие обозначения нормативных нагрузок на провода: P_2 — от веса гололеда, P_3 — от веса провода, покрытого гололедом, P_4 — от давления ветра на провод, свободный от гололеда, P_5 — от давления ветра на провод, покрытый гололедом; q_n — нормативный скоростной напор ветра; q_r — скоростной напор ветра, соответствующий нормативной горизонтальной нагрузке от давления ветра на провод, покрытый гололедом с нормативной толщиной стенки гололеда b ;

Q — расчетный вес гололеда на 1 м провода; v_n — нормативная скорость ветра; d — диаметр провода ВЛ.

Из сравнения отечественных норм с зарубежными следует, что в Советском Союзе нормативные гололедные нагрузки, определяющие механический расчет проводов, незначительно отличаются от расчетных нагрузок других стран. Нормативные ветровые нагрузки, определяющие расчет промежуточных опор, в СССР ниже, чем в США, Канаде, Японии, Австрии и примерно равны принятым в Италии, Турции и ФРГ.

Очевидно, что на величину ветровых нагрузок при гололеде влияют размеры отложений. Во многих странах, например Великобритании, США, Канаде и Италии, нормативная толщина стенки гололеда принята при объемном весе $0,92 \text{ г/см}^3$, в СССР — при объемном весе $0,9 \text{ г/см}^3$. Фактический объемный вес гололедно-изморозевых отложений, как известно, может изменяться в широких пределах — от $0,05$ до $0,92 \text{ г/см}^3$.

Учитывая возможность значительных колебаний ветровых нагрузок при гололеде, во многих странах, например Австрии, Турции, Франции, нагрузка от гололеда задается весом, а воздействие ветра учитывается на провода, не покрытые гололедом.

В Великобритании, Канаде и США значения скоростных напоров ветра при гололеде приняты значительно большими (39 кг/м^2), чем в СССР, где, в частности, на территории Украины, нормативные скоростные напоры ветра колеблются от 7 до 14 кг/м^2 .

Низкие температуры при гололеде, принимаемые в этих странах при расчете ВЛ, дают основание предполагать, что расчетные условия отнесены к изморози, и сравнительно большие значения скоростных напоров ветра приняты для компенсации уменьшения размеров отложения, приведенного к объемному весу $0,92 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, отечественные нормы давления ветра на провода, покрытые гололедом, как правило, являющиеся расчетными в районах с нормативной толщиной стенки гололеда 10 мм и более, ниже аналогичных нагрузок в ряде зарубежных стран.

Согласно [1], отложения изморози сопровождаются скоростями ветра меньшими, чем отложения гололеда и мокрого снега, и поэтому нормируемая скорость ветра при гололеде для изморози является завышенной, чем в основном компенсируется уменьшение от приведения к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$.

Однако многочисленные расчеты давления ветра на провода, покрытые изморозью, показывают, что нагрузка при этом часто превосходит нормативные значения, особенно для проводов малых диаметров. Очевидно, увеличение скорости ветра в этих случаях не компенсирует приведение размеров отложения изморози к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$.

Так, например, с 8 по 13 января 1964 г. гололедный пост на подстанции 35/10 кВ в Диканьке Полтавской области регистрировал на проводах отложения зернистой изморози. Ближайшая к Диканьке ГМС в г. Полтаве отметила отложение зернистой изморози при $a=75 \text{ мм}$, $c=58 \text{ мм}$ и $P=208 \text{ г/м}$. При подсчетах по

Нагрузки на провода от гололеда и ветра по нормативам разных стран

Страна	Ветровые нагрузки, кг/м²			Гололедные нагрузки, кг/м²			Нормативы, принятые в расчет				
	$\frac{P_4}{P_s}$			$\frac{P_3}{P_2}$			q_H кг/м²	q_T кг/м²	b мм	Q г/м	γ_H м/с
	AC-35	AC-150	ACO-240	AC-35	AC-150	ACO-240					
СССР	$\frac{0,272}{0,149}$	$\frac{0,551}{0,219}$	—	$\frac{0,399}{0,370}$	$\frac{0,927}{0,952}$	—	27	6,75	5	—	—
	$\frac{0,370}{0,384}$	$\frac{0,750}{0,502}$	—	$\frac{0,670}{0,772}$	$\frac{1,381}{1,470}$	—	45	11,25	10	—	—
	$\frac{0,415}{0,645}$	$\frac{0,842}{0,790}$	—	$\frac{1,140}{1,310}$	$\frac{1,967}{2,120}$	—	55	14,00	15	—	—
	—	$\frac{0,695}{0,324}$	$\frac{0,807}{0,380}$	—	$\frac{0,927}{0,980}$	$\frac{1,372}{1,460}$	40	10,00	5	—	—
	—	$\frac{0,800}{0,557}$	$\frac{0,930}{0,623}$	—	$\frac{1,381}{1,490}$	$\frac{1,891}{1,990}$	50	12,50	10	—	—
Австрия	—	$\frac{0,960}{1,110}$	$\frac{1,120}{1,200}$	—	$\frac{2,707}{2,930}$	$\frac{3,347}{3,560}$	65	10,25	20	—	—
	$\frac{0,883}{—}$	$\frac{1,790}{—}$	$\frac{1,960}{—}$	$\frac{0,672}{—}$	$\frac{1,360}{—}$	$\frac{1,835}{—}$	125	—	—	$180\sqrt{d}$	—
Великобритания	—	—	—	$\frac{0,318}{0,602}$	$\frac{0,897}{1,292}$	$\frac{1,337}{1,792}$	—	39	9,0	—	—
Дания	$\frac{0,705}{—}$	$\frac{1,410}{—}$	$\frac{2,920}{—}$	—	—	—	100—120	—	—	—	—
Италия	$\frac{0,515}{—}$	$\frac{1,040}{—}$	$\frac{1,220}{—}$	$\frac{0,857}{—}$	$\frac{1,622}{—}$	$\frac{2,162}{—}$	72	—	12	—	—

Канада	$\frac{—}{0,985}$	$\frac{—}{1,380}$	$\frac{—}{1,600}$	$\frac{0,441}{1,080}$	$\frac{1,078}{1,750}$	$\frac{1,549}{2,220}$	39	—	6,3	—	—
США	$\frac{—}{1,580}$	$\frac{—}{1,980}$	$\frac{—}{2,200}$	$\frac{0,992}{1,860}$	$\frac{1,807}{2,680}$	$\frac{2,367}{3,230}$	—	—	12,7	—	—
Кипр	$\frac{0,552}{—}$	$\frac{1,120}{—}$	$\frac{1,300}{—}$	$\frac{0,630}{—}$	$\frac{1,327}{—}$	$\frac{1,829}{—}$	78	—	9,5	—	—
Турция	$\frac{0,325}{—}$	$\frac{0,740}{—}$	$\frac{0,860}{—}$	$\frac{0,772}{—}$	$\frac{1,847}{—}$	$\frac{2,617}{—}$	44	—	$\sqrt{300d}$	—	—
Франция	$\frac{0,330}{0,348}$	$\frac{0,790}{0,790}$	$\frac{0,920}{0,918}$	$\frac{2,150}{2,180}$	$\frac{2,617}{2,730}$	$\frac{2,997}{3,070}$	49	—	—	—	—
ФРГ	$\frac{0,405}{—}$	$\frac{0,816}{—}$	$\frac{0,956}{—}$	$\frac{2,650}{—}$	$\frac{3,117}{—}$	$\frac{3,437}{—}$	—	—	—	—	29
Япония	$\frac{0,705}{1,220}$	$\frac{1,430}{1,740}$	$\frac{1,660}{2,020}$	$\frac{0,395}{1,280}$	$\frac{1,007}{2,020}$	$\frac{1,463}{2,500}$	100	—	6	—	—

существующей методике эти данные соответствуют толщине приведенной стенки гололеда, равной 10 мм.

При этом фактическая максимальная нагрузка от давления ветра на провод марки АС-35 (принят условно), покрытый изморозью, в 2,2 раза превосходила расчетную, которая определялась без учета фактического объема веса отложения; фактическая максимальная нагрузка от веса и ветра при изморози была больше, чем рассчитанная, почти в 2 раза. Следует отметить, что рассчитанные по существующей методике нагрузки на ВЛ оказались невелики, однако в действительности в зоне подстанции 35/10 кВ, в Диканьке были зарегистрированы обрывы проводов на десяти линиях и разрушения железобетонных приставок на двух линиях.

Недостатки существующих норм вызвали ряд исследований, посвященных методам определения гололедно-ветровых нагрузок. М. П. Меламед и Л. Б. Гарцманом [5] предложен комплексный учет нагрузок от гололеда и ветра, однако при этом расчет давления ветра производится на провод, покрытый гололедом, толщина стенки которого приведена к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$. Учитывая разницу между фактическими и приведенными размерами гололеда, можно утверждать, что, как правило, нагрузки, рассчитанные по [5], будут занижены. Г. П. Халитова [7] выполнила вероятностные расчеты гололедно-ветровых нагрузок по данным 14 ГМС Карагандинской области. Однако к недостаткам работы следует отнести, во-первых, необоснованное применение коэффициента пересчета толщины приведенной стенки гололеда, во-вторых, использование в качестве исходного материала таблиц ТМ-5 и, в-третьих, выбор в качестве расчетного малого диаметра отложения.

Последнее обстоятельство из-за неучета фактора кручения проводов приводит во всех случаях к заниженным значениям расчетных нагрузок. Представляется более оправданным рассчитывать давление ветра на диаметр отложения, приведенный к диаметру цилиндра с фактическим объемным весом. Естественно, что при этом возникает необходимость определения величины приведенного диаметра отложения на проводах ВЛ по данным ГМС.

Для этой цели по данным гололедных постов сельской сети на территории Украины был рассчитан коэффициент K для пересчета приведенных диаметров отложения с провода гололедного станка на провода ВЛ.

Знание коэффициентов пересчета приведенных диаметров позволяет выбрать годовые максимумы горизонтальных гололедно-ветровых нагрузок, воздействие которых приводит к наиболее тяжелым и массовым авариям.

В соответствии с [6]

$$P_{5 \max} = 1,2KqD_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $P_{5 \max}$ — годовой максимум горизонтальной нагрузки от давления ветра на провод, покрытый гололедом, K — коэффициент пересчета, q — скоростной напор, соответствующий максимальной го-

горизонтальной нагрузке от давления ветра на провод, покрытый гололедом, $D_{пр}$ — приведенный диаметр отложения.

Для определения нагрузки P с заданной повторяемостью было выбрано первое предельное распределение

$$F(P) = e^{-e^{-\delta(P-q)}}, \quad (2)$$

где $F(P)$ — обеспеченность данной горизонтальной нагрузки от давления ветра на провод, покрытый гололедом; δ и q — параметры распределения.

Обширная статистическая проверка и сравнительный анализ по данным 144 ГМС показали, что выбранное распределение наиболее удовлетворительно аппроксимирует материалы наблюдений для обеспеченности свыше 40%.

Более точно обеспеченность по заданной нагрузке, или нагрузка с заданной обеспеченностью, может быть определена по следующему выражению:

$$F(P_{ср}) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(P) e^{-\frac{(P-P_{ср})^2}{2\sigma^2}} dP. \quad (3)$$

Сопоставительные расчеты, произведенные по формулам (2) и (3), показали, что величина погрешности не превосходит 1%. Поэтому вполне допустимо пользоваться упрощенным методом.

Скорость ветра при гололеде с нормативной толщиной стенки b может быть определена из выражения

$$v = \sqrt{\frac{P_n}{0,075(d+2b)}}, \quad (4)$$

где P_n — нормативная горизонтальная нагрузка от давления ветра на провод, покрытый гололедом, с заданной повторяемостью, d — диаметр провода ВЛ.

Получаемая из [5] скорость ветра является условной величиной, поскольку условна и нормативная толщина стенки гололеда, но их сочетание дает действительную величину давления ветра на провод, покрытый гололедом.

Таким образом, нормативной скоростью ветра при гололеде называется условная скорость ветра, которая при воздействии на провод, покрытый гололедом с нормативной толщиной стенки, создает с принятой повторяемостью такое же давление, что и действительная скорость ветра при воздействии на провод, покрытый отложением с фактическими размерами.

При использовании нормативной скорости ветра при гололеде в расчетах давления ветра на опоры будет допускаться определенная погрешность. Однако в режиме гололедно-ветровых нагрузок момент от давления ветра на опоры, как правило, не превышает 5% суммарного момента, поэтому погрешность невелика. Так, например, если погрешность в скоростном напоре будет равна 20%, то при определении изгибающего момента на опору погрешность не превысит 1%.

Для выяснения эффективности использования описанной методики были рассчитаны фактические нагрузки от давления ветра на провод, покрытый гололедом, по данным 114 ГМС, расположенных на территории Украины.

Затем по данным этих же ГМС были рассчитаны нормативные значения толщины стенки гололеда, приведенные к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$.

Для всех ГМС были получены нормативные скорости ветра при гололеде для проводов с осредненным для линии 6—10 кВ диаметром, равным 8 мм.

Результаты расчетов показали, что скорость ветра при гололеде существенно отличается от половины максимальной скорости. При этом значительное увеличение скорости ветра (иногда до 80% максимальной) наблюдается в восточной части Украинской ССР, т. е. в зоне образования гололеда и сильных ветров в результате выхода так называемых южных циклонов, которые охватывают районы Крыма, Азовского моря, а также выходят на районы среднего течения Днепра и дальше на восток (Одесская, Николаевская, Херсонская, Запорожская, Донецкая, Ворошиловградская, отчасти Харьковская, Днепропетровская, Кировоградская и Черкасская области).

В то же время в областях, расположенных на Волынской и Подольской возвышенностях (Винницкая, Хмельницкая, Тернопольская, Ровенская и Волынская), а также в северных районах республики (Черниговская и отчасти Киевская и Житомирская области), где синоптические процессы, обуславливающие образование больших гололедов и сильных ветров, не совпадают, скорости ветра при гололеде меньше половины максимальной, а иногда составляют только 40—45% максимальной.

Существенные отличия фактических гололедно-ветровых нагрузок от нормативных хорошо иллюстрирует наблюдавшееся различие в аварийности ВЛ в отдельных зонах.

Статистические данные свидетельствуют, что средняя годовая аварийность, связанная с разрушениями опор, для района гололедности I примерно равна 2%, в то время как для района гололедности II — только 0,5%.

Разработанная методика широко используется в практике проектирования институтом Сельэнергопроект (Украинское отделение).

Выводы

1. Использование в расчетах скорости ветра при гололеде, равной в соответствии с ПУЭ половине максимальной скорости ветра, в ряде случаев приводит к существенной погрешности.

2. Выбор скорости ветра при гололеде с учетом особенностей рельефа позволит рационально использовать капиталовложения при сооружении ВЛ распределительных сетей и повысит надежность эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 206 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
2. Бухарин Е. И. и др. Обзор и сравнение зарубежных норм на проектирование конструктивной части линий электропередачи. М., Госэнергоиздат, 1960, с. 113.
3. Ланда М. Л. Особенности определения расчетных стенок гололеда при проектировании воздушных линий напряжением 6—10 кВ.— Доклады научно-технической конференции «Надежность снабжения электрической энергией потребителей, подключенных к распределительным сетям в сельской местности». Вып. 4. М., 1969, с. 49—57.
4. Левин М. С. Опыт применения различных норм для расчета электрических сетей с целью определения экономически наиболее выгодных и технически целесообразных решений.— Материалы 14 сессии рабочей группы по сельской электрификации комитета по электроэнергии Европейской экономической комиссии ООН. Женева, 1966, с. 30—39.
5. Меламед П. М., Гарцман Л. Б. Принципы комплексного учета метеорологических факторов при расчетах механических нагрузок на линии электропередачи.— «Науч. труды Ташкентского гос. ун-та», 1966, вып. 270, с. 24—29.
6. Руководящие указания по расчету проводов и тросов воздушных линий электропередачи. М.—Л., «Энергия», 1965, 98 с.
7. Халитова Г. Н. Оценка совместного воздействия гололедной и гололедно-ветровой нагрузок на линии электропередачи.— В кн.: Проблемы общей энергетики и единой энергетической системы. Вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1967, с. 19—25.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ КРИВЫХ ПИРСОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНЫХ ВЕЛИЧИН ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В соответствии с теоретическими положениями и практически данными метеорологии режим гололедных явлений (равно как и всех других) может иметь самый различный вероятностный характер в зависимости от комплекса определяющих условий. Допуская действительность этого положения, следует считать правомерным сопоставление реальных режимов с различными законами распределения, являющимися универсальной формой аппроксимации одномерных случайных величин.

Утверждение, что все многообразие режимов любого метеорологического элемента может быть выражено только вариацией параметров какого-либо одного закона, не имеет теоретического обоснования и не может быть доказано практически.

В то же время вследствие недостаточности исходных выборок возникают большие трудности для обоснования наиболее близкой теоретической модели закона распределения. Чисто статистические методы подбора часто приводят к совпадающим результатам при использовании различных законов распределения для одних и тех же исходных выборок.

Все это означает, что нельзя отдать полного предпочтения ни одному из методов, основанных на применении того или иного закона распределения, и что должна существовать группа методов, соответствующая в теоретическом плане разным законам, а в практическом — различной степени вычислительной сложности (простейшие графические методы, графо-аналитические и аналитические с использованием ЭВМ).

Очень важной задачей является теоретическая оценка границ применимости каждого метода с обязательной объективной проверкой на фактическом материале. Практическое использование того или иного метода в этом случае будет вполне обоснованным с точки зрения существующих на данный момент научных проработок вопроса.

Исходя из таких общеметодических предпосылок, авторами была поставлена задача машинной реализации достаточно широкой системы вероятностных кривых, позволяющей использовать ее для статистической аппроксимации распределений самых различных метеорологических показателей с учетом всевозможных вариаций их режимов. В качестве такой системы использована гене-

гически единая система кривых распределений Пирсона [6], обладающая замечательным свойством, а именно: любое эмпирическое распределение может быть сопоставлено с одной из кривых этой системы.

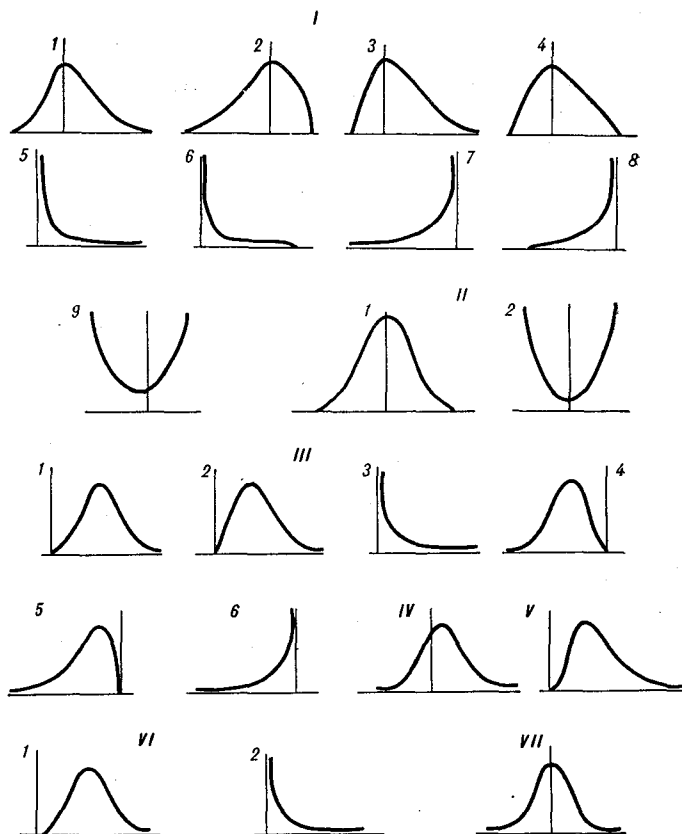


Рис. 1. Форма запрограммированных кривых Пирсона.
Римские цифры — типы кривых, арабские — подтипы

Техника решения задачи подробно рассмотрена в работе [5]. Здесь остановимся только на общей схеме этого метода, которая основана на следующем:

а) система кривых Пирсона представлена семью основными типами кривых (рис. 1), включающими 23 подтипа;

б) входными данными служат сгруппированные эмпирические распределения;

в) определение типа (подтипа) кривой, ее параметров и счет производятся ЭВМ по заданной программе с использованием метода моментов и численного интегрирования (программа составлена для двух ЭВМ — БЭСМ-2М и Минск-22);

г) после подсчета выбранного ЭВМ типа (подтипа) кривой выдается аппроксимированное распределение в форме частот, вероятностей и обеспеченностей классов, а также все основные статистики и графики эмпирических и рассчитанных частот.

Авторами с помощью системы кривых Пирсона проанализированы результаты около 400 аппроксимаций распределений различных метеорологических элементов, в том числе: стенок гололеда (49 случаев), скорости ветра при гололеде (51 случай) и температуры воздуха при гололеде (46 случаев). В настоящей статье рассмотрены только результаты аппроксимации указанных характеристик гололедных явлений и прежде всего величин гололедных отложений.

Метеорологические станции Тянь-Шаня, данные которых были использованы в качестве исходных выборок, располагаются в самых различных физико-географических условиях горной страны (предгорная равнина, межгорные долины и котловины, узкие долины и ущелья, гребневая зона хребтов, склоны) в диапазоне высот от 0,3 до 3,6 км. Следовательно, исходные выборочные распределения соответствуют разнообразным режимам гололеда, несмотря на сравнительную территориальную ограниченность региона.

Просмотр эмпирических распределений гололедных стенок показал, что внешне они имеют экспоненциальный характер. Однако отсюда еще не следует, что ряд распределений не может иметь моды, так как о поведении кривой внутри первого — второго классов судить трудно. Учитывая естественную ограниченность нулем слева и внешний вид эмпирических распределений, можно только сказать, что характерными должны быть экспоненциальные кривые и реже модальные с резко выраженной правой асимметрией.

В результате счета в 47 случаях ЭВМ были реализованы экспоненциальные кривые подтипов 5 и 6 (тип. I) и 3 (тип III) и в двух случаях — модальные кривые с правой асимметрией подтипа 2 (тип II). Эти кривые, выбранные по значению критерия Пирсона χ , находятся в соответствии с рассмотренным общим характером эмпирических распределений. Следует также отметить, что тип III является переходным по отношению к основным типам I и VI, когда соответственно $\chi \rightarrow \mp \infty$ (практически для типа III должно быть $|\chi| > 4$).

Во всех случаях отмечалось качественно хорошее согласие эмпирических гистограмм и выравнивающих их теоретических кривых. На рис. 2 а показаны графики для реализованных кривых различных подтипов.

В качестве численного критерия согласия был использован критерий Колмогорова λ . Критерий Пирсона χ^2 применить в данном случае не представлялось возможным из-за малого числа (3—5) значимых классов (по объему больших 5—10). Оказалось, что в 46 случаях с уровнем значимости не менее 0,50 расхождения можно считать случайными. Только в трех случаях уровень значимости был менее 0,30.

Все вышеизложенное наглядно подтверждает принципиальную возможность аппроксимации распределений гололедных стенок системой кривых Пирсона. Как указывалось выше, это отнюдь не означает, что для этой цели нельзя применять другие типы кривых, а говорит лишь о том, что с точки зрения как теории статистики, так и практики эти кривые с успехом могут быть использо-

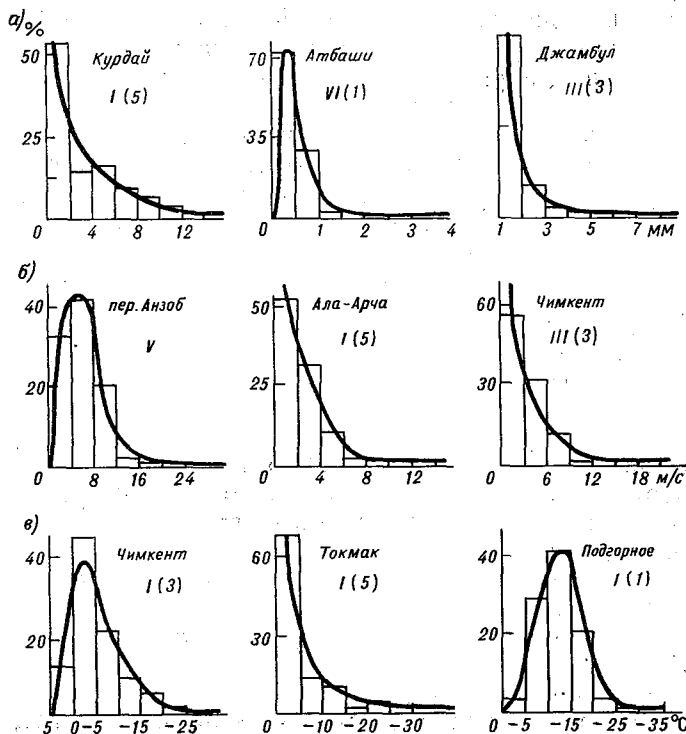


Рис. 2. Примеры выравнивания эмпирических распределений (гистограммы и теоретические кривые):

а — эквивалентная стенка гололеда, б — скорость ветра при гололеде, в — температура воздуха при гололеде

ваны (наравне с другими) для решения данного вопроса. К преимуществам системы кривых Пирсона несомненно следует отнести ее универсальность и большую гибкость [6]. Сложность же аналитических решений полностью устраняется использованием ЭВМ.

Для расчета гололедных нагрузок на сооружения [7] необходимо иметь оценки вероятных максимальных величин гололедных отложений, соответствующих области малых вероятностей переменной (высоким обеспеченностям). С этой точки зрения очень важным является характер поведения кривой в концевой части распределения, так как именно эта часть распределения является

рабочей. Хорошее общее (совокупное для всей выборки) согласование теоретических и эмпирических распределений еще не свидетельствует об обязательно таком же согласовании их в области экстремалей.

К сожалению, статистическая теория не дает ответа на вопрос о критериальной оценке согласования концевых частей распределений. Единственно, что можно сделать в данном случае, это определить приближенно, не носят ли здесь расхождения систематического характера с учетом знака. Для этого надо сравнить теоретические и эмпирические объемы отсеченных правых частей распределений.

Были найдены величина и знаки расхождений отсеченных частей распределений в пределах от 5 до 30% общего объема. Оказалось, что эти расхождения невелики по величине (табл. 1)

Таблица 1

Сходимость объемов отсеченных правых частей распределений

Градации расхождений

($n_T - n_a$): n_a , % . . 0—5 5—10 10—15 15—20 20—25 25—30 30—35 35—40 40—45

Число случаев, % 13 20 22 26 6 2 5 2 4

и в большинстве случаев (около 90%) не превышают 20—25% величины отсеченной части. В знаках $\Delta n = (n_T - n_a)$ наблюдается близкая симметрия, что говорит о том, что кривые в концевой части распределения в среднем проходят интерполяционным образом и нет систематического завышения или занижения результатов. Это также должно следовать из случайного характера оценки параметров распределений по первым четырем эмпирическим моментам.

Следовательно, возможная практическая проверка на наблюдениях метеорологических станций Тянь-Шаня показывает, что нет каких-либо данных, характеризующих такое поведение кривых Пирсона в концевой части распределений, которое противоречило бы возможности их использования для вероятностных оценок экстремалей.

Будет весьма показательным сравнить рассчитанные значения гололедных стенок, полученные различными методами для одних и тех же исходных данных. Помимо чисто практического интереса такое сравнение может дать дополнительное, но веское обоснование возможности применения системы кривых Пирсона для вероятностных расчетов экстремалей.

На рис. 3 приведены графики, иллюстрирующие соотношения рассчитанных значений гололедных стенок q , вероятных один раз в 15 лет, полученные по системе кривых Пирсона (метод ниже обозначен $\times$), по графическому методу ВНИИЭ — ГГО (В — Г) [1—3], по кривой Пирсона χ^2 [4], являющейся предельным случаем кривых Пирсона типа III, у которой параметром является

стандарт переменной, и по закону Пуассона (П), где параметром служит среднее значение переменной. Уравнения перехода для периодов 10 и 15 лет можно записать в виде:

а) для 10-летней повторяемости

$$\begin{aligned} q_x &= 0,87q_{B-\Gamma} - 0,1 \pm 1,0, \\ q_x &= 0,98q_{x^2} + 0,7 \pm 1,3, \\ q_x &= 1,44q_{\Pi} + 0,3 \pm 1,6, \end{aligned} \quad (1)$$

б) для 15-летней повторяемости

$$\begin{aligned} q_x &= 0,89q_{B-\Gamma} - 0,68 \pm 1,3, \\ q_x &= 0,98q_{x^2} + 0,7 \pm 1,5, \\ q_x &= 1,44q_{\Pi} + 0,3 \pm 1,8. \end{aligned} \quad (2)$$

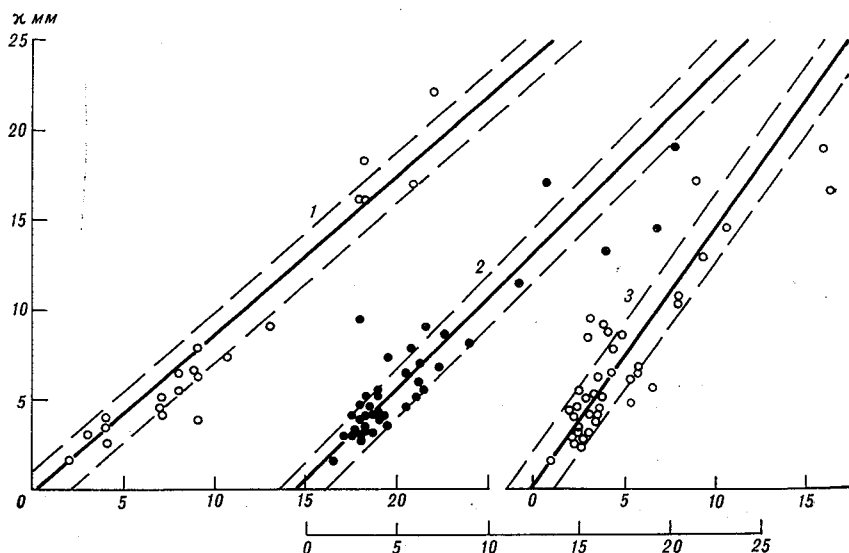


Рис. 3. Соотношения максимальных величин гололедных стенок, вероятных один раз в 15 лет, рассчитанных различными методами [пунктиром выделены диапазоны стандартов случайных уклонений от уравнений (2)]:

1 — по методу ВНИИЭ—ГГО, 2 — по методу x^2 , 3 — по закону Пуассона

Как и следовало ожидать, соответственные уравнения (1) и (2) в пределах изменения переменной дают численно совпадающие результаты. Во всех случаях стандартная ошибка перехода по уравнениям не превышает $\pm 1-2$ мм, т. е. находится в пределах точности исходных данных и, следовательно, их практическое использование вполне допустимо.

Из (1) и (2) следует, что если исходить из величин стенок, получаемых по методу x , то по методу ВНИИЭ—ГГО эти величины выше примерно на 10—15%, по методу x^2 — практически одина-

ковы, а по закону Пуассона — ниже на 30%. Эти цифры относятся к оценке расхождений методов, полученной для данной группы ГМС. Если соотношения (1) и (2) сохранятся для величин стенок больших 30—40 мм, то методы χ , ВНИИЭ — ГГО и Пуассона приводят к значительной разнице вероятностных оценок величин гололедов при использовании одного и того же исходного материала.

Таблица 2

Величины стенок (мм), рассчитанные по уравнениям (2)

Метод (закон)	Величина стенки по методу χ , мм					
	5	10	15	20	25	30
ВНИИЭ—ГГО	6	12	18	23	29	34
χ^2	4	10	15	20	25	30
Пуассон	4	7	10	14	17	21

Однако выход за рамки диапазона исходных данных в рассматриваемом случае ничем не оправдан. К тому же величина стенок по методу ВНИИЭ — ГГО определялась графически и ошибки могут иметь субъективный характер. В диапазоне же величин гололедных отложений до 20—25 мм и даже до 30 мм систематическое (для данной группы ГМС) расхождение методов χ (χ^2) и ВНИИЭ — ГГО является практически незначимым, так как по абсолютной величине не превышает возможной точности определения вероятностных оценок величин гололедов (табл. 2).

Сравнение рассчитанных величин стенок, вероятных один раз в 15 лет, с фактическими максимумами $q_{\max}$ показывает, что величины стенок, определенных по методу ВНИИЭ — ГГО, в среднем на 10% выше максимальных зарегистрированных величин:

$$\frac{\bar{q}_{В-Г}}{q_{\max}} = 1,10, \quad \frac{\bar{q}_{\chi}}{q_{\max}} = 0,83 \quad (3)$$

(черта означает осреднение по станциям), а величины стенок, определенные по методу χ , в среднем ниже на 17%. Все это относится к периоду наблюдений, колеблющемуся для отдельных ГМС от 10 до 20 лет (т. е. в среднем 15 лет), и к величине стенок в основном не более 15 мм.

Приведенные сравнения позволяют считать рассмотренные методы критериальными [6]. В табл. 3 даны результаты сравнений для различных гипотез, полученные с использованием критерия Вилькоксона, позволяющего оценить, существенны или не существенны в целом расхождения данных различных методов между собой и относительно фактических максимумов. Последнее воз-

можно потому, что период выборок в среднем составил 10—15 лет. Вероятнее всего предположить, что зарегистрированные максимумы не очень далеки от их характерных средних (т. е. вероятных) для этого периода.

Как видно из табл. 3, данные методов χ , χ^2 и ВНИИЭ—ГГО незначимо различаются между собой и с фактическими максимумами. Причем, с учетом всего вышеизложенного, можно предположить, что метод ВНИИЭ—ГГО, по крайней мере в нашем случае, дал некоторое завышение результатов.

Таблица 3

Оценка (по критерию Вилькоксона) значимости расхождений (на уровне значимости 0,05) рассчитанных величин стенок q_p и фактических максимумов стенок $q_{\max}$

Гипотеза (метод)	q_p в 10 лет			q_p в 15 лет		
	доверительный интервал	критерий	расхождение	доверительный интервал	критерий	расхождение
χ —ВНИИЭ	955—1530	1451	Незначимо	527—1013	745	Незначимо
χ — χ^2	1185—1840	1201	"	1185—1840	1258	"
χ —Пуассон	1185—1840	800	Значимо	1185—1840	731	Значимо
χ — $q_{\max}$	1185—1840	1803	Незначимо	1185—1840	1654	Незначимо
ВНИИЭ— $q_{\max}$	955—1520	1427	"	527—1013	759	"
Пуассон— $q_{\max}$	1185—1840	2158	Значимо	1185—1840	2316	Значимо

Что же касается закона Пуассона, то он привел к значимому занижению оценок экстремалей гололедов, что видно как по отношению к фактическим максимумам, так и к данным других методов. Причиной является то, что единственным параметром распределения служит среднее значение переменной, а дисперсия уже не учитывается.

Из сравнительного анализа можно также сделать вывод, что использование 3—4 параметрических кривых не дало в данном случае ощутимых результатов по сравнению с однопараметрической кривой χ^2 , параметр которой учитывает размах распределения. Следовательно, для ограниченных выборок, особенно в слабогололедных районах, использование этой простой экспоненциальной кривой будет в большинстве случаев вполне достаточным. Этот вывод был получен также ранее [4] при разработке карты гололедного районирования Тянь-Шаня.

Является весьма желательным надежно оценить характерные значения асимметрии и эксцесса распределений величин гололедов в зависимости от физико-географических условий и каких-либо режимных показателей по данным наблюдений длиннорядных ГМС в районах различной степени гололедности. На этой основе

можно, используя 3—4 параметрические кривые Пирсона, разработать объективные рекомендации по выбору типовых видов распределений для выравнивания гололедных стенок. Причем, видимо, будет целесообразным для коротких рядов (до 10—15 лет) задавать не только вид этих типовых кривых, но и характерные значения асимметрии и эксцесса, определяя по выборкам лишь первые два момента. В этом случае, на наш взгляд, использование системы кривых Пирсона для коротких рядов может быть наиболее эффективным.

Так же как и для гололедных стенок, было произведено выравнивание и сделан соответствующий анализ распределений скорости ветра и температуры воздуха при гололеде.

Оказалось, что для скорости ветра примерно в 70% случаев ЭВМ были реализованы экспоненциальные кривые подтипов 5 и 6 (тип I) и 3 (тип II) и в 30% случаев — модальные кривые с правой асимметрией подтипов 1 и 3 (тип I) и 2 (тип II), что находится в хорошем соответствии с внешним видом эмпирических гистограмм. Оценка по критерию λ показала, что кроме двух выборок гипотеза случайности расхождений полученных теоретических и эмпирических распределений может быть принята на уровне значимости более 0,30. Графические примеры выравнивания показаны на рис. 2 б.

Для температуры воздуха при гололеде примерно в 70% случаев ЭВМ были реализованы модальные кривые (с правой и левой асимметрией) в основном подтипов 1—4 (тип I) и в 20% случаев — экспоненциальные кривые подтипов 5 и 6 (тип I). Четыре распределения определялись по антимодальному подтипу 9 (тип. I), который вряд ли может соответствовать общему характеру исходных распределений. Специальная проверка показала, что в данном случае имеет место смещение нескольких распределений температур, соответствующих различным физическим условиям образования разных видов гололедных отложений.

Для обеих групп модальных и экспоненциальных распределений можно считать (на уровне значимости критерия λ более 0,30) случайными расхождения теоретических и эмпирических распределений. Графические примеры показаны на рис. 2 в.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Ограниченность исходных данных по гололеду, как правило, не позволяет на сегодняшний день достаточно надежно оценить генеральные законы распределений, которые во многих своих чертах остаются неизвестными. Поэтому использование для аппроксимации различных теоретических законов не является противоречивым, если только методы подбора кривых отвечают теории распределений и находятся в соответствии с особенностями режима элемента.

2. Система кривых Пирсона, обладающая свойством универсальности, может с успехом применяться для аппроксимации рас-

пределений самых различных метеорологических показателей в том числе, как показала проверка на данных метеорологической сети Тянь-Шаня, для вероятностной оценки экстремалей гололедов. Использование этой системы является особенно целесообразным для длиннорядных ГМС.

Выполненная авторами машинная реализация системы кривых Пирсона (для БЭСМ-2М и Минск-22) снимает все трудности вычислительного характера, связанные со сложностью решения исходных уравнений. Для приближенных вычислений возможно применение номографических методов.

3. Представляется целесообразным определение по данным длиннорядных ГМС (25 лет и более) характерных величин асимметрии и эксцесса и на основе этого ряда — типовых распределений Пирсона для аппроксимации гололедных стенок. При этом для малых периодов наблюдений следует рассмотреть вопрос о целесообразности задания не только определенных типовых распределений, но и их параметров, связанных с моментами высоких (3 и 4) степеней.

4. При подборе законов распределений только по выборочным данным в случае коротких (не более 10—15 лет) рядов наблюдений и особенно в малогололедных районах обычно имеет полный смысл использование простейших законов экспоненциального характера (например, кривой χ^2 , параметры которых выражаются через дисперсию выборки.

5. Сравнение рассчитанных различными методами экстремальных значений величины стенок гололеда для метеорологической сети Тянь-Шаня (в диапазоне эквивалентных стенок до 20—25 мм) показало, что метод ВНИИЭ — ГГО дал значения в среднем на 10—15% выше, чем 3—4 параметрические кривые χ и однопараметрическая кривая χ^2 . Однако в абсолютных значениях это не превышает 3—4 мм и является незначимым как со статистической, так и с практической точки зрения. Сравнение рассчитанных и фактических максимумов свидетельствует о том, что метод ВНИИЭ — ГГО, видимо, дает несколько завышенные результаты.

Метод Пуассона приводит к занижению вероятностных оценок стенок гололедов и его использование пока не целесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 206 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
2. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М., «Мир», 1965.
3. Заварина М. В., Швер Ц. А. Результаты климатических разработок применительно к гололедному районированию территории СССР. — «Труды ГГО», 1966, вып. 200, с. 16—33.

4. Подрезов О. А., Першин И. И. Расчетные схемы для оценки ветровых и гололедных нагрузок воздушных линий электропередачи Тянь-Шаня.— В кн.: Изучение и комплексное использование энергетических ресурсов Киргизии. Фрунзе, «Илим», 1971.
5. Подрезов О. А., Федорова С. А. Реализация системы кривых Пирсона на ЭВМ для решения прикладных задач при проектировании ЛЭП.— Материалы IV научно-технического и координационного совещания по высокогорным электропередам. Фрунзе, 1968.
6. Романовский В. И. Математическая статистика. Кн. 1 и 2. Ташкент, 1961, 63 с.
7. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.

Л. Е. ЛОМИЛИНА

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ ПРИ РАЙОНИРОВАНИИ ТЕРРИТОРИИ ПО ГОЛОЛЕДНЫМ НАГРУЗКАМ

Существующая карта гололедных районов, разработанная Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ) и Главной Геофизической обсерваторией (ГГО), помещенная в документах Госстроя СССР и Минэнерго СССР [3, 14], выполнена в масштабе 1:7 500 000. Такой масштаб требует в определенной степени обобщения материала, что затрудняет использование карты при конкретном проектировании. Поэтому необходимо для отдельных районов страны создавать гололедные карты более крупного масштаба.

Такие карты (масштаб 1:500 000) начали разрабатываться во ВНИИЭ. При составлении подобных карт необходимо подробное изучение физико-географических условий района, синоптических и метеорологических условий гололедно-изморозевых образований, изучение опыта эксплуатации высоковольтных линий электропередачи и линий связи, использование методики обработки данных наблюдений гидрометеорологических станций (ГМС), учитывающей закрытость гололедного станка, пересчет нагрузок гололедного станка на провода воздушных линий, использование вероятностно-статистического метода обработки данных наблюдений ГМС [2, 3, 6, 12]. При составлении крупномасштабных гололедных карт необходимо правильно учитывать влияние физико-географических особенностей местности и, прежде всего, рельефа на распределение гололедно-изморозевых образований по территории.

Рельеф оказывает существенное, а иногда и решающее влияние на процесс гололедообразования. Влияние рельефа на гололедно-изморозевые отложения складывается из влияния его морфометрических показателей: абсолютной и относительной высоты местности, формы рельефа и экспозиции склонов по отношению к гололедонесущему потоку.

Изменение характера рельефа влияет на изменение комплекса метеорологических элементов, определяющих гололедообразование (температура воздуха, скорость ветра, осадки, туманы, водность облаков и туманов) и зависящих от высоты местности, формы рельефа и экспозиции склонов. Эта зависимость состоит в следующем.

1. С увеличением высоты местности наблюдается возрастание повторяемости отрицательных температур и количества перохлажденных осадков, необходимых для образования гололед и изморози.

2. Возрастание количества осадков с увеличением высоты местности связано с общим упорядочением подъема воздушных масс и увеличением шероховатости подстилающей поверхности. Большое влияние на изменение количества осадков оказывает экспозиция склона по отношению к преобладающему направлению ветра за период выпадения осадков.

3. С увеличением высоты местности происходит возрастание скорости ветра, особенно на наветренных склонах.

4. Увеличение высоты местности оказывает значительное влияние на возрастание повторяемости туманов, происходящее за счет вынужденного подъема воздушных масс вдоль поверхности возвышенности и их охлаждения, что способствует конденсации водяного пара, а также за счет снижения уровня облаков нижнего яруса, которые часто покрывают возвышенности и принимаются наблюдателями за туман. И облака, и туманы имеют значительную водность.

Влиянию рельефа на гололедно-изморозевые образования посвящены работы А. Г. Балабуева [1], В. В. Бургсдорф и Н. С. Муретова [3], В. Е. Бучинского [4], А. В. Руднево [11, 13].

А. Н. Раевский [9, 10] показал зависимость числа дней с гололедом и размеров гололеда от рельефа на материале наблюдений по территории Украины. Им дана классификация типов рельефа (восемь типов рельефа), учитывающая относительную высоту местности и степень ее защищенности окружающими возвышенностями от гололедонесущего потока.

Однако, как показали некоторые исследования [5], влияние рельефа на интенсивность гололедообразования различно для разных районов и разных атмосферных процессов.

Поэтому при построении крупномасштабных региональных карт гололедных нагрузок во ВНИИЭ учитывали зависимость повторяемости и интенсивности гололедообразования от характера рельефа местности; при этом использовали классификацию типов рельефа, предложенную А. Н. Раевским, несколько видоизменив ее за счет расширения понятия «тип рельефа» и сделав, таким образом, классификацию применимой для любой территории, за исключением горных районов.

Были предложены следующие шесть типов рельефа.

I. Долины рек, закрытые от гололедонесущего потока возвышенностями.

II. Долины рек, протекающих в районах возвышенностей, открытые для гололедонесущего потока.

III. Плоская или пересеченная небольшими оврагами и балками местность с относительными превышениями не более 100 м (равнинный тип рельефа).

IV. Подветренные для гололедонесущего потока склоны возвышенностей.

V. Наветренные для гололедонесущего потока склоны возвышенностей, наветренные крутые берега крупных рек.

VI. Центральные части возвышенностей.

Выделение указанных типов рельефа на рассматриваемой территории производится путем построения вспомогательной схемы распределения склонов по экспозициям по способу, изложенному [7].

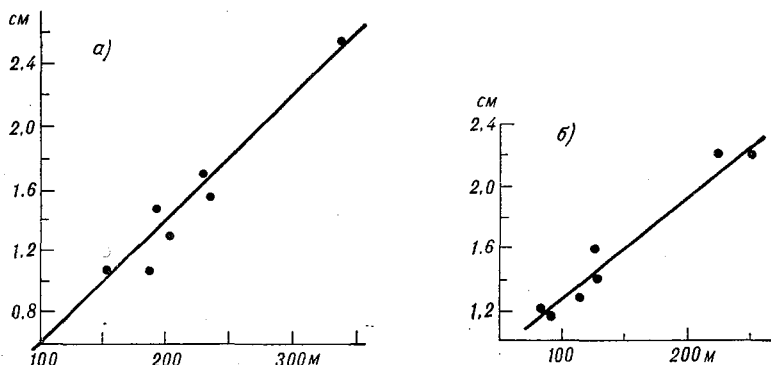


Рис. 1. Зависимость толщины стенки гололеда (см) от абсолютной высоты местности над уровнем моря (м):

а — для типа рельефа IV (подветренные склоны Бугульминско-Белебеевской возвышенности), б — для типа рельефа V (наветренные склоны) Бугульминско-Белебеевской возвышенности)

После выделения на исследуемой территории типов рельефа ледует проанализировать влияние абсолютных отметок местности а гололедные нагрузки для каждого типа рельефа. Для этого рупируются ГМС, относящиеся к одному типу рельефа, и стротся графики зависимости толщины стенки гололеда с повторямостью один раз в десять лет от абсолютной высоты местности по анным ГМС. Когда имеется достаточный ряд наблюдений за голоедно-изморозевыми отложениями на линиях электропередачи, озвляющих применить обработку вероятностным способом, их ледует учитывать для характеристики влияния абсолютной метет и местности на гололедную нагрузку по типам рельефа (в том лучае, если на линиях электропередачи в течение ряда лет, не менее 5, в одном и том же месте производятся замеры гололедно-изморозевых отложений).

В качестве примера приводятся графики зависимости толщины тенки гололеда от абсолютной высоты местности (рис. 1).

Полученные зависимости гололедной нагрузки от рельефа местности являются основой для построения карты гололедных нагрузок.

Карта нормативных гололедных районов выполняется на гисометрической основе масштаба 1:500 000 с использованием полных зависимостей толщины стенки гололеда от абсолютной высоты местности для каждого типа рельефа. Границы районов проводятся по изогипсам.

По этому методу в настоящее время региональные карты нормативных гололедных районов разработаны для многих областей и республик СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабуев А. Г. Гололедно-изморозевые явления в Закавказье.—«Труды ГГО», 1947, вып. 3(65), с. 42—52.
2. Бассарская Т. А., Голикова Т. Е. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в Курской области. М., «Энергия», 1965. (Труды ВНИИЭ. Вып. 21.)
3. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 206 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
4. Бучинский В. Е. Гололед и борьба с ним. Л., Гидрометеиздат, 1961. 192 с.
5. Волеваха Н. М. О влиянии орографии на гололедные отложения.—«Труды УкрНИГМИ», 1958, вып. 13, с. 82—87.
6. Заварина М. В., Швер Ц. А. Результаты климатических разработок применительно к гололедному районированию территории СССР.—«Труды ГГО», 1966, вып. 200, с. 16—33.
7. Методические указания по производству микроклиматических обследований в период изысканий. Л., Гидрометеиздат, 1969. 68 с.
8. Правила устройств электроустановок. М., «Энергия», 1965. 70 с.
9. Раевский А. Н. К вопросу о повторяемости гололеда.—«Метеорология и гидрология», 1953, № 1, с. 28—32.
10. Раевский А. Н. Влияние особенностей рельефа на распределение гололедных отложений.—«Труды ГГО», 1961, вып. 122, с. 45—52.
11. Руднева А. В. К вопросу о зависимости величины отложения льда на проводах от рельефа.—«Труды ГГО», 1960, вып. 88, с. 36—42.
12. Руднева А. В. Гололед и обледенение проводов на территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1961. 176 с.
13. Руднева А. В., Бассарская Т. А. Учет рельефа местности при расчете гололедных нагрузок.—«Труды ГГО», 1967, вып. 210, с. 47—57.
14. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.

Л. Г. ГОНЧАР, Н. М. ЛАНДА,
Д. В. ХОЛМСКИЙ

ОБ УЧЕТЕ РЕЛЬЕФА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

При определении гололедных и ветровых нагрузок при гололеде на воздушные линии (ВЛ) электропередачи приходится решать задачу распространения данных гидрометеорологических станций (ГМС) на окружающую территорию.

Особенности рельефа вносят определенные различия в распределение большинства метеорологических элементов, а также обуславливают неравномерное распределение гололеда по территории.

Известно, что гололедно-ветровые нагрузки зависят не только от высоты местности над уровнем моря, но и от формы рельефа [1, 3, 8].

Принцип учета влияния высоты на величину гололедного отложения (высотный принцип) был предложен В. В. Бургсдорфом [1] и нашел широкое практическое применение.

Сущность высотного принципа заключается в определении вертикальных градиентов толщины стенки гололеда по данным ГМС, расположенных на различных высотах, и использовании этих градиентов при экстраполяции данных ГМС на территории, неосвоенной непосредственными наблюдениями.

А. Н. Раевский показал [8], что для территории Украинской ССР, большая часть которой характеризуется равнинным рельефом с абсолютными высотами до 300—470 м, корреляционная зависимость между величиной отложений льда на проводах и абсолютной высотой прослеживается слабо. Это можно объяснить тем, что влияние местных факторов, связанных с формой рельефа и циркуляцией атмосферы, в ряде случаев оказывается более существенным, чем влияние высоты.

В качестве характерного примера, показывающего зависимость величины гололедного отложения от формы рельефа, могут быть рассмотрены результаты наблюдений на ст. Комиссаровка Днепропетровской области.

До 1966 г. ст. Комиссаровка находилась в районе средней части пологого (крутизна 1—3°) северо-западного склона небольшой возвышенности с абсолютной отметкой 106 м. За период наблюдений с 1951 по 1965 г. средняя из годовых максимумов толщина стенки гололеда составила 4,1 мм.

В 1966 г. ст. Комиссаровка была перенесена в район верхней части юго-восточного склона (крутизна 3—10°) той же возвышенности на расстояние 1 км от прежнего местоположения (абсолютная высота 118 м). При этом за период наблюдений до 1972 включительно средняя из годовых максимумов толщина стенок гололеда составила 7,1 мм.

Защищенность метеорологической площадки близлежащими объектами со стороны гололедонесущего потока в обоих случаях незначительна. При этом в первом случае ГМС находилась в подветренном склоне по отношению к преимущественному направлению гололедонесущего потока, во втором случае — на наветренном.

Очевидно, что основной причиной, вызвавшей столь значительное различие в величине гололедно-изморозевых отложений, является не разница в абсолютных отметках метеорологических площадок, а различные формы рельефа, создавшие условия для образования микроклиматических особенностей.

Для выявления степени влияния рельефа на аварийность сетевых ВЛ были рассмотрены случаи аварий от гололеда на сетях Днепросельэнерго за периоды с 1962 по 1965 г. и с 1967 по 1969 г.

Общая протяженность аварийных участков составила 344 км. Из них 220 км ВЛ (64%) располагались в условиях, способствующих увеличению скорости ветра с учетом направления господствующих ветров при гололеде (юго-восточные склоны холмов, плоские водораздельные поверхности и т. д.); 104 км ВЛ (30%) проходили в менее благоприятных для образования гололеда условиях (подветренные склоны, защищенные долины); 20 км ВЛ (6%) проходили в условиях, характерных для обеих групп. Большинство аварийных участков было ориентировано нормально к направлению гололедонесущего потока.

Даже из приведенных цифр видно, как велико влияние рельефа на аварийность ВЛ от воздействия гололеда и давления ветра на провод при гололеде.

При этом необходимо иметь в виду, что часто очагом аварии являются сравнительно небольшие участки ВЛ, находящиеся в наиболее благоприятных для образования гололеда условиях. Затем из-за непроскальзывания проводов в месте крепления к штыревым изоляторам происходит распространение аварии на смежные участки ВЛ.

Задача распространения данных ГМС на окружающую территорию может быть решена только в случае, если имеется четкое представление о местоположении ГМС и ВЛ и изучены закономерности воздействия различных форм рельефа на изменение гололедно-ветровых нагрузок.

Для анализа влияния рельефа на величину гололедно-изморозевого отложения важное значение приобретает выявление форм рельефа, способствующих образованию микроклиматических особенностей.

Количественные характеристики рельефа могут быть получены с помощью морфометрических показателей. Методика вычисления морфометрических характеристик и их картирование разработаны в [6, 9, 10] и нашли широкое применение в работах ГГО, посвященных микроклимату и, в частности, учету режима ветров [5].

Учитывая решающее влияние скорости ветра на величину отложения, комплекс морфометрических показателей, необходимых для микроклиматической характеристики территории по гололедно-ветровым нагрузкам, можно принять таким же, как и для ветра. Данный комплекс включает:

- а) углы наклона местности;
- б) циркуляционную экспозицию склонов;
- в) глубину расчленения рельефа — относительные превышения.

При этом составляются карты: углов наклона местности — по методике [10], циркуляционной экспозиции склонов — по методике [6] и относительных превышений — по методике [9].

В условиях пересеченного рельефа всегда имеет место деформация воздушного потока, которая наиболее резко выражена у поверхности земли и затухает с высотой.

Динамическое воздействие рельефа на ветер, приводящее к изменению скорости и направления ветра, проявляется в его усилении в местах сближения линий тока и в ослаблении в местах расхождения. Усиление ветра наблюдается на вершинах открытых возвышенностей, холмов, на наветренных склонах и т. д. Ослабление ветра наблюдается в аэродинамической тени препятствий: на подветренных склонах и в отрицательных формах рельефа.

Обобщенные характеристики ветрового режима в различных формах рельефа получены в Главной геофизической обсерватории м. А. И. Воейкова под руководством И. А. Гольцберг [5].

При этом для характеристики изменения скорости воздушного потока в различных условиях рельефа использован коэффициент, который представляет собой отношение скорости ветра в данном месте к скорости на открытом ровном месте. Открытым ровным местом в условиях холмистого рельефа считается наиболее выровненный участок в понижении рельефа: подножие склона, дно долины, низина.

Учитывая, что изменение скорости ветра в различных условиях местности приводит к изменению как веса гололеда, так и его размеров, формулы для расчета нормативной толщины стенки гололеда, приведенной к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$, и скорости ветра при гололеде на основании зависимостей, приведенных в [1] и [4], примут вид:

$$b_{\text{вл}} = -\frac{d}{2} + \sqrt{\frac{d^2}{4} + \frac{\delta_{\text{вл}} b_{\text{мс}}}{\delta_{\text{лмс}}}} (d + b_{\text{мс}}), \quad (1)$$

$$v_{\text{вл}} = \sqrt{\frac{\delta_{\text{вл}} P_{\text{мс}} \cdot 10^3}{0,075 \delta_{\text{лмс}} (d + 2b_{\text{вл}})}}, \quad (2)$$

где d — диаметр провода ВЛ, км; $b_{\text{вл}}$ — толщина стенки гололеда мм, приведенной к объемному весу $0,9 \text{ г/см}^3$ в условиях ВЛ; $P_{\text{мс}}$ нагрузка от давления ветра на провод, покрытый гололедом, в условиях ГМС, кг/м; $v_{\text{вл}}$ — скорость ветра при гололеде в условиях ВЛ, м/с; $\delta_{1\text{вл}}$, $\delta_{2\text{вл}}$, $\delta_{1\text{мс}}$, $\delta_{2\text{мс}}$ — коэффициенты, характеризующие зависимость веса и размеров гололедно-изморозевых отложений от изменения скорости ветра в различных условиях рельефа по отношению к открытому ровному месту.

Индексы «1» и «2» относятся соответственно к весу отложения (толщине стенки гололеда) и скорости ветра при гололеде, а индексы «вл» и «мс» — к местоположению ВЛ и ГМС.

Коэффициенты δ_1 и δ_2 в уравнениях (1) и (2) можно представить в виде

$$\delta_1 = k^{n_1}, \quad (1)$$

$$\delta_2 = k^{2+n_2}, \quad (2)$$

где k — отношение скорости ветра на рассматриваемой территории к скорости ветра на открытом ровном месте; n_1 — степень зависимости изменения веса гололеда от изменения скорости ветра; n_2 — степень зависимости изменения приведенного диаметра (с действительным удельным весом) от изменения скорости ветра.

Параметры n_1 и n_2 определяются эмпирически.

Для оценки величин n_1 и n_2 были рассмотрены данные о гололедно-изморозевых отложениях и ветре 17 пар ГМС, расположенных на расстоянии не более 100 км друг от друга в однородной воздушной массе.

Отбор ГМС производился на основании анализа синоптического материала за 15-летний период. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Величины скоростей ветра на высоте 2 м, приведенные в табл. 1 для равновесного состояния атмосферы (пасмурная ветренная погода) рассчитывались по логарифмической формуле

$$u_n = u_1 \frac{\lg z_n - \lg z_0}{\lg z_1 - \lg z_0}, \quad (5)$$

где u_n — скорость ветра на высоте z_n (в нашем случае $z_n = 2 \text{ м}$); u_1 — известная скорость ветра на высоте z_1 (в нашем случае z_1 — это высота флюгера); z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Средние значения n_1 и n_2 равны соответственно 1,68 и 0,66, среднеквадратичные отклонения $\sigma_1 = 1,18$ и $\sigma_2 = 0,35$. Сравнительно большие значения величин среднеквадратичных отклонений объясняются тем, что в реальных условиях, особенно на ГМС, расположенных на достаточном удалении друг от друга, появляются неоднородные факторы (разница во влагосодержании и температуре воздуха), также влияющие на размеры и вес гололедно-изморозевых отложений.

Таблица 1

Попарное сопоставление данных метеорологических станций

№ пп	Станция	Абсолютная отметка, м	Скорость ветра на высоте, м/с		Вес гололеда на станции, г	n ₁	n ₂
			флюгера	2 м			
1	Киев	183	9,0	6,7	200	1,78	0,98
	Немешаево	161	6,8	3,8	72		
2	Яготин	125	3,8	2,0	72	2,0	0,5
	Чернобыль	123	2,5	1,2	32		
3	Дебальцево	334	5,0	3,5	80	0,7	0,51
	Донецк	234	2,0	1,3	40		
4	Чернобыль	123	2,8	1,8	32	1,71	0,55
	Старченко	151	2,2	1,2	16		
5	Липовец	298	7,6	4,8	56	4,49	1,35
	Гайсин	210	6,9	3,6	16		
6	Воронки	92	11,0	8,7	176	0,42	0,75
	Нижегородск	20	7,0	5,8	144		
7	Воронки	92	10,1	8,3	232	3,24	0,58
	Хлопковое	83	6,4	5,4	32		
8	Воронки	92	10,1	8,3	232	2,52	1,07
	Джанкой	6	4,5	3,8	40		
9	Коростень	186	2,3	1,9	72	2,4	0,51
	Олевск	181	1,4	1,2	24		
10	Волноваха	266	8,0	5,1	128	2,36	0,5
	Донецк	234	6,8	4,5	80		
11	Кировоград	171	9,2	6,8	40	0,31	0,06
	Помошная	211	6,3	4,4	32		
12	Дарьевка	300	6,0	4,4	24	1,4	0,51
	Дебальцево	334	3,7	2,8	16		
13	Волноваха	266	11,5	9,4	88	3,12	1,28
	Амвросиевка	170	8,6	5,9	26		
14	Щорс	127	9,3	7,8	48	0,76	0,31
	Чернигов	113	7,0	4,7	32		
15	Павлоград	83	11,0	8,8	56	0,41	0,29
	Кривой Рог	98	7,4	6,0	48		
16	Сарата	12	11,0	7,6	32	0,72	0,62
	Затишье	193	7,9	5,1	24		
17	Хмельницкий	297	7,5	6,1	16	0,53	0,90
	Новая Ушица	276	5,7	3,1	13		

Поправочные коэффициенты на условия рельефа

Форма рельефа	δ_1 вл, δ_1 мс	δ_2 вл, δ_2 мс
Открытое ровное место	1,00	1,00
Вершина открытых возвышенностей		
относительные превышения более 50 м	1,95—1,82	2,28—1,97
относительные превышения менее 50 м	1,82—1,69	1,69—1,97
Наветренные склоны крутизной 3—10°		
верхняя часть	1,45—1,69	1,43—1,69
средняя часть	1,00—1,10	1,20
нижняя часть	0,80—0,90	1,00
Параллельные ветру склоны крутизной 3—10°		
верхняя часть	1,45—1,33	1,00—1,20
средняя часть	1,10—1,00	1,00
нижняя часть	1,00—0,90	0,69—0,58
Подветренные склоны крутизной 3—10°		
верхняя часть	0,90—1,00	0,86—1,00
средняя часть	1,00—1,10	0,86—1,00
нижняя часть	0,90—1,10	0,55—0,43
Дно долин, ложин, оврагов		
продуваемых ветром	1,57—1,33	1,69—1,97
непродуваемых ветром	0,61	0,43
замкнутых	0,61	0,43
Холмы с плоскими вершинами и пологими склонами крутизной 1—3°		
вершины, верхние части наветренных и подветренных склонов	1,33—1,57	—
средние и нижние части таких склонов	1,00—1,33	—

вых отложений, учесть которые в настоящее время не представляется возможным.

Округлив полученные значения n_1 и n_2 соответственно до 1, и 0,75 и используя материалы [5, 11], можно составить таблицу коэффициентов δ для характерных форм рельефа при высоте подвеса провода 8—10 м (табл. 2).

Таким образом, используя формулы (1) и (2), морфометрические характеристики рельефа и коэффициенты из табл. 2, можно определить гололедные и ветровые нагрузки при гололеде на территории, окружающей ГМС или находящейся в однородных с ней физико-географических условиях.

Использование описанной методики при составлении заключений о климатических нагрузках по 500 объектам на территории Украинской ССР и разработке региональных карт показало ее высокую эффективность, так как наряду с усилением наиболее аварийноопасных участков уменьшается средняя стоимость ВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

- Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 206 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
- Бучинский В. Е. Гололед и борьба с ним. Л., Гидрометеиздат, 1960. 192 с.
- Волеваха Н. М. О влиянии орографии на гололедные отложения.—«Труды УкрНИГМИ», 1958, вып. 13, с. 27—31.
- Гончар Л. Г., Ланда М. Л., Холмский Д. В. К вопросу расчета нормативной скорости ветра при гололеде.—См. наст. сборник.
- Микроклимат СССР. Под ред. И. А. Гольцберг. Л., Гидрометеиздат, 1967. 284 с.
- Миринова Е. А. Опыт морфометрической характеристики эрозионных процессов.—В кн.: Сельскохозяйственная эрозия и новые методы ее изучения. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 123—128.
- Раастанд. Норвежские исследования условия обледенения.—В кн.: Линии электропередачи высокого напряжения. М., Госэнергоиздат, 1960, с. 23—28.
- Раевский А. Н. Влияние рельефа на распределение гололедно-изморозевых отложений.—«Труды ОГМИ», 1961, вып. 23, с. 3—10.
- Спиридонов И. А. Геоморфологическое картографирование. М., Географиз, 1952. 185 с.
- Ченцов В. Н. Морфометрические показатели на геоморфологической карте мелкого масштаба.—В кн.: Проблемы геоморфологии. М., Изд-во АН СССР, 1948, с. 83—89.
- Шкодин А. И. Некоторые сведения об условиях работы линий электропередачи и связи в гололедных районах.—«Электричество», 1953, № 10, с. 14—19.

О ПРИВЕДЕНИИ ДАННЫХ ГОЛОЛЕДНОГО СТАНКА К РАБОЧИМ УРОВНЯМ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Точность расчета гололедных нагрузок на провода воздушных линий (ВЛ) в большой степени зависит от точности определения коэффициентов, с помощью которых производится пересчет весов отложений с провода гололедного станка на провода рабочих уровней ВЛ.

Основными являются два коэффициента: K_h , учитывающий изменение веса (или размеров) отложений с высотой h , и K_d , учитывающий изменение этих показателей с изменением диаметра провода d .

В данной статье величина этих коэффициентов определена на основании выполненных ранее теоретических расчетов [1] и с использованием многочисленных экспериментальных данных, полученных на Новопятигорской геофизической дорожной станции [2], на Пятигорской станции ВНИИЭ [3, 4], на опытных пролетах, организованных Украинским отделением института Сельэнергопроект и Киргизским и Таджикским научно-исследовательским отделами энергетики.

Расчеты, основанные на использовании известных законов механики аэрозолей показали, что поправка к весу отложения на диаметр провода K_{pd} зависит помимо величины диаметра от скорости ветра u , температуры воздуха t , водности туманов или облаков ω [1].

Учитывая, что при $\omega \leq 0,05$ г/м³ (такая водность наиболее характерна для приземных туманов) величина K_{pd} при $t \leq -1^\circ\text{C}$ (гололедно-изморозевые отложения чаще всего наблюдаются при такой температуре) не зависит от температуры воздуха, нами были приняты осредненные значения K_{pd} для 10-миллиметрового провода при $t = -1^\circ\text{C}$, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Поправочные коэффициенты для пересчета веса
гололеда с провода гололедного станка на провод
диаметром 10 мм

Скорость ветра,								
м/с	0,0—4,0	4,1—8,0	8,1—12,0	12,1—16,0	16,1—20,0	20,1—24,0	>24	
K_{pd}	1,35	1,55	1,65	1,75	1,90	2,20	2,5	

В [2] даны значения коэффициентов K_{p_d} для высоты подвеса провода, равной 10—12 м, при различных значениях веса отложения на гололедном станке.

Используя значения K_{p_d} , данные в табл. 1, и величины K_{p_h} , взятые из работы [2], получаем поправочные коэффициенты $K_{p_{dh}} = K_{p_d} K_{p_h}$, позволяющие по весу отложения на гололедном станке определить гололедную нагрузку на 10-миллиметровом проводе, подвешенном на высоте 10—12 м. Значения $K_{p_{dh}}$ в зависимости от скорости ветра и веса отложения на гололедном станке представлены в табл. 2.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты $K_{p_{dh}}$ для пересчета гололедной нагрузки с провода гололедного станка на провода рабочих уровней ЛЭП

P_0 г/м	Район голо- ледно- сти	Скорость ветра, м/с						
		0,0—4,0	4,1—8,0	8,1—12,0	12,1—16,0	16,1—20,0	20,1—24,0	>24
<100	I	3,7	4,2	4,6	5,1	5,6	6,1	6,5
100—150	Ia	3,3	3,7	4,1	4,6	5,0	5,4	5,8
150—300	II	2,9	3,2	3,6	4,0	4,4	4,7	5,1
300—450	III	2,5	2,8	3,2	3,5	3,7	4,0	4,3
450—600	IIIa	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4
>600	IV—V	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8

Примечание: Высота подвеса провода $h=10-12$ м, диаметр провода 10 мм; P_0 —вес отложения на проводе гололедного станка.

Из таблицы видно, что величина $K_{p_{dh}}$ увеличивается с возрастанием скорости ветра и уменьшается с увеличением гололедной нагрузки на проводе гололедного станка. Этот факт подтверждается и данными экспериментальных наблюдений на опытных пролетах Украинского отделения института Сельэнергопроект.

Следует отметить, что и средние значения коэффициентов $K_{p_{dh}}$, полученные в результате сравнения веса отложений на опытных пролетах и на проводе гололедного станка при различных значениях скорости ветра и веса гололеда, хорошо согласуются с данными табл. 2.

Для расчета ветровых нагрузок на обледеневшие провода ВЛ необходимо по размерам отложения на проводе гололедного станка определить его размеры на проводе ЛЭП или ЛС, т. е. определить соответствующие коэффициенты пересчета $K_{D_{dh}}$, где $D = \sqrt{ac}$ (a и c — соответственно большой и малый диаметры отложения с проводом). Значения $K_{D_{dh}}$ нетрудно получить из соответствующих величин $K_{p_{dh}}$ (табл. 2), используя известные соотношения между ве-

сом и размерами гололедно-изморозевых отложений. При этих расчетах плотность отложений на проводе принималась равной 1,1 г/см³ по отношению к плотности отложения на гололедном станке [1].

Рассчитанные таким образом величины $K_{D_{dh}}$ при различных значениях скорости ветра и размеров отложения на 5-миллиметровом проводе, установленном на уровне 2 м, даны в табл. 3.

В настоящее время критерием гололедного районирования территории СССР является толщина стенки гололеда b , имеющей форму круглого цилиндра и плотность 0,9 г/см³ [5]. Для пересчета величины b с провода гололедного станка на провод, подвешенный

Таблица 3

Поправочные коэффициенты K_D для пересчета размеров отложения с провода гололедного станка на провода воздушных линий

D_0 мм²	Скорость ветра, м/с		
	0,0—8,0	8,1—16,0	>16
≤50	2,50	2,65	2,80
51—100	2,15	2,45	2,65
101—200	2,00	2,30	2,50
201—800	1,85	2,15	2,35
>800	1,70	2,05	2,25

Примечание. Высота подвеса провода $h=10-12$ м, диаметр провода $d=10$ мм; D_0 —размер отложения на проводе гололедного станка.

на высоте 10 м и имеющий диаметр 10 мм, используют соответствующий поправочный коэффициент $K_{b_{dh}}$, принятый равным 1,5.

Для оценки этого коэффициента в табл. 4 приведены значения

Таблица 4

Поправочные коэффициенты $K_{b_{dh}}$ для пересчета толщины стенки гололеда b_0 с провода гололедного станка на провода воздушных линий

b_0 мм	Район гололедности	Скорость ветра, м/с						
		0,0—4,0	4,1—8,0	8,1—12,0	12,1—16,0	16,1—20,0	20,1—24,0	>24
5	I	1,85	2,00	2,14	2,32	2,48	2,56	2,73
10	II	1,65	1,77	1,90	2,07	2,18	2,28	2,40
15	III	1,57	1,68	1,80	1,90	2,00	2,08	2,18
20	IV—V	1,25	1,30	1,37	1,45	1,50	1,55	1,60

Примечание. Высота подвеса провода $h=10-12$ м, диаметр провода $d=12$ мм.

при различных градах скорости ветра и толщины стенки гололеда на проводе гололедного станка b_0 , определенные нами значения $K_{p_{dh}}$ в табл. 2 с помощью известных формул, устанавливающих соотношение между весом отложения и толщиной стенки гололеда.

Из таблицы видно, что при небольших отложениях, соответствующих району гололедности I, величина $K_{b_{dh}} > 1,5$, причем при скорости ветра более 8 м/с $K_{b_{dh}} > 2$. Коэффициент пересчета близок к 1,5 только в районе гололедности III при слабом ветре (не более 4 м/с). В районах гололедности IV и V при скорости ветра более 16 м/с величина $K_{b_{dh}}$ составляет 1,5—1,6, а при скорости менее 16 м/с коэффициент пересчета меньше 1,5.

Следовательно, при расчете гололедных нагрузок на провода ЛЭП интегральная кривая годовых максимумов веса (или приведенной толщины стенки гололеда) должна быть рассчитана по значениям P (или b), полученным в результате умножения этих параметров, определенных по гололедному станку, на коэффициент $K_{p_{dh}}$ (или $K_{b_{dh}}$), т. е. по членам ряда $P \cdot K_{p_{dh}}$ (или $K_{b_{dh}}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов В. Г. Об интенсивности обледенения проводов разного диаметра.— «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 11—23.
2. Заварина М. В., Арнаутов П. К. Коэффициенты пересчета гололедных нагрузок.— «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 154—159.
3. Никифоров Е. П. Распределение веса гололедообразования на проводах различного диаметра.— «Труды ВНИИЭ», 1961, вып. 11, с. 274—288.
4. Никифоров Е. П. Влияние высоты подвеса провода на вес отложения гололеда.— «Электрические станции», 1962, № 6, с. 62—66.
5. Савченко Л. А. Некоторые закономерности формирования гололедных нагрузок на провода ЛЭП и ЛС в горных районах.— См. наст. сборник.
6. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.

ПЕРВЫЙ ГОД РАБОТЫ ВЫСОКОГОРНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ ЛЭП НА ПЕРЕВАЛЕ ОРТО-АШУ

Отсутствие экспериментальных исследований фактических нагрузок на провода воздушных линий (ВЛ) от совместного воздействия гололеда и ветра и слабая изученность процессов формирования этих нагрузок в горных районах побудила авторов сделать попытку в данной статье частично восполнить имеющийся пробел.

Новая испытательная станция линий электропередачи (ЛЭП) сооружена КирНИОЭ в Тянь-Шане на перевале Орто-Ашу Киргизского хребта на высоте 3600 м. Для выбранного района характерны высокая скорость ветра (до 40 м/с) и интенсивное гололедообразование. За время предварительных экспедиций, проводимых с 1968 г., в преобладающем числе случаев были зафиксированы отложения плотной изморози диаметром до 240 мм и лишь в единичных случаях — отложения чистого гололеда и смеси диаметром до 80 мм. Минимальная температура -35°C , средняя годовая -5°C , абсолютный максимум $+20^{\circ}\text{C}$. Климатические условия станции являются типичными для таких районов, как гребневые и перевальные зоны, внешние склоны и открытые плато горных хребтов Средней Азии. Для всех аналогичных районов отмечены [5] сочетания высоких скоростей ветра с большими размерами гололедно-изморозевых отложений.

Систематические наблюдения на испытательной станции были начаты с зимнего сезона 1971-72 г.

Основной целью исследований являлось комплексное изучение ветровых нагрузок на обледенелые провода и опоры ЛЭП при различных сочетаниях гололеда и ветра в горных условиях. Это изучение предусматривало:

- 1) оценку корреляционной зависимости между величиной гололедных отложений на стержнях стандартных гололедных стоек и величиной отложений на реальных проводах ЛЭП в горных условиях;

- 2) описание распределения размеров, формы и веса гололедных отложений вдоль провода по пролету и определение влияния этого распределения на аэродинамические свойства провода и на величину ветровых нагрузок, передаваемых проводом на опору;

- 3) исследование всех аспектов парусности обледенелых проводов, в том числе нормальной составляющей, а также вертикальных и продольных сил ветрового давления, вызванных векторной из-

енчивостью ветра. Эти силы могут достигать существенной величины и сильно влиять на суммарную ветровую нагрузку, так как провод в пролете имеет значительный провес, а его диаметр при изморозевых отложениях может увеличиваться более чем 10 раз.

Проводимые параллельно исследования условий гололедообразования и зависимостей размеров гололеда от высоты подвеса, диаметра и кручения проводов служат необходимым исходным материалом для решения вышеизложенных основных задач.

Все измерительные устройства установлены на двух опытных стендах, один из которых представляет собой четырехопорный настил ЛЭП в габаритах 110 кВ с характерными для горных масс пролетами 110, 150 и 200 м и проводами АС-150. В качестве промежуточных опор использованы типовые узкобазные металлические опоры типа П-1 высотой 20 м.

Второй стенд состоит из трех решетчатых колонн, установленных на расстоянии 60 м друг от друга, между которыми на высотах 2, 4, 6 и 8 м подвешены провода разных диаметров. В первый сезон измерений на каждой из высот были подвешены провода марок ПС-35 и АС-150, в дальнейшем намечен дополнительный подвес проводов АС-70 и АС-240. На средней колонне на тех же высотах установлены гололедомерные рамки со стержнями диаметром 5 мм и проводами ПС-35, АС-150, АС-240.

Оба опытных участка ЛЭП ориентированы перпендикулярно направлению господствующих южных ветров. Предполагается монтировать третий опытный пролет, ориентированный вдоль ветрового потока.

Под проводами большого участка и в непосредственной близости от малого участка установлены стандартные гололедные танки со стержнями диаметром 5 мм.

Скорость ветра, его направление, температура и влажность воздуха измерялись с помощью автоматизированной, дистанционной метеорологической станции типа М-49. Кроме того, скорость ветра фиксировалась пятью анемографами типа М-27, установленными вдоль пролета, и контрольным анемографом типа М-12. Следует отметить, что полусферы приемных устройств анемографов М-12 и М-27 при измерениях быстро заносятся снегом и обледеневают, что сильно искажает их показания. Метеорологическая станция М-49 отличалась устойчивой работой. Регулярно проводимые сверки скорости ветра по М-49 с показаниями ручных анемометров давали расхождение не более 0,5 м/с.

Все прямые измерения гололедно-ветровых нагрузок на провода и опоры основаны на методах проволоочной тензометрии, которые были опробованы и хорошо себя зарекомендовали при измерениях ветровых нагрузок на опытном полигоне в Ховасте [6]. На описываемых установках эти методы подверглись дальнейшему усовершенствованию. В частности, была достигнута возможность электрической нейтрализации разбаланса тензометрического моста для контрольной записи нулевой линии в любой нужный момент,

что крайне важно при измерениях нагрузок, вызываемых природными процессами большой длительности.

Специально разработанные тензометрические приспособления позволяют фиксировать нормальную и продольную составляющие ветровой нагрузки, а также суммарную нагрузку от веса проводов и гололеда и ветрового воздействия на провод. В безветренную погоду те же устройства позволяют оценить суммарный вес проводов с гололедными отложениями в пролете.

Хронограммы всех измеряемых процессов фиксировались на циллографах на рулоны фотобумаги шириной 100 мм при скорости движения 1—1,5 мм/с.

Измерения гололедных отложений производились обычными методами, принятыми в системе Гидрометслужбы.

Вся регистрирующая аппаратура, тарифовочные стенды, мастерская, фотолаборатория и жилые помещения дежурных зимовщиков размещались в построенном брусчатом доме. Для надежного электроснабжения и зарядки аккумуляторов была подведена питающая ЛЭП (6 кВ) и установлена КТП с трансформатором 100 кВА.

В первый год работы испытательной станции успешным измерениям сопутствовал и ряд неудач, которые несколько сузили намеченную программу наблюдений. Так, первая модель измерительных устройств на проводах из-за механических дефектов изготовления не позволила получить надежных регистраций составляющих ветровой нагрузки на провода — продольной и суммарной. Поэтому в первые месяцы, до замены устройств на более совершенные, анализу подвергалась только нормальная составляющая ветровой нагрузки.

Систематическое измерение гололедных отложений в нескольких точках пролета на проводах большего участка и на верхних проводах малого участка встретило значительные трудности. Применяемые подъемники и другие вспомогательные средства себе не оправдали.

В конце первого сезона выявилась недостаточная прочность некоторых элементов опытных установок и сооружений. Так, в апреле 1972 г. трехдневным ураганом была сорвана крыша дома, порваны оттяжки и обрушены одна из башен малого опытного участка и две мачты с анемографами М-27.

В летний период 1972 г. после открытия автомобильного подъезда на перевал Орто-Ашу на станции были проведены большие работы по восстановлению, модернизации и усилению опытных установок и сооружений. Промежуточные опоры участка ЛЭП (110 кВ) были оборудованы двумя лебедками, позволившими плавно опускать один из проводов вместе с гирляндами изоляторов для измерения гололеда вдоль пролета. На проводах были установлены новые измерительные устройства заводского изготовления.

За первый год наблюдений образование отложений плотного изморози измерялось при температурах от -3 до -18°C . Максимальный фактический диаметр не превышал 147 мм. Плотность

олебалась в пределах $0,3—0,35 \text{ г/см}^3$. Зафиксирован один случай ложных образований диаметром 80 мм и плотностью $0,6 \text{ г/см}^3$. Вес не превышал 3 кг/пог. м.

Отмечена локальность гребневой зоны гололедообразований резким уменьшением размеров отложений по склону хребта.

Одна из основных задач прикладного исследования гололедных отложений — оценка зависимостей между отложениями на стержнях гололедных станков и на реальных проводах — в горных условиях встречает дополнительные трудности, вызванные особенностями изморозевых образований на стержнях гололедных станков. По нашим наблюдениям, на стержнях гололедных станков, расположенных нормально к ветровому потоку (для Орто-Ашу это направление с запада на восток), как правило, образуются односторонние отложения изморози, опадающие в процессе образования по достижении величины 25—50 мм. По такому характеру отложений трудно судить о величине фактически наблюдаемых устойчивых отложений изморози на параллельно расположенных реальных проводах ЛЭП. На стержнях станков, расположенных вдоль ветрового потока (С—Ю), наблюдаются отложения, близкие к эллиптической или цилиндрической форме, зачастую состоящие из отдельных усеченных конусов длиной по 200—250 мм. Однако в отдельных случаях, когда средняя скорость ветра превышает 20 м/с, а температура не поднимается выше -16°C , отложений на стержнях станка С—Ю не образуется. На стержнях станка З—В при этом имеют место обычные односторонние отложения, а на реальных проводах ЛЭП, ориентированных нормально к ветровому потоку (З—В), были зафиксированы устойчивые отложения диаметром до 100 мм.

За сезон 1971-72 г. такие случаи отмечены дважды. Очевидно, для решения задачи объективного перехода от данных гололедных станков к данным реальных проводов ЛЭП в горных районах требуются дальнейшие тщательные наблюдения.

В последнее время неоднократно поднимался вопрос об использовании в расчетах фактических диаметров гололедных отложений вместо приведенных к плотности чистого гололеда $0,9 \text{ г/см}^3$. Несмотря на кажущуюся логичность такого предложения, решению этого вопроса должно предшествовать рассмотрение всех аспектов формирования ветровой нагрузки на обледенелые провода. Нельзя забывать, что, во-первых, принятые методы расчета базируются на многолетних данных о гололеде и ветре, методика получения которых разрабатывалась без учета многих особенностей ЛЭП, и, во-вторых, существующая расчетная практика основывалась не только на данных, имевшихся в то время единичных исследований, но и на богатом опыте предшествующей эксплуатации ВЛ. В результате, несмотря на недостаточную обоснованность оценки отдельных расчетных параметров, общие результаты оказались удовлетворительными. Поэтому попытка исправления какого-либо одного параметра без одновременного уточнения остальных, фигурирующих в расчете факторов, может привести к непредвиденному

увеличению ошибки по сравнению со сложившейся методикой расчета. В подтверждение высказанных положений рассмотрим несколько конкретных вопросов.

Ранее уже отмечалось [2, 4], что диаметр отложений на проводе ВЛ не является постоянным. По наблюдениям авторов, отложения вдоль провода реального пролета резко изменяются как по размерам, так и по форме. В непосредственной близости от концов пролета, на расстоянии 5—10 м от точек закрепления проводов в зажимах, устойчивые изморозевые образования практически отсутствуют. Появляющиеся односторонние отложения достигают величины 40—60 мм и опадают под действием собственного веса и сопутствующих сильных ветров. Этот процесс многократно повторяется, причем опадание и нарастание происходят на небольших независимых друг от друга участках. При дальнейшем удалении от концов пролета односторонние отложения переходят в эллиптическую форму. Наибольшей величины изморозевые муфты достигают в средней части пролета, приближаясь к цилиндрической форме.

Основной причиной неодинаковых по форме отложений вдоль пролета, по-видимому, является изменение угла закручивания провода, под влиянием односторонних отложений в зависимости от расстояния до точек жесткого крепления проводов в зажимах [4].

Отмеченная закономерность может нарушаться случайным сбросом гололеда в отдельных местах. Образовавшиеся пустоты вновь заполняются изморозевыми отложениями, которые могут нарастать в течение нескольких суток, при скорости ветра до 26 м/с и при температуре до -18°C . В результате распределение форм и размеров изморозевых отложений вдоль пролета может носить беспорядочный характер при сохранении общей тенденции увеличения размеров и округления формы к середине пролета.

Такое распределение оказывает существенное влияние на формирование суммарной ветровой нагрузки, передаваемой проводом на опору. Совершенно очевидно, что ветровая нагрузка определяется не максимальным диаметром отложений в середине пролета, который оценивается введением поправочных коэффициентов к данным гололедных станков, а каким-то значительно меньшим, осредненным диаметром, который ниже назван эквивалентным. Для рекомендаций по оценке эквивалентного диаметра по размерам максимальных отложений необходим статистический анализ распределений формы и размеров гололеда по пролету. Достаточно большие ряды таких данных пока отсутствуют.

По предварительным данным, эквивалентный диаметр оказывается несколько большим половины максимального диаметра.

На графике рис. 1 показаны действительные ветровые нагрузки, отнесенные к 1 пог. м. длины и 1 мм^2 сечения чистого провода, зафиксированные при размерах отложений плотной изморози в середине пролета 70×80 мм и плотности отложений $0,33\text{ г/см}^3$. Каждая точка соответствует максимальному значению ветровой нагрузки за 2-минутный интервал времени, в течение которого

тределялась средняя скорость ветра. На поле опытных точек нанесены расчетные значения ветровых нагрузок при следующих исходных диаметрах: кривая 1 — при использовании в расчете эквивалентного диаметра, $d_э=45$ мм, кривая 2 — при использовании эквивалентного диаметра, приведенного к плотности $0,9$ г/см³, $d_э^п=30$ мм, кривая 3 — при использовании фактического диаметра середине пролета, $d_ф=70$ мм.

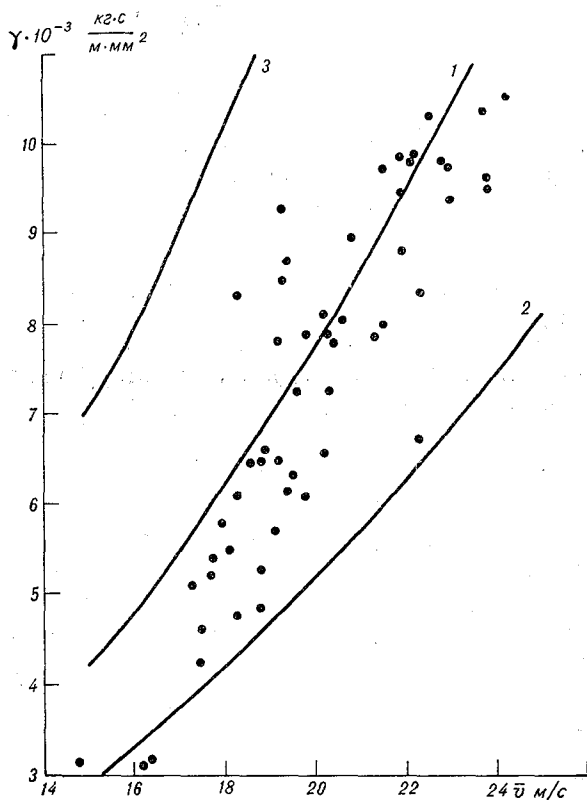


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения приведенных единичных ветровых нагрузок на провода

Как видно, для рассматриваемых отложений плотной изморози, использование в расчетах фактического диаметра отложений приведет к необоснованному завышению расчетных нагрузок.

Дальнейший анализ примера (рис. 1) показывает, что приведение фактических максимальных размеров отложений в середине пролета к плотности $0,9$ г/см³ может давать весьма близкое приближение к эквивалентным диаметрам. Для нашего примера использование эквивалентного и приведенного диаметров оказыва-

ется равноценным и дает уровень нагрузок по кривой 1. Однако это совпадение не является закономерным и при других удельных весах, формах и распределениях по пролету могут быть существенные отличия между эквивалентным и приведенным диаметрами отложений, что наглядно видно из выражений:

$$d_{\text{э}} \approx \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}; \quad d_{\text{п}} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{ф}}}{0,9} a c},$$

где $d_{\text{э}}$ — эквивалентный диаметр; d_i — диаметры обледенелого провода в разных точках пролета в плоскости, нормальной к ветровому потоку; $d_{\text{п}}$ — приведенный диаметр; $\mu_{\text{ф}}$ — фактическая плотность отложений; 0,9 — максимальная плотность чистого гололеда; a и c — большой и малый диаметры максимальных гололедных отложений в середине пролета.

По-видимому, применение в расчетах эквивалентного диаметра вместо приведенного позволит более надежно оценить величины ветровых нагрузок.

Однако введение более точного диаметра еще не гарантирует правильность оценки ветровой нагрузки, на которую влияют также и другие величины, входящие в расчетную формулу

$$\gamma = \alpha c_x \frac{\bar{v}^2 \rho d}{2F} \cdot 10^{-3},$$

где γ — единичная нагрузка, приведенная к 1 мм² сечения провода, кг·с/м·мм²; α — поправочный коэффициент на неравномерность ветра вдоль пролета; c_x — аэродинамический коэффициент; $\bar{v}$ — средняя скорость ветра, м/с; ρ — плотность воздуха; d — наружный диаметр провода вместе с гололедными отложениями в плоскости, нормальной к ветровому потоку, мм, F — теоретическая площадь сечения провода, мм².

Особого внимания заслуживает величина аэродинамического коэффициента c_x . К сожалению, насколько нам известно, продувка моделей обледенелых проводов ЛЭП в аэродинамической трубе не проводилась. Также не оценено влияние на аэродинамические свойства проводов отмеченной выше беспорядочности в распределении размеров и форм отложений плотной изморози вдоль пролета. Величина c_x для всех случаев обледенения, по аналогии с проводами без гололеда, принимается в расчетах постоянной и равной 1,2.

Полученные экспериментальные величины нормальной составляющей ветровых нагрузок позволяют приблизительно провести косвенную проверку стабильности величины c_x в обследованном диапазоне. Действительно, если значение c_x при увеличении диаметра гололеда существенно не изменяется, то, относя экспериментальную ветровую нагрузку к 1 м² площади проекции провода на пло-

кость, перпендикулярную направлению ветра, получаем одну общую закономерность

$$q = f(v^2, \alpha) \text{ кг·с/м}^2$$

для любых диаметров гололедных отложений. Такая зависимость представлена на графике рис. 2 как для опытных данных по Орто-Ашу, так и для нагрузок на провода без гололеда, полученных ранее в Ховасте [3]. При этом удельные нагрузки на обледенелые провода оценивались, исходя из эквивалентного диаметра отложений.

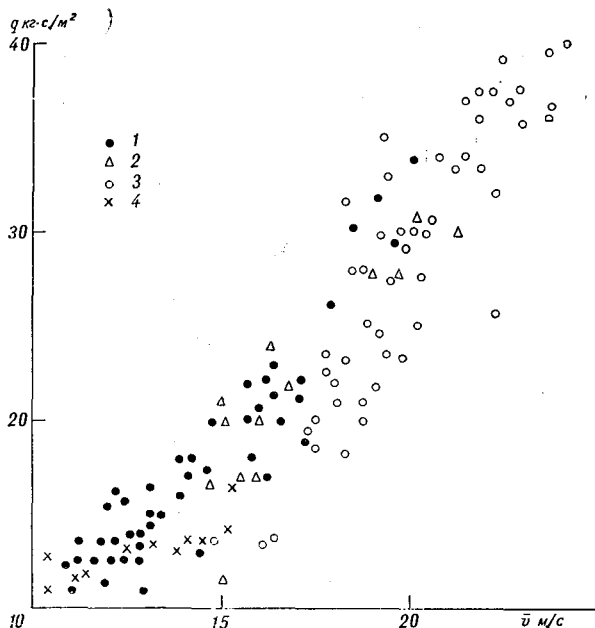


Рис. 2. Экспериментальные значения удельных ветровых нагрузок на провода разных диаметров по данным испытательной станции Орто-Ашу и опытного полигона в Ховасте:

1, 2 — провода без гололеда (1 — Ховаст, 2 — Орто-Ашу), 3, 4 — провода с гололедом (3 — $d_{cp} = 45$ мм, 4 — $d_{cp} = 75$ мм).

Как видно, отклонения удельных нагрузок при разных диаметрах лежат в пределах точности оценки эквивалентного диаметра и в пределах разброса опытных точек. Близкое совпадение данных, полученных в совершенно разных географических районах, позволяет полагать, что в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса до $1,1 \cdot 10^5$, характеризуемом произведением $v_d = 1300$ м·мм/с, величина аэродинамического коэффициента c_x мало зависит от степени обледенения проводов. Однако исследованный диапазон

чисел Рейнольдса не является предельным для отложений сплошной изморози, а известные закономерности обтекания тел с большим удлинением делают недопустимой экстраполяцию полученных результатов. Так, из классической кривой Везильсбергера [1] полученной для гладких цилиндров и приведенной на рис. 3, следует, что уже при числах Рейнольдса $1,7 \cdot 10^5$ можно ожидать уменьшения нагрузок.

Переход от гладких цилиндров к изрезанной поверхности реальных проводов изменяет, как отмечено В. В. Бургсдорфом [1]

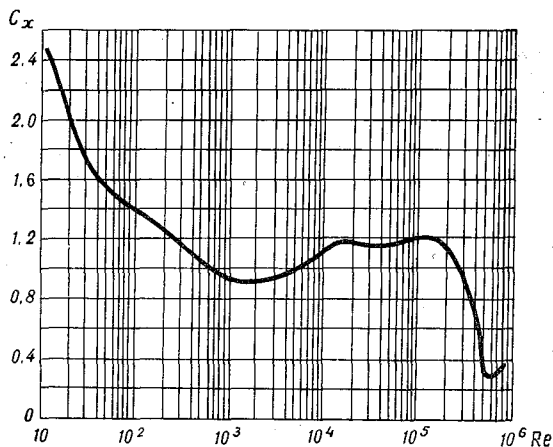


Рис. 3. Зависимость аэродинамического коэффициента c_x от числа Рейнольдса, полученная Везильсбергером для гладких цилиндров

граничные значения постоянства c_x . По-видимому, еще более резких отклонений количественной границы следует ожидать для проводов, покрытых изморозью, которые значительно отличаются от гладких цилиндров не только шероховатостью и изрезанностью, но и формой поверхности.

Вполне реальные сочетания скоростей ветра и диаметра изморозевых отложений [5], дающие произведение vd порядка 2000—6000 м·мм/с, могут лежать в зоне резкого снижения c_x . Недоучет этого возможного снижения может привести к значительному искажению расчетных нагрузок при высоких скоростях ветра и больших диаметрах гололедных отложений.

Точная количественная оценка аэродинамического коэффициента обледенелых проводов может быть сделана только путем продувки форм реальных отложений в аэродинамической трубе. Настоящая необходимость такого эксперимента очевидна. Однако таких данных будет еще недостаточно для решения задачи, так как неравномерность форм, размеров гололедных отложений и их возможная беспорядочность вдоль пролета приведут к тому, что при

льших диаметрах отдельные участки провода в пролете будут иметь разные аэродинамические свойства.

Суммарная оценка величины c_x для пролета ЛЭП в целом может быть произведена на опытных установках типа испытательных стендов Орто-Ашу по измеренным реальным нагрузкам на провод при условии надежной фиксации остальных величин, входящих в расчетную формулу.

Сопоставление данных продувок отдельных форм и их возможных сочетаний с суммарной оценкой c_x по пролету позволит определить закономерности изменения величины аэродинамического коэффициента для обледенелых проводов.

Не менее серьезные замечания можно сделать и по поводу оценки скоростей ветра при гололедных расчетах, однако этот вопрос, ввиду его большой сложности, требует отдельного рассмотрения.

Затронутые вопросы наряду с всесторонним изучением явления опасности обледенелых проводов составляют перспективную программу дальнейшей работы гололедно-ветровой испытательной станции ЛЭП на перевале Орто-Ашу. Ввиду сложности и большого объема исследований было бы желательно привлечение дополнительных научных сил, в том числе и в других зонах Советского Союза.

ЛИТЕРАТУРА

- Бургсдорф В. В., Махлин Б. Ю. Аэродинамическое сопротивление проводов и тросов воздушных линий электропередачи.— Информационные материалы ВНИИЭ, № 34. М., Госэнергоиздат, 1958. 20 с.
- Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 208 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
- Гарцман Л. Б., Холодов В. В. Уточнение ветровых нагрузок на провода ЛЭП по экспериментальным данным.— В кн.: Проектирование энергосистем и электрических сетей. Вып. 5. Ташкент, 1970, с. 40—52.
- Никифоров Е. П. Влияние закручивания провода на вес отложения гололеда.— «Труды ВНИИЭ», 1962, вып. 15, с. 121—133.
- Подрезов О. А., Першин И. И. Расчетные схемы для оценки ветровых и гололедных нагрузок воздушных линий электропередач Тянь-Шаня.— В кн.: Изучение и комплексное использование энергетических ресурсов Киргизии. Фрунзе, «Илим», 1971, с. 144—169.
- Холодов В. В. Тензометрические измерения ветровых нагрузок на провода и опоры линий электропередачи.— В кн.: Проблемы общей энергетики и единой энергетической системы. Вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1969, с. 136—144.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБО ОПАСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ЛЬДА И ГОЛОЛЕДНЫЕ НАГРУЗКИ В УКРАИНСКИХ КАРПАТАХ

Интенсивные отложения гололеда, изморози, смеси, мокрой снега ежегодно наносят огромный ущерб различным отраслям народного хозяйства. Поэтому изучение пространственно-временного распределения этих отложений и особенностей синоптических процессов при их возникновении в конкретных физико-географических районах весьма актуально.

В последние годы на кафедре общей и прикладной климатологии ОГМИ был выполнен ряд работ, в которых достаточно подробно рассмотрены закономерности пространственно-временного распределения гололедно-изморозевых явлений на территории Украины и Молдавии в зависимости от условий рельефа и характера атмосферных процессов [3, 5—10, 12]. Однако из-за отсутствия качественных наблюдений отложения мокрого снега изучению не подвергались, что является существенным недостатком этих исследований.

При решении основной задачи, поставленной в работе, необходимо было как можно подробнее изучить характер рельефа исследуемой территории — Украинских Карпат, характеризующейся значительной пересеченностью рельефа с перепадом высот от 10 до 2060 м (гора Говерла). Для этого использованы литературные источники, различные физико-географические карты и специальные описания метеорологических станций (ГМС). Для ознакомления с особенностями рельефа и гололедного обследования район Украинских Карпат кафедра климатологии ОГМИ провела шесть экспедиций (1957 и 1966—1970 гг.), во время которых производились фотографирование местности, микроклиматические наблюдения, собраны дополнительные сведения о гололедно-изморозевых отложениях. Все эти материалы оказались весьма полезными при выполнении гололедного районирования территории и типизации рельефа.

Анализ собранных материалов, показал, что в юго-западной и западной частях УССР встречаются все основные формы рельефа — горы, перевалы, предгорья, глубокие речные долины и др. Среди этого разнообразия типов рельефа выделяются благодаря сильной эрозии и расчлененности местности узкие долины рек, окруженные значительными возвышенностями. Как правило, ГМС расположены в долинах таких рек.

Детальное изучение характера микро- и мезорельефа (в радиусе до 20 км) с учетом повторяемости направлений ветра позволило авторам ранее [5—7] разделить все ГМС Украины на семь основных групп. Каждая из них в зависимости от особенностей местоположения — относительной высоты, крутизны и ориентирования склона, степени защищенности по отношению к преобладающим при гололеде ветрам (так называемый гололедонесущий порок) — была отнесена к одному из 7 типов рельефа, отличающихся интенсивностью гололедообразования [8, 9]. В условиях резко пересеченного рельефа абсолютная высота пункта не всегда характеризует степень его открытости по отношению к гололедонесущему потоку. Имея значительную высоту над уровнем моря, ГМС может находиться в долине реки или котловине, где процесс гололедообразования, по сравнению с открытым возвышенным местом, будет ослаблен. Поэтому при анализе гололедных данных (и осадков тоже) необходимо принимать во внимание весь комплекс факторов рельефа, а не только абсолютную высоту [10].

Классификация типов рельефа дала возможность произвести обработку материалов наблюдений над обледенением проводов с учетом влияния основных физико-географических факторов [8, 11].

Как показали дальнейшие исследования [13], установленные авторами типы рельефа могут быть выделены и в других физико-географических районах СССР. При этом в зависимости от особенностей региона следует несколько детализировать предложенную классификацию, учитывая вертикальную зональность и другие факторы.

Прежде всего по данным инструментальных наблюдений были впервые проанализированы все случаи сильных (особо опасных) отложений гололеда (≥ 20 мм), изморози (≥ 50 мм), смеси и мокрого снега (≥ 35 мм), наблюдавшихся на территории Украинских Карпат в зимы с 1950 по 1969 г.

Всего за исследуемый период было отмечено 82 случая таких отложений, из них: гололеда — 17, изморози — 19, смеси — 11 и мокрого снега — 35 случаев.

Сильные гололеды и изморозь могут возникать с ноября по март, а мокрый снег — в течение всего холодного периода (октябрь — апрель). Однако самые интенсивные и, следовательно, наиболее опасные отложения всех видов атмосферного льда наблюдаются преимущественно в декабре, январе (особенно) и феврале (около 80% всех случаев).

Известно, что особо опасные явления погоды распределяются крайне неравномерно [3—5] и картографировать их весьма трудно. Поэтому их распределение представлено только в виде табл. 1.

Чаще всего особо опасные отложения гололеда, изморози и смеси происходят в Предкарпатье (Черновцы, Долина и др.) в основном на открытых возвышенных местах (типы рельефа V—VII, по А. Н. Раевскому).

Таблица

Повторяемость особо опасных отложений атмосферного льда
в Украинских Карпатах

Станция	Высота, м	Тип релье- фа	Вид отложения								Общ. числ. случ.
			голо- лед		измо- розь		смесь		мокрый снег		
			<i>n</i>	<i>b</i> мм	<i>n</i>	<i>b</i> мм	<i>n</i>	<i>b</i> мм	<i>n</i>	<i>b</i> мм	

Предкарпатье

Яворов	245	I							1	38	1
Ямполь	251	V	1	23					1	36	2
Львов, АМСГ	326	V	1	21							1
Мостиска	232	II					1	39	1	143	2
Самбор	293	I			2	60	1	36	1	48	4
Тернополь	334	VI	2	22	2	54	1	55			5
Дрогобыч	275	II	1	28	2	52			5	80	8
Стрый	294	II							1	86	1
Бережаны	303	I	1	21					1	56	2
Хмельницкий	297	V	2	26	1	54	1	35			4
Долина	470	V			6	86	3	86	2	41	11
Чортков	262	IV	2	32	1	50					3
Ивано-Франковск	270	V	2	22							2
Новая Ушица	276	V					1	58			1
Коломыя	295	V			1	51	1	64			2
Каменец-Подольск	224	V							2	45	2
Черновцы, АМСГ	239	VI	6	43	3	60	2	72	2	75	13

Центральная высокогорная область

Славское	592	I							2	129	2
Яремча	531	I							2	115	2
Межгорье	456	I							4	57	4
Пожижевская	1429	VII			1	96					1
Рахов	430	I							5	51	5

Закарпатье

Великий Березный	208	I							1	68	1
Берегово	112	I							1	40	1
Хуст	164	I							12	93	12

Отметим, что вообще сильные отложения гололеда и изморози условиях типов рельефа V—VII наблюдаются в 3—4 раза чаще, чем при типах рельефа I—II (защищенные возвышенностями, горные долины и котловины).

Обычно мокрый снег в Украинских Карпатах отмечается гораздо реже, чем гололед и изморозь. Однако сильные его отложения (≥ 35 мм) в последние годы происходили довольно часто. При этом суммарная их повторяемость оказалась в 2—2,5 раза большей, чем гололеда и изморози (табл. 1).

Самые интенсивные отложения мокрого снега (≥ 100 мм) наблюдались в узких долинах горных рек, хорошо защищенных от ветрового потока (Хуст, Славско, Мостиска и др., типы рельефа I—II).

Таким образом, из-за несколько иных физико-метеорологических условий образования мокрого снега для его распределения в сравнении с распределением гололеда и изморози, характерна обратная зависимость от типа рельефа [6]. Он может создавать максимально возможные нагрузки на провода и сооружения в условиях типов рельефа I—II при относительно небольшой высоте расположения пунктов и значительной их защищенности возвышенностями (горные котловины, узкие долины рек). Это обстоятельство необходимо учитывать при определении расчетных районов гололедности в условиях резко пересеченной местности.

Максимальный диаметр отложений гололеда достигал 43 мм (Черновцы, 29 XI 1954 г.), изморози — 96 мм (Пожижевская, 6 II 1967 г.), смеси — 86 мм (Долина, 6 XII 1969 г.) и мокрого снега — 43 мм (Мостиска, 5 XII 1966 г.). Наибольший вес льда для случаев особо опасных отложений гололеда не превышал 224 г/м, для отложений мокрого снега — 1248 г/м. Во всех рассмотренных случаях наблюдались повреждения воздушных линий и деревьев.

Благодаря накопленным данным инструментальных наблюдений над отложениями мокрого снега появилась возможность составить уточненные карты гололедного районирования. При этом существующую методику расчетов гололедных нагрузок авторы считают целесообразным внести некоторые коррективы.

Известно, что в соответствии с общепринятой методикой пересчета [2, 13] толщина стенки атмосферного льда на высоте 10 м принимается в 1,5 раза большей, чем на уровне 2 м (провода гололедного станка Гидрометслужбы).

Следовательно, при расчете гололедных нагрузок обычно берется средняя величина поправочного коэффициента $K-1,5$ (он учитывает различия в отложении льда на проводах за счет изменения диаметра и высоты их подвеса).

Анализ повреждений на воздушных линиях и гололедных нагрузках, возникающих на территории Украины в экстремальные зимы, показывает, что этот средний коэффициент не всегда оправдывается. Для многих пунктов (расположенных в основном в за-

щищенных местах) он близок к 1,5 или даже оказывается несколько меньшим по величине. Но в ряде физико-географических районов с резко пересеченной местностью (открытые возвышенности, типы рельефа V—VII) в зависимости от характера атмосферных процессов коэффициент K может в отдельные зимы существенно отличаться от принятой величины (1,5).

На основании анализа экспериментальных данных сети гололедных пунктов Сельэнерго, которые функционируют с 1963 г. [1], авторы пришли к выводу, что в большинстве районов Украины поправочный коэффициент должен быть увеличен до 2,0. Средняя величина K может существенно изменяться не только по зимам (в связи с особенностями атмосферных процессов), но и в зависимости от условий рельефа. Например, в западной части УССР на открытых местах Волыно-Подольской возвышенности (Калуш, тип рельефа VI) поправочный коэффициент оказался наибольшим (2,1), в северной части республики (Козелец, открытая равнина, тип рельефа III) составил 2,0, а в сравнительно защищенной долине Днестра (Павлыш, тип рельефа II) не превышал 1,2—1,5.

Сопоставление экспериментальных данных украинской сети с уникальными наблюдениями на Новопятигорской опытной геофизической станции показывает, что и там величина коэффициента K для гололеда, изморози и смеси в отдельные зимы существенно отличается от принятого значения — в среднем она изменяется от 1,2 (зимы 1965-66 и 1967-68 гг.) до 2,1 и более (зимы 1961-62 гг. и др.). При этом вес отложений льда увеличивается с высотой в 4—6 раз.

По данным Г. Н. Леухиной [4], в горах Средней Азии толщина стенки гололеда на высоте 10 м в отдельных случаях оказалась в 3—5 раз большей, чем на уровне 2 м.

Характерно, что наибольшие значения коэффициента K наблюдались в тех случаях, когда гололедообразование было вызвано перемещением южных циклонов и теплых фронтов. В барических седловинах и гребнях повышенного давления различия в размерах отложений на уровне 2 и 10 м сравнительно малы ($K=1,0$), поскольку гололедообразование здесь обычно ослаблено. Следует подчеркнуть, что в те зимы, когда из-за особенностей развития атмосферных процессов при гололеде коэффициент K превышает общепринятую расчетную величину, часто наблюдаются существенные повреждения линий связи и электропередачи, так как именно в таких случаях расчетные гололедные нагрузки на сооружения оказываются меньше фактических. Особенно это характерно для возвышенных и открытых для гололедонесущего потока мест (типы рельефа V—VII), где обычно коэффициент K более изменчив. Примером может служить декабрь 1966 г., когда линиям электропередачи Львовской области были причинены огромные повреждения [3].

В соответствии с общепринятой методикой расчетов [2], но с учетом нового поправочного коэффициента $K=2,0$ авторами были построены уточненные карты гололедного районирования УССР.

аинских Карпат при различной вероятности расчетной стенки льда, ожидаемой один раз в 5, 10 и 15 лет.

На рис. 1 в качестве примера приведена одна из них, представляющая наибольший практический интерес (с вероятностью тенки один раз в 10 лет). При проектировании сооружений обычно пользуются картами, рекомендованными Госстроем СССР [14], которые составлены с учетом среднего поправочного коэффициента $K=1,5$. Анализ этих карт кратко представлен в статье А. В. Руд-

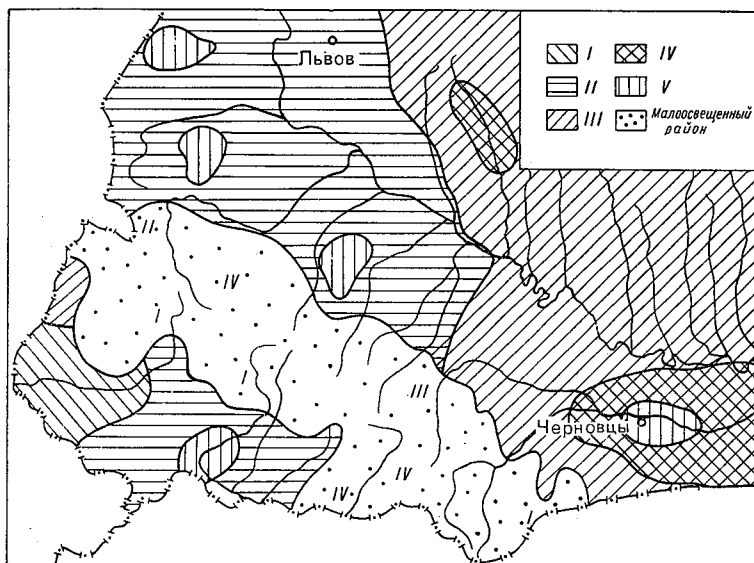


Рис. 1. Уточненная карта гололедного районирования Украинских Карпат (при величине расчетной стенки атмосферного льда, наблюдаемой один раз в 10 лет, и $K=2,0$).

невой и Т. А. Бассарской [13], где указано на некоторую их схематичность. Очевидно, эти карты следует рассматривать как фоновые, поскольку для региональных районов они нуждаются в уточнении.

При сравнении предложенной нами карты с соответствующей картой СНиП [13, 14] обнаруживаются заметные различия в пространственном распределении расчетных районов гололедности. Так, изменилось их распределение в Закарпатье, где на фоне района гололедности II (рис. 1) появился самый гололедоопасный расчетный район V (Хуст, за счет интенсивных отложений мокрого снега).

Особенно большие изменения произошли в Предкарпатье, где согласно карте СНиП преобладают расчетные районы II—III. На этом общем фоне на уточненной карте (рис. 1) отдельными пят-

нами выделяются районы гололедности IV—V (Долина, Черноты, Мостиска и др.).

Известно, что типы рельефа V—VII характеризуются комплексом метеорологических элементов (сочетанием температуры, ветра и гидрометеоров), благоприятствующим более длительным и интенсивным отложениям атмосферного льда [6, 8, 12]. Поэтому чаще всего наиболее гололедоопасные расчетные районы (IV—V) приходятся на открытые возвышенные места и их наветренные склоны. Однако иногда, при интенсивных отложениях мокрого снега, такие нагрузки возникают также и в защищенных долинах рельефа I—II).

Таким образом, разработка уточненных региональных карт гололедного районирования с учетом особенностей рельефа и некоторых других факторов представляет собой весьма актуальную задачу.

В заключение отметим, что методика расчетов гололедных нагрузок нуждается в существенной корректировке — общепринятый средний поправочный коэффициент K должен быть уточнен для всех физико-географических районов СССР, причем нужна вероятная оценка его изменчивости. А для этого крайне необходима организация экспериментальных наблюдений на действующей сети ЛЭП по заранее продуманному плану. В настоящее время такие наблюдения в основном носят эпизодический характер и производятся без должного учета рельефа местности.

До решения вопроса о разработке общепринятой методики расчетов гололедно-ветровых нагрузок при проектировании сооружений карты гололедного районирования целесообразно использовать в комплексе (сочетании) с картами ветровых нагрузок. Кроме того, необходимо больше внимания уделить учету особенностей рельефа и заlesenности местности. Все это будет способствовать уменьшению числа аварий на воздушных линиях и повышению эффективности их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горштейн Ш. Д. К методике определения расчетных гололедных нагрузок воздушных линий электропередачи УССР.— В кн.: Метеорология, климатология и гидрология. Вып. 2. Киев, 1966. с. 50—54.
2. Заварина М. В. К расчету гололедных нагрузок.— «Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 21—30.
3. Капралова В. П. Интенсивные отложения гололеда и мокрого снега на территории Львовской области в декабре 1966 г.— В кн.: Метеорология, климатология и гидрология. Вып. 5. Киев, 1969, с. 251—256.
4. Леукина Г. Н. Опасные гололедообразования в условиях Средней Азии.— «Труды САРНИГМИ», 1968, вып. 41, с. 13—20.
5. Раевский А. Н. К вопросу о повторяемости гололеда.— «Метеорология и гидрология», 1953, № 1, с. 28—32.
6. Раевский А. Н. Влияние рельефа на распределение гололедно-изморозевых отложений.— «Труды ОГМИ», 1961, вып. 23, с. 3—11.
7. Раевский А. Н. Влияние особенностей рельефа на распределение гололедных отложений.— «Труды ГГО», 1961, вып. 122, с. 47—52.

- Раевский А. Н. О распределении гололеда на территории Украины.— «Труды УкрНИГМИ», 1961, вып. 29, с. 50—62.
- Раевский А. Н. О распределении изморози на территории Украины.— «Труды УкрНИГМИ», 1962, вып. 33, с. 64—72.
0. Раевский А. Н., Переведенцева Н. И. К вопросу о влиянии характера рельефа на распределение отложений гололеда в Украинских Карпатах.— В кн.: Метеорология, климатология и гидрология. Вып. 3. Киев, 1967, с. 80—85.
1. Раевский А. Н. К вопросу о комплексных характеристиках погоды при образовании гололеда и изморози.— «Труды УкрНИГМИ», 1967, вып. 65, с. 117—123.
2. Раевский А. Н., Вязовиченко Е. А. Синоптические условия образования значительного гололеда в Украинских Карпатах.— В кн.: Метеорология, климатология и гидрология. Вып. 5. Киев, 1969, с. 64—71.
3. Руднева А. В., Бассарская Т. А. Учет рельефа местности при расчете гололедных нагрузок.— «Труды ГГО», 1967, вып. 210, с. 47—57.
4. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966, 19 с.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ПРОВОДОВ НА НОВОПЯТИГОРСКОЙ ГОЛОЛЕДНОЙ СТАНЦИИ

Систематические наблюдения над гололедом на Новопятигорской опытной геофизической станции проводятся с 1936 г. Эти наблюдения включают измерение размеров и веса отложений на проводах разного диаметра, устанавливаемых на разных высотах и под различными углами к направлению влагонесущего потока; эпизодические измерения водности облаков в периоды гололедообразования и т. п. Результаты этих экспериментальных исследований обобщены в [2, 3, 6].

В настоящей работе приведены данные о сравнительной интенсивности обледенения проводов, расположенных под разными углами к направлению ветра и об изменении плотности различных видов отложений с увеличением диаметра провода.

Для анализа изменения интенсивности гололедообразования (веса и размеров отложения) в зависимости от направления влагонесущего потока были использованы данные наблюдений за 1938—1956 гг., когда проводились измерения веса (P) и размеров (a и c) отложений на проводах, установленных под углами 0; 22,5; 45; 67,5 и 90° к направлению ветра.

Вес и размеры отложений на проводах, расположенных под углами 0; 22,5; 45 и 67,5° к направлению ветра, определяются в процентах по отношению к весу и размерам отложений на проводах, перпендикулярных к направлению влагонесущего потока (100%).

Результаты расчетов средних отношений P_α/P_{90} , a_α/a_{90} и c_α/c_{90} представлены в табл. 1.

Для сравнения в предпоследней строке таблицы приведено отношение $\frac{\sin \alpha}{\sin 90} \cdot 100\%$.

Из таблицы видно, что вес отложения на проводе, параллельном потоку, составляет по отношению к весу отложения на проводе, нормальном к потоку, 19% при гололеде, 23% при смеси и 36% при зернистой изморози. Для размеров отложений соответствующее отношение равно 30—50%.

При гололеде $\frac{P_\alpha}{P_{90}} \approx \frac{a}{a_{90}} \approx \frac{c_\alpha}{c_{90}} \approx \frac{\sin \alpha}{\sin 90}$ только для $\alpha \geq 22,5^\circ$, а при зернистой изморози и смеси для $\alpha > 45^\circ$. При меньших углах

Таблица 1

Изменение (%) размеров и веса отложений на проводах в зависимости от направления ветра

Ид отложений	0°			22,5°			45°			67,5°		
	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$
	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$	$\frac{P_a}{P_{90}}$	$\frac{a_a}{a_{90}}$	$\frac{c_a}{c_{90}}$
гололед	19	32	37	38	42	45	70	70	71	89	87	92
снег	23	43	47	53	64	66	73	80	79	92	94	96
кристальная изморозь	36	52	49	68	65	61	82	76	75	93	92	90
$\frac{a}{90} \cdot 100\%$	0	0	0	38	38	38	70	70	70	92	92	92
число случаев	102	108	108	21	39	39	59	73	73	21	38	38

Примечание. P — вес отложения, a и c — большой и малый диаметры отложения с проводом, индексы „ a “ и „90“ — угол, под которым провод расположен по отношению к направлению ветра.

отношения веса $\frac{P_a}{P_{90}}$ и размеров отложения $\frac{a_a}{a_{90}}$ и $\frac{c_a}{c_{90}}$ превышают величину $\frac{\sin \alpha}{\sin 90}$.

Значительный интерес представляют данные об изменении плотности различных видов отложений с увеличением диаметра провода от 5 до 48 мм (табл. 2). Плотность отложений γ рассчитывалась по формуле

$$\gamma = \frac{P}{0,78(ac - d^2)} \text{ г/см}^3, \quad (1)$$

где P — вес отложения (г/м); a и c — большой и малый диаметры отложения с проводом (мм); d — диаметр провода (мм).

Из таблицы видно, что плотность всех рассматриваемых видов отложений, как правило, постепенно возрастает с увеличением диаметра провода, что справедливо для гололедно-изморозевых отложений самой различной плотности — от 0,07 до 0,70 г/см³.

Физический смысл этого явления совершенно очевиден и объясняется так называемыми критическими условиями инерционного осаждения капель тумана на поверхности тела. Согласно законам инерционного осаждения частиц на препятствие [4, 5], существует так называемый критический размер частиц $r_{кр}$, т. е. тот минимальный размер частиц, начиная с которого они могут осаживаться на поверхности тела. Капли меньшего размера увлекаются потоком воздуха и обтекают тело, так как их инерция недостаточна для преодоления аэродинамических сил, заставляющих каплю двигаться по линиям тока, т. е. по траекториям частиц воздуха.

**Плотность гололеда, зернистой изморози и смеси на проводах
разного диаметра (г/см³)**

Вид отложений	Диаметр провода, мм							
	5	10	15	20	25	30	34	48
Гололед	0,70	0,75	0,77	0,77	0,76	0,80	0,85	0,85
"	0,62	0,62	0,65	0,70	0,73	0,77	0,77	0,80
"	0,55	0,59	0,59	0,60	0,60	0,65	0,70	0,80
"	0,45	0,50	0,50	0,52	0,55	0,55	0,60	0,60
"	0,40	0,40	0,42	0,45	0,55	0,65	0,70	0,70
"	0,54	0,60	0,60	0,60	0,65	0,70	0,68	0,65
"	0,62	—	0,70	—	0,75	0,75	0,80	0,75
"	0,67	—	0,65	—	0,65	0,70	0,75	0,82
Смесь	0,10	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,34	0,34
"	0,08	—	0,10	—	0,13	—	—	—
"	0,25	0,30	0,32	0,32	0,40	0,43	0,45	0,45
"	0,20	0,25	0,28	0,32	0,35	0,40	0,42	0,45
"	0,16	—	0,20	—	0,25	0,27	0,30	0,30
"	0,30	—	0,32	—	0,34	0,38	0,40	0,40
"	0,23	0,25	0,27	0,30	0,35	0,32	0,30	0,28
"	0,15	0,20	0,22	0,24	0,24	0,28	0,32	0,35
"	0,20	0,22	0,24	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35
"	0,07	0,09	0,11	0,12	0,14	0,14	0,16	0,15
"	0,35	0,37	0,40	0,45	0,48	0,52	0,55	0,60
"	0,29	—	0,33	—	0,42	—	—	—
Зернистая изморозь	0,07	—	0,10	—	0,11	0,12	0,12	0,13
"	0,10	0,11	0,12	0,14	0,14	0,15	0,15	0,17
"	0,12	0,14	0,15	0,16	0,16	0,18	0,17	0,20
"	0,09	0,09	0,10	0,11	0,13	0,13	0,14	0,15
"	0,15	0,17	0,20	0,22	0,24	0,25	0,27	0,30
"	0,14	—	0,16	—	0,18	—	—	—
"	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,32

Величина $r_{кр}$ зависит от плотности частиц, скорости потока размеров препятствия и вязкости воздуха.

Как показано в [1, 4], критический размер капель возрастает с уменьшением скорости ветра и увеличением размеров обтекаемого тела.

Поскольку при наблюдениях на Новопятигорской станции про вода разного диаметра были установлены на одном уровне, а из-

ерение отложений происходило практически одновременно, ясно, то все исследуемые провода находились в одинаковых условиях. Следовательно, в данном случае величина $r_{кр}$ зависит только от диаметра провода, с увеличением которого $r_{кр}$ возрастает.

Чем больше диаметр провода, тем более крупные капли оседают на нем, что и является решающим фактором увеличения плотности отложений.

Таблица 3

Средние и экстремальные характеристики увеличения плотности отложений в зависимости от диаметра провода

Диаметр провода, мм	$\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_5}\right)_{\max}$	$\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_5}\right)_{\min}$	$\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_5}\right)_{\text{ср}}$	Число случаев
10	1,25	0,96	1,13	21
15	2,00	1,05	1,20	48
20	1,50	1,00	1,31	13
25	2,29	1,08	1,35	42
30	2,17	1,06	1,42	24
34	2,40	1,00	1,55	26
48	2,75	1,00	1,60	22

Примечание. γ —плотность отложения, индексы „d“ и „5“ — диаметр провода, мм.

Оценка изменения плотности зернистой изморози и смеси в зависимости от диаметра провода дана в табл. 3.

Плотность отложений на проводах разного диаметра определялась по отношению к плотности отложений на 5-миллиметровом проводе.

Из таблицы видно, что, например, на 10-миллиметровом проводе плотность отложений зернистой изморози и смеси в среднем на 13%, а на 48-миллиметровом проводе на 60% выше, чем на 5-миллиметровом. Величины максимальных значений γ показывают, что плотность отложений на 10-миллиметровом проводе может увеличиваться на 25%, а на 48-миллиметровом проводе — на 275% по сравнению с 5-миллиметровым проводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов В. Г. Метеорологические условия образования гололеда на высотных сооружениях. Л., 1972. 98 с. (Труды ГГО. Вып. 311.)
2. Глухов В. Г. Об интенсивности обледенения проводов разного диаметра. — «Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 10—18.

3. Заварина М. В., Арнаутков П. К. Коэффициенты пересчета гололедных нагрузок.—«Труды ГГО», 1972, вып. 303, с. 24—26.
4. Левин Л. М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. М. Изд-во АН СССР, 1961, 267 с.
5. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1957. 352 с.
6. Шкодин А. И. Некоторые сведения об условиях работы линий электропередачи и связи в гололедных районах.—«Электричество», 1953, № 10 с. 90—99.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОЛЕДНЫХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА ЛЭП И ЛС В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

При расчете гололедных нагрузок на линии электропередачи (ЛЭП) и связи (ЛС) исходным материалом являются данные гидрометеорологических станций (ГМС), полученные по наблюдениям на жесткозакрепленном отрезке провода диаметром 5 мм, подвешенном на высоте 2 м над поверхностью земли. Нагрузки на провода линий определяются введением поправочных коэффициентов к данным наблюдений ГМС. Для обоснованного пересчета данных ГМС необходимо установить закономерности изменения гололедных отложений применительно к конструктивным параметрам линий. Основными из них являются закономерности изменения гололедных отложений в зависимости от диаметра и высоты подвеса провода, его закручивания при гололедообразовании в электрическом поле провода. Для распространения данных ГМС на тот или иной участок ЛЭП важно знать также влияние микроклимата и угла встречи потока с проводом на интенсивность гололедообразования [2, 6, 7, 10].

Используемые в настоящее время поправочные коэффициенты для учета влияния диаметра и высоты подвеса провода [12] получены в основном по результатам измерений на равнинной территории Советского Союза и нуждаются в специальной проверке для горных районов.

Не менее важной задачей при изучении гололедных нагрузок следует считать выявление механизма гололедообразования на основе микрофизических измерений, а также установление роли отдельных метеорологических факторов в процессе гололедообразования. Это позволит по данным массовых наблюдений на сети ГМС, прогнозировать некоторые закономерности формирования гололедных нагрузок на конструктивные элементы проектируемых ЛЭП.

Для решения этих и ряда других задач в условиях горной местности Таджикским научно-исследовательским отделом энергетики (ТаджНИОЭ) с 1967 г. организовывались специальные наблюдения на экспериментальных базах, расположенных на пер. Чор-гасак (1700 м) и пер. Анзоб (3400 м) [3], а также на горе Санглок (2300 м) и в Варзобском ущелье (Гушары, 1400 м). При выборе пунктов наблюдений ставилась задача выявления особен-

ностей обледенения проводов в сильно гололедных районах различных зон и форм горного рельефа.

В вышеуказанных пунктах проводились измерения отложения на проводах разного диаметра, различно ориентированных относительно гололедонесущего потока и расположенных на высоте от 2 до 35 м над поверхностью земли. В районе экспериментальных баз гололедно-измерительные установки располагались в различных формах микрорельефа. Измерение размера и веса отложения производилось по методике Гидрометслужбы, а также гололедографами конструкции Е. П. Никифорова, Н. А. Мальцева и дистанционными тензометрическими гололедомерами конструкции ТаджНИОЭ. В период нарастания гололедно-изморозевых отложений регистрировалась температура воздуха на высоте 2 м, ежедневно измерялись направление и скорость ветра на высоте 10 м. На пер. Чормазак дистанционно измерялись также температура на высоте 2 и 36 м, градиент скорости ветра (до 31 м анемометрами М-92 с обогревом) и градиент влажности тумана (до 36 м прибором В. А. Зайцева), а также производилось микрофотографирование капель тумана.

Влияние диаметра провода на величину гололедно-изморозевых отложений изучалось во всех четырех пунктах. Наблюдения проводились на алюминиевых трубках диаметром от 5 до 50 мм установленных перпендикулярно к преобладающему направлению ветра при гололеде. Во время наблюдений производились измерения веса и геометрических размеров отложения, а также зарисовывалась их форма.

Объем полученных материалов следующий. В Гушарах произведено 10 измерений отложений мокрого снега при весе на 5-миллиметровом проводе от 50 до 250 г/м и плотности от 0,1 до 0,49 г/см³. На ст. Чормазак сделано 15 измерений отложений зернистой изморози и смеси ее с гололедом при плотности от 0,1 до 0,65 г/см³. Диапазон измеренных значений веса от 10 до 1200 г/м. По Санглоку имеется 18 измерений зернистой изморози и смеси с весом отложений от 50 до 600 г/м и плотности от 0,14 до 0,78 г/см³. На ст. Анзоб сделано 44 измерения отложений зернистой изморози, смеси и гололеда с весом от 50 до 1100 г/м. Плотность зернистой изморози от 0,1 до 0,62 г/см³, смеси от 0,2 до 0,83 г/см³, гололеда от 0,54 до 0,88 г/см³.

Изменение параметров отложения на проводах разного диаметра оценивалось относительно 5-миллиметрового провода. Исследовались парные корреляционные зависимости между параметрами отложений на проводе данного диаметра и их значениями на 5-миллиметровом проводе. При наличии значимой связи находились уравнения регрессии и доверительных границ, учитывающие отклонения индивидуальных значений от линии регрессии на уровне 95% вероятности. Затем по линиям регрессии и верхним доверительным границам находились отношения (средние и их возможные превышения при принятой доверительной вероятности) параметров отложения на проводах разных диаметров и 5-миллимет

вом проводе при фиксированных значениях их на последнем. настоящей статье приводятся результаты только для двух параметров отложения — веса P и толщины стенки гололеда b .

Зависимости этих параметров от диаметра провода характеризуют коэффициенты

$$K_{pd} = \frac{P_d}{P_5} \text{ и } K_{bd} = \frac{b_d}{b_5}.$$

Коэффициенты K_{pd} и K_{bd} , найденные по уравнениям верхних доверительных границ, в дальнейшем названы максимальными, в отличие от средних, полученных по уравнениям регрессий.

Результаты вычислений для веса отложения представлены в табл. 1, для толщины стенки гололеда — в табл. 2. В последней также приведены поправочные коэффициенты, рекомендуемые И 318-65 [12]. Максимальные значения K_{bd} во всех пунктах казались общими для всех фиксированных толщин стенок гололеда на 5-миллиметровом проводе и поэтому они приведены только в одной строке.

Приведенные в таблицах данные показывают, что с увеличением диаметра провода вес отложений увеличивается, а толщина стенки гололеда уменьшается. С увеличением нагрузки, т. е. по мере развития гололедообразования, эти изменения становятся все меньше, особенно на проводах большого диаметра.

Основными причинами различий в величине отложений на проводах разного диаметра, как следует из теоретического рассмотрения вопроса [1], являются различия в размерах капелек тумана скорости ветра. С укрупнением капель и увеличением скорости ветра при гололеде (до определенного предела) коэффициент K_{pd} должен увеличиваться. Известно также, что гололед образуется при более крупных каплях, чем изморозь [8], капли в более высоких частях облака крупнее [13], скорость ветра с высотой над уровнем моря обычно возрастает. Отсюда можно было бы сделать выводы о зависимости K_{pd} от вида отложения и высоты местности. Однако детальный анализ материалов наших наблюдений показал следующее.

На пер. Анзоб коэффициенты K_{pd} для гололеда и изморози отличаются незначительно. В то же время для зернистой изморози в разных пунктах они различаются существенно.

Коэффициенты K_{pd} на более высоко расположенном Санглоке меньше, чем на Чормазаке, за счет больших скоростей ветра на последнем.

Наиболее высокие значения коэффициентов K_{pd} на Анзобе по сравнению с Чормазаком обусловлены большими скоростями ветра при гололеде и, видимо, более крупными каплями в облаках, закрывающих перевал.

Коэффициенты для мокрого снега (единственного вида обледенения в Гушарах) наиболее высокие, но в сравнительный анализ они не входили, так как в других пунктах этот вид отложения

Таблица

Поправочные коэффициенты K_{pd} для пересчета среднего и максимального (в скобках) веса отложения на проводах разных диаметров при фиксированных значениях его на 5-миллиметровом проводе (P_5)

P_5 г/м	Диаметр провода, мм						
	5	10	15	20	30	40	50
Гушары							
50—250	1	1,22 (1,5)	1,59 (2,2)	1,86 (2,6)	2,56 (3,6)	2,92 (4,4)	3,28 (6,9)
Чормазак							
100	1	1,16 (1,33)	1,31 (1,82)	1,43 (2,1)	1,61 (2,58)	1,74 (3,0)	1,82 (3,42)
300	1	1,09 (1,15)	1,16 (1,33)	1,23 (1,42)	1,3 (1,62)	1,38 (1,8)	1,45 (2,0)
600	1	1,08 (1,11)	1,11 (1,18)	1,15 (1,25)	1,21 (1,37)	1,3 (1,49)	1,35 (1,62)
1000	1	1,08 (1,09)	1,09 (1,14)	1,12 (1,19)	1,17 (1,27)	1,2 (1,32)	1,22 (1,38)
Санглок							
100	1	1,06 (1,3)	1,1 (1,33)	1,14 (1,37)	1,22 (1,44)	1,3 (1,48)	1,36 (1,31)
300	1	1,04 (1,16)	1,07 (1,2)	1,1 (1,22)	1,16 (1,29)	1,2 (1,35)	1,27 (1,41)
600	1	1,02 (1,11)	1,03 (1,14)	1,05 (1,18)	1,09 (1,24)	1,14 (1,3)	1,19 (1,36)
Анзоб							
100	1	1,25 (2,0)	1,4 (2,3)	1,56 (2,5)	1,85 (3,3)	2,1 (4,0)	2,3 (4,5)
300	1	1,2 (1,43)	1,32 (1,83)	1,6 (2,1)	1,74 (2,7)	1,99 (3,2)	2,22 (3,5)
600	1	1,16 (1,33)	1,26 (1,6)	1,39 (1,8)	1,62 (2,2)	1,85 (2,6)	2,05 (2,8)
1000	1	1,13 (1,25)	1,22 (1,4)	1,33 (1,58)	1,53 (1,93)	1,72 (2,15)	1,88 (2,4)

не наблюдался. Закономерности налипания мокрого снега на провода разного диаметра следует рассматривать особо, ибо физика этого процесса иная.

Таким образом, непосредственной существенной зависимости интенсивности нарастания на проводах различного диаметра от

Таблица 2

Поправочные коэффициенты K_{ba} для пересчета средней и максимальной (в скобках) толщины стенки гололеда на провода разных диаметров при фиксированных значениях ее на 5-миллиметровом проводе (b_5)

b_5 мм	Диаметр провода, мм						
	5	10	15	20	30	40	50
Гушары							
2,5—7	1	0,82 (0,96)	0,77 (0,92)	0,73 (0,9)	0,65 (0,84)	0,59 (0,82)	0,52 (0,82)
Чормазак							
4	1	0,79	0,67	0,59	0,45	0,4	0,31
8	1	0,87	0,76	0,68	0,54	0,46	0,43
12	1	0,88	0,78	0,71	0,59	0,51	0,47
16	1	0,88 (0,94)	0,81 (0,86)	0,74 (0,79)	0,64 (0,7)	0,55 (0,67)	0,5 (0,65)
Санглок							
4	1	0,71	0,55	0,45	0,33	0,27	0,2
8	1	0,81	0,7	0,57	0,45	0,37	0,34
12	1	0,85 (0,9)	0,75 (0,8)	0,62 (0,7)	0,5 (0,6)	0,42 (0,5)	0,39 (0,45)
Анзоб							
4	1	0,85	0,72	0,64	0,54	0,46	0,41
8	1	0,91	0,81	0,75	0,64	0,59	0,54
12	1	0,93	0,86	0,82	0,72	0,67	0,62
16	1	0,94 (1,02)	0,88 (1,0)	0,86 (0,99)	0,78 (0,97)	0,71 (0,96)	0,65 (0,95)
СН 318-65							
	1	0,92	0,86	0,81	0,73	0,67	0,64

вида отложения в горах не установлено. Не обнаруживается также однозначной зависимости закономерностей изменения величины отложения с увеличением диаметра провода от высоты местности над уровнем моря.

При прогнозе зависимости веса отложения от диаметра провода, кроме высоты местности, косвенно характеризующей размеры капель, видимо, в большей мере следует учитывать особенности ветрового режима, тесно связанные в горах с микрорельефом.

Микрофизические условия обледенения проводов обуславливают также форму отложения [5], которая может быть охарактеризована соотношением большого a и малого c диаметров его c/a . Поэтому не исключена связь отношения c/a с коэффициентами K_{pd} .

В исследованных пунктах согласие в ходе изменений коэффициентов K_{pd} и c/a обнаруживается: c/a равно на Санглоке 0,5 Чормазаке 0,39, Анзобе 0,35.

При подтверждении такой связи в ряде других характерных районов и определении соответствующих количественных соотношений можно прогнозировать зависимость веса отложения от диаметра провода K_{pd} , располагая только данными наблюдений ГМО на гололедном станке.

Из сравнения полученных по нашим измерениям поправочных коэффициентов для учета влияния диаметра провода на толщину стенки гололеда K_{bd} и принятых в СН 318-65 видно, что если в некоторых пунктах (Санглок, Чормазак) даже максимальные их значения равны или ниже, чем в СН 318-65, то на Анзобе и Гушарах лишь средние значения K_{bd} находятся на уровне коэффициентов СН 318-65. Следовательно, для отдельных горных районов, где гололедно-изморозевые явления наблюдаются при достаточно сильном ветре или максимальные нагрузки создаются налипанием мокрого снега при слабом ветре, принятие коэффициентов K_{bd} по СН 318-65 не гарантирует надежности ЛЭП.

Влияние высоты подвеса провода на интенсивность гололедных отложений изучалось в следующих формах рельефа:

- на дне Варзобского ущелья (Гушары) до высоты 8 м (установка 1);

- на гребне хребта с круто обрывающимися склонами в районе пер. Чормазак до высоты 36 м (установка 2);

- на пологом северном склоне хребта в районе пер. Чормазак, с превышением гребня над основанием установки в 40 м, до высоты 19 м (установка 3), при этом установка различно затенена склоном относительно разных направлений ветра;

- на вершине одного из холмов горы Санглок до высоты 11 м (установка 4), при этом окружающие холмы ниже исследуемого на 50—100 м;

- на плоской седловине пер. Анзоб до высоты 11 м (установка 5);

- на крутом южном склоне пер. Анзоб, на 100—200 м ниже гребня хребта, до высоты 16 м (установка 6).

Диаметр исследуемых отрезков проводов 5—8 мм. На разных установках проведено от 8 до 40 измерений при весе отложений на высоте 2 м до 800 г/м. Частично веса отложений измерялись непосредственно, другие же вычислялись по размерам осадка и плотности, полученной на высоте 2 м. Материалы наблюдений статистически обрабатывались так же, как при изучении влияния диаметра провода.

Изменение параметров отложения в зависимости от высоты удвеса провода над поверхностью земли h оценивалось относительно их значений на высоте 2 м.

В данной статье приводятся результаты для веса P и большого диаметра a отложения.

По схеме, описанной при исследовании влияния диаметра провода, находились отношения

$$K_{ph} = \frac{P_h}{P_2} \quad \text{и} \quad K_{ha} = \frac{a_h}{a_2}.$$

Анализ результатов показал, что значения K_{ph} уменьшаются увеличением веса отложения, что также отмечено и теоретически обосновано в работе [9].

Таблица 3

Поправочные коэффициенты K_{ph} для пересчета среднего и максимального (в скобках) веса отложения на разных высотах над поверхностью земли

Станция	Установка	Высота, м							
		2	4	8	12	16	20	25	35
Гушары . .	1	1		0,98 (1,19)					
			1,17	1,25	1,24	1,23	1,21	1,2	1,2
Ормазак	2	1	(1,35)	(1,43)	(1,46)	(1,47)	(1,47)	(1,47)	(1,47)
			1,35	1,62	1,75	1,8			
Ормазак	3	1	(2,1)	(2,3)	(2,5)	(2,5)			
			1,2	1,3	1,33				
Санглок . .	4	1	(1,5)	(1,65)	(1,65)				
			1,25	1,37	1,4				
Анзоб . . .	5	1	(1,5)	(1,7)	(1,8)				
			1,1	1,2	1,27	1,33			
Анзоб . . .	6	1	(1,21)	(1,45)	(1,55)	(1,65)			
			1,2	1,6	2,0	2,4	2,7		3,1
Новолятигорск, ВНИИЭ	1								

В табл. 3 приведены значения K_{ph} для веса отложения на высоте 2 м, равного 500 г/м на установках 2—5 и 200 г/м на установках 1, 6.

Значения K_{ah} представлены в табл. 4 при $a_2 = 50$ мм на всех установках.

Как видно из таблиц 3 и 4, отложения мокрого снега в Гушарах на высоте 2—8 м не увеличиваются, что подтверждает результаты измерений в Грузии [14]. Для остальных пунктов, где наблюдались зернистая изморозь, гололед и смесь, характерен довольно

быстрый рост отложений до высоты 8 м, затем его замедлен и с высоты 12—14 м прекращение. Верхняя граница этого слоя практически неизменных отложений не обнаружена до 52 м, как показали дополнительно проведенные наблюдения на телевизионной мачте пер. Чормазак.

Результаты измерений автора существенно отличаются от полученных на стенде ВНИИЭ в Новоялтигорске [9]. Увеличение веса гололедных отложений с изменением высоты над поверхностью земли от 2 до 10 м, по данным автора, на 40% меньше, выше 10 м разница еще больше увеличивается.

Таблица

Поправочные коэффициенты K_{ah} для пересчета относительных среднего и максимального (в скобках) больших диаметров отложения на разных высотах над поверхностью земли

Станция	Установка	Высота, м							
		2	4	8	12	16	20	25	35
Гушары . .	1	1		0,94 (1,0)					
Чормазак	2	1	1,11 (1,3)	1,15 (1,38)	1,15 (1,45)	1,14 (1,5)	1,13 (1,5)	1,12 (1,5)	1,1 (1,5)
Чормазак	3	1	1,3 (1,7)	1,5 (2,1)	1,54 (2,2)	1,54 (2,2)			
Санглок . .	4	1	1,16 (1,32)	1,18 (1,45)	1,17 (1,45)				
Анзоб . . .	5	1	1,17 (1,5)	1,32 (1,55)	1,32 (1,6)				
Анзоб . . .	6	1	1,03 (1,1)	1,08 (1,18)	1,14 (1,26)	1,2 (1,32)			

Интенсивность нарастания отложения с увеличением высоты над поверхностью земли неодинакова в разных формах рельефа. Наибольшей интенсивность нарастания оказалась на невысоком пологом склоне (установка 3), в остальных формах рельефа она значительно ниже и различия коэффициентов K_{ah} незначительны.

Поскольку интенсивность нарастания гололедных отложений зависит от скорости ветра и влажности тумана, изменение ее с высотой должно определяться вертикальным распределением этих элементов.

Градиентные измерения влажности тумана на пер. Чормазак показали, что она увеличивается от поверхности земли лишь до высоты 4 м, далее до 36 м не изменяется.

Таким образом, есть основания предполагать, что выше 4 м профили гололедных отложений будут определяться вертикальным распределением скорости ветра.

Действительно, градиенты измерения скоростей ветра в этих же пунктах показали, что различия вертикальных профилей гололедных отложений находятся в качественном согласии с различиями профилей ветра. Так, на установке 3 оказалось наиболее сильное увеличение скорости ветра с высотой, что связано с неравномерным затенением установки невысоким пологим склоном. Прекращение возрастания скорости ветра также обнаруживается с высотой 12—14 м.

В горных районах, где гололедные отложения преимущественно образуются в закрывшем горы облаке, до высоты не менее 50 м основным фактором, формирующим их профили, является ветер. Поэтому приближенное представление о вертикальном профиле гололеда можно получить по градиентным измерениям скорости ветра гололедонесущих направлений, которые можно провести в теплый период года.

Зависимость веса гололедных отложений от угла встречи потока с потоком изучалась в основном на пер. Чормазак. Наблюдения проводились на проводах диаметром 5, 15 и 22 мм, установленных под различными углами к потоку через 22,5°. Для обеспечения постоянства углов встречи β при меняющемся по направлению ветре установка с проводами соединена с флюгаркой. Взаиморасположение проводов исключено разносом их на рядом стоящие установки.

Наибольшее число измерений (27) проведено на проводах диаметром 5 мм при диапазоне веса отложений от 30 до 330 г/м. Вес отложения на различно ориентированных проводах P_β оценивался относительно значения его на проводе, расположенном перпендикулярно потоку P_{90} . Значения $K_{P\beta} = \frac{P_\beta}{P_{90}}$, средние и максимальные, приведены в табл. 5 при значении $P_{90} = 300$ г/м.

Таблица 5

Поправочные коэффициенты $K_{P\beta}$ для пересчета
относительных среднего и максимального (в скобках)
веса отложения на проводах, различно ориентированных
к потоку

β	90	67,5	45	22,5	0
$K_{P\beta}$	1	0,93	0,88	0,76	0,42
		(1,06)	(1,14)	(1,04)	(0,55)

Оценка по средним значениям $K_{P\beta}$ показывает, что с уменьшением угла встречи вес отложения убывает. Однако максимальные значения $K_{P\beta}$ на уровне 95% обеспеченности свидетельствуют о существенном уменьшении веса отложений только на проводах, расположенных вдоль потока, что практически возможно лишь на отдельных участках узких ущелий [11].

На проводах других диаметров зависимости веса отложено от угла встречи с потоком получились аналогичными.

На пер. Анзоб и на горе Санглок влияние направления потока на вес отложения изучалось на жестко закрепленных проводах установленных широтно, меридионально и под углом 45° к ним. Из замеров по ним в каждом случае обледенения выбирались наибольшие и наименьшие значения. Отношения наименьших весов к наибольшим в среднем равны на Санглоке 0,78, на Анзобе 0,3. Наименьшие значения весов отложения на Санглоке чаще, а на Анзобе всегда наблюдались на меридиональном проводе. Таким образом, существенное снижение веса отложения наблюдается только на пер. Анзоб с относительно устойчивым направлением гололедонесущего потока в седловине хребта.

Анализировались также веса отложений на вертикальных и горизонтальных (широтном и меридиональном) проводах. В каждом случае отложения вес на вертикальном проводе сравнивался с наибольшим и наименьшим значениями его на горизонтальных. Значения средних отношений равны соответственно 1, и 1,64—по измерениям на Чормазаке, 1,0 и 1,48—на Санглоке и 1,0 и 1,43—на Анзобе. Таким образом, максимальные веса отложения на вертикальных и горизонтальных проводах почти не отличаются.

Этот вывод относится, конечно, к отложениям, которые образуются в тумане или облаках. В случае образования отложения из переохлажденного дождя или мороси, а также налипания мокрого снега соотношения будут другие.

Влияние микрорельефа на интенсивность гололедообразования изучалось в районах перевалов Чормазак и частично Анзоб. На пер. Чормазак наблюдения проводились в 9 пунктах на гололедных станках высотой 2 м. Пункты располагались по гребню и обоим склонам (середины и подножье) отрога, ориентированного с ЗЮ на ВСВ. Местность по гребню повышается в восточно-северном направлении. Южный склон крутой с понижением от гребня до промежуточной террасы на 120 м, северный — пологий, при понижении на 75 м также переходит в террасу.

При сравнении величин отложений за опорный выбран один из пунктов, расположенный на гребне. Остальные пункты удалены от опорного на 200—500 м, лишь один на 2,5 км.

Объем наблюдений в различных пунктах неодинаков и колеблется от 10 до 50 измерений. Диапазон охваченных измерениями размеров большого диаметра отложения от 20 до 120 мм в опорном пункте. Анализировались соотношения больших диаметров отложений в пунктах, поскольку вес измерялся примерно в половине случаев.

В среднем изменение размеров отложений по гребню несущественно, только с повышением на 65 м на удаленном пункте наблюдается увеличение на 20%. На обоих склонах, особенно на их середине, отложения меньше, чем на гребне, за исключением подножья южного склона, где они одинаковы с опорным пунктом.

а северном склоне уменьшение величины отложений более значительное — на 50%, так как в районе исследований преобладают юго-восточные и юго-западные ветры при гололеде.

При детальном анализе отдельных случаев гололедообразования обнаружилось, что соотношения отложений в пунктах значительно отличаются в зависимости от направления гололедонесущего потока, ибо разные пункты оказываются неодинаково затененными. В некоторых случаях эти существенные отличия от средних соотношений размеров отложений в разных формах микрорельефа связаны с особенностями синоптических процессов [4]. Обычно увеличение отложений происходит в местах, где создаются локальные усиления ветра за счет микрорельефа (подножие южного склона пер. Чормазак).

Существенных изменений температуры воздуха и влажности тумана в пределах превышений порядка 100 м ожидать не следует, особенно при закрытии гор мощным слоем облаков.

Сравнение соотношений гололедных отложений в пунктах наблюдений при различных направлениях гололедонесущего потока соотношениями скоростей ветра этих же направлений показывает хорошее их качественное согласие. Подтверждают сказанное и наблюдения на пер. Анзоб. Они проводились в продуваемой седловине хребта и на такой же высоте в 500 м восточнее, где южные гололедонесущие потоки экранируются высоким (100—200 м) крутым склоном. Среднее отношение больших диаметров отложения на склоне и перевале получилось 0,5. Соотношение скоростей ветра в этих же пунктах равно 0,7.

Таким образом, в связи с большим разнообразием форм микрорельефа в горных условиях при оценке гололедоопасности района проектирования ЛЭП необходимо проводить анемометрические съемки, пока не будут выработаны оптимальные коэффициенты для учета рельефа местности.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о необходимости уточнения некоторых рекомендаций СН 318-65 для горных районов Средней Азии. Особенно следует подчеркнуть необходимость расширения подобных исследований в горной местности с тем, чтобы получить оптимальные критерии учета влияния разнообразных форм микрорельефа при расчете гололедных нагрузок на провода и опоры ЛЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базилевич В. В. Влияние микроструктуры тумана на обледенение проводов.—«Труды ГГО», 1947, вып. 3(65), с. 34—41.
2. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М. Госэнергоиздат, 1960. 208 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)

3. Волков А. С., Трестман А. Г. Экспериментальная база Зардоллю.—«Труды ТаджНИОЭ», 1971, вып. 3, с. 180—195.
4. Волков А. С., Савченко Л. А. Синоптические условия обледенения проводов по проектируемой трассе ЛЭП Нурек — Ташкент.—«Труды ТаджНИОЭ», 1971, вып. 3, с. 165—170.
5. Дмитриев А. А. К вопросу о форме поперечного сечения отложения и капельно-жидкого переохлажденного тумана.—«Труды ГГО», 1947, вып. 3(65), с. 68—69.
6. Заварина М. В., Глухов В. Г. К определению максимальных гололедных нагрузок на высотные сооружения.—«Метеорология и гидрология» 1970, № 7, с. 45—51.
7. Клинов Ф. Я. Изморозь и гололед в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1970, 67 с.
8. Никифоров Е. П. Распределение веса гололедообразования на проводах различного диаметра.—«Труды ВНИИЭ», 1961, вып. 11, с. 274—288.
9. Никифоров Е. П. Влияние высоты подвеса провода на вес отложения гололеда.—«Электрические станции», 1962, № 4, с. 62—66.
10. Руднева А. В., Бассарская Т. А. Учет рельефа местности при расчете гололедных нагрузок.—«Труды ГГО», 1967, вып. 210, с. 47—56.
11. Савченко Л. А. Зависимость интенсивности обледенения от угла встречи потока с проводом в горных условиях.—«Труды ТаджНИОЭ», 1971, вып. 3, с. 215—224.
12. Указания по определению гололедных нагрузок. СН 318-65. М., Госстройиздат, 1966. 19 с.
13. Хргиан А. Х. Некоторые данные о микроструктуре облаков.—«Труды ЦАО», 1952, вып. 7, с. 50—55.
14. Чиракадзе Г. И. Схема гололедного районирования Закавказья.—«Труды ТбилНИГМИ», 1959, вып. 4, с. 124—152.

ПЛОТНОСТЬ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

Для расчета гололедных нагрузок на провода воздушных линий и элементы сооружений необходимы сведения о плотности гололедно-изморозевых отложений (γ), так как размеры отложений всегда измеряются, а вес их не всегда измерялся.

При составлении карты гололедного районирования территории СССР для СНиП [3], расчет веса отложений производился по средней плотности (объемному весу).

Средние значения для различных видов отложений принимались одинаковыми для всей территории СССР: для гололеда — 75 г/см^3 , смеси и мокрого снега — $0,2$, зернистой изморози — 1 , кристаллической изморози — $0,05 \text{ г/см}^3$.

В работах [1, 2, 4] показано, что плотность гололедно-изморозевых отложений существенно изменяется в зависимости от физико-географических условий и местоположения гидрометеорологической станции (ГМС).

В данной работе устанавливается зависимость плотности гололедно-изморозевых отложений (γ) от физико-географических условий. Для этой цели использованы материалы инструментальных наблюдений 178 ГМС, расположенных на территории Украины имеющих 25-летний ряд наблюдений над гололедно-изморозевыми явлениями.

Детальное изучение характера рельефа местности, произведенное ранее [6], позволяет выделить на территории Украины семь основных разновидностей или типов рельефа, отличающихся интенсивностью гололедообразования. Выделение этих типов рельефа производилось с учетом относительной высоты местности, степени ее защищенности по отношению к преобладающим при отложении гололеда и изморози ветрам, а также экспозиции того склона, на котором находится данная ГМС.

Тип рельефа I. Узкие, большей частью меридионально ориентированные долины рек, защищенные с запада и востока высокими возвышенностями, превышающими высоту долины на $50\text{—}100 \text{ м}$ и более. ГМС расположена в долине реки и превышает ее уровень не более чем на 10 м .

Тип рельефа II. Холмистая пересеченная местность. Сравнительно узкие, небольшие долины равнинных или горных рек, защи-

щенные с запада и востока возвышенностями (или высокими берегами), превышающими уровень долины на 20—40 м.

Тип рельефа III. Равнина, степь или широкая долина реки без заметного наклона и с довольно пологими берегами. Местоположение ГМС не доминирует над окружающей местностью и превышает ее уровень не более чем на 10 м.

Тип рельефа IV. Хорошо выраженные, открытые с востока южные или северные склоны возвышенностей и водораздельных плато. Местоположение ГМС превышает уровень прилегающей долины на 10 м или более.

Тип рельефа V. Центральная часть небольших водораздельных плато, наветренные (восточные) довольно пологие склоны небольших возвышенностей или речных долин, как правило, открыты с востока. Высота пункта превышает уровень прилегающей долины на 10—25 м.

Тип рельефа VI. Вершины холмов, центральные части водораздельных, довольно ровных плато, превышающие уровень прилегающих долин на 25—50 м.

Тип рельефа VII. Сильнопересеченная местность. ГМС расположены на вершинах холмов, горных перевалах, открытых с востока и запада, превышающих окружающую местность на 50 м и более.

Для каждого из этих типов подсчитаны плотности гололедно-изморозевых отложений.

Расчеты γ выполнялись с помощью номограммы, построенной М. В. Завариной [5] по формуле:

$$\gamma = \frac{P}{78(ac - d^2)} \text{ г/см}^3,$$

где P — вес гололедно-изморозевого отложения, a и c — его диаметры, d — диаметр провода гололедного станка.

По оси абсцисс этой номограммы отложены значения $(ac - d^2)$ (в см^2), по оси ординат — значения веса отложения P , г (так же, как и другие в логарифмической шкале). По наклонным линиям определялась плотность отложения.

Для того чтобы избежать ошибок при определении плотности отложений, связанных с неточностью определения их размеров и веса при длительных гололедных периодах, использовали только синхронные измерения веса и диаметров отложения. Если вес и размеры отложений на сменном проводе измерялись неоднократно, а потом суммировались, то это приводило к неправильной оценке действительного отложения, наблюдавшегося на постоянном (контрольном) проводе и к завышению плотности. Такие случаи из расчетов исключались.

В табл. 1 приведены средние и экстремальные значения плотности гололедно-изморозевых отложений для различных типов рельефа на территории Украины. Из таблицы видно, что средние значения плотности гололеда составляют $0,65 \text{ г/см}^3$. Наименьшие

Плотность (г/см³) гололедно-изморозевых отложений в различных типах рельефа

Тип рельефа	Число станций	Гололед				Смесь				Мокрый снег				Зернистая изморозь				Кристаллическая изморозь			
		$\bar{\gamma}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\min}$	n	$\bar{\gamma}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\min}$	n	$\bar{\gamma}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\min}$	n	$\bar{\gamma}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\min}$	n	$\bar{\gamma}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\min}$	n
I	22	0,60	0,9	0,3	20	0,25	0,9	0,10	16	0,14	0,3	0,05	32	0,14	0,4	0,05	18	0,05	0,1	0,02	20
II	32	0,61	0,9	0,3	61	0,24	0,75	0,05	55	0,25	0,8	0,05	50	0,16	0,6	0,05	48	0,05	0,1	0,02	52
III	37	0,65	0,9	0,2	50	0,24	0,9	0,10	50	0,3	0,7	0,05	44	0,1	0,7	0,05	50	0,05	0,1	0,05	50
IV	15	0,50	0,9	0,1	50	0,30	0,9	0,05	48	0,23	0,6	0,05	19	0,12	0,3	0,05	24	0,05	0,1	0,02	40
V	42	0,65	0,9	0,3	60	0,28	0,8	0,05	60	0,25	0,8	0,1	50	0,17	0,5	0,05	60	0,05	0,2	0,02	60
VI	17	0,65	0,9	0,3	54	0,29	0,9	0,05	50	0,3	0,9	0,05	25	0,18	0,7	0,05	33	0,05	0,1	0,02	41
VII	13	0,65	0,9	0,2	57	0,30	0,8	0,05	60	0,3	0,5	0,10	5	0,17	0,7	0,05	51	0,05	0,5	0,06	50

значение $\gamma = 0,5 \text{ г/см}^3$ в типе рельефа IV (защищенные с западных или северных склоны возвышенностей и водораздельные плато).

Типы рельефа V—VII характеризуются одинаковыми значениями γ гололедно-изморозевых отложений. Сюда включены ГМ, которые по местоположению выше окружающей местности на 10 и более.

Плотность смеси в типах рельефа I—III равна 0,24—0,25, а

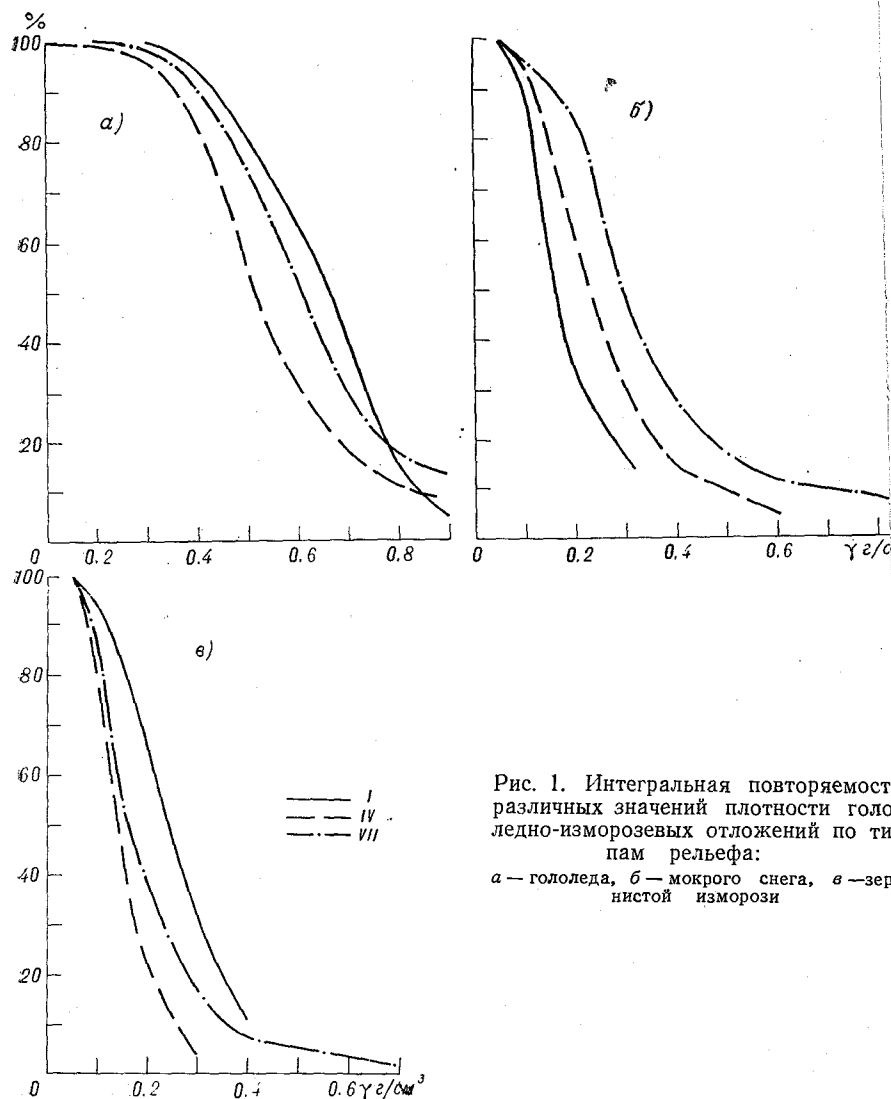


Рис. 1. Интегральная повторяемость различных значений плотности гололедно-изморозевых отложений по типам рельефа:

а — гололеда, б — мокрого снега, в — зернистой изморози

IV—VII—0,28—0,30 г/см³. Значения плотности мокрого снега изменяются от 0,14 г/см³ в типе I до 0,3 в типах VI и VII. Плотность зернистой изморози в среднем составляет 1,5 г/см³.

Интересно отметить, что плотность кристаллической изморози остается неизменной по величине во всех типах рельефа и равна 0,05 г/см³. Это указывает на то, что на плотность кристаллической изморози формы рельефа влияния не оказывают.

Значения плотности отложений повышаются с увеличением типа рельефа (V—VII). Так как к этим типам отнесены ГМС, находящиеся на возвышенных местах и открытые ветрам, преобладающим при гололедно-изморозевых отложениях, то, очевидно, это и способствует уплотнению отложений.

Кроме средних и экстремальных значений, рассчитаны интегральные повторяемости различных значений плотности. Оказалось, что интегральная повторяемость значений плотности смешанных отложений сходна с интегральной повторяемостью значений плотности мокрого снега, поэтому на рис. 1 приводится в качестве примера распределение плотности гололеда и изморози по трем наиболее характерным типам рельефа I, IV и VII, а плотности мокрого снега по типам рельефа I, IV и VI, так как в типе рельефа VII за 25 лет зарегистрировано всего 5 случаев отложений мокрого снега.

Из рис. 1 видно, что распределение значений плотностей отложений изменяется в зависимости от типа рельефа. При расчетах веса отложений по размерам и плотности необходимо принимать во внимание не только средние значения плотности, но и участки интегральной кривой справа и слева от средней плотности.

Полученные уточненные значения плотностей гололедно-изморозевых отложений должны учитываться при расчетах гололедных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоус И. М. О расчете максимальных стенок гололеда на проводах линий электропередач в горных районах Тянь-Шаня.—«Труды ГГО», 1969, вып. 246, с. 31—40.
2. Белоус И. М. Влияние физико-географических и метеорологических условий на плотность гололедно-изморозевых отложений.—«Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 45—51.
3. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.). Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Т. 1. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи в СССР. М., Госэнергоиздат, 1960. 208 с. (Труды ВНИИЭ. Вып. 10.)
4. Заварина М. В. Удельный вес гололедно-изморозевых отложений.—«Труды ГГО», 1970, вып. 265, с. 30—45.
5. Заварина М. В., Глухов В. Г. К методике расчета гололедных и гололедно-ветровых нагрузок на провода воздушных линий.—Инфор. письмо ГУГМС № 19. М., Гидрометеиздат, 1972, с. 120—130.
6. Раевский А. Н. Влияние рельефа на распределение гололедно-изморозевых отложений.—«Труды ОГМИ», 1961, вып. 23, с. 3—11.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

В настоящее время механический расчет проводов контактной сети и ЛЭП производится на действие статической ветровой нагрузки, которая определяется исходя из максимальной скорости ветра возможной раз в 5 или 10 лет. Указанный метод расчета не учитывает действительной картины поведения проводов в турбулентном воздушном потоке. Для перехода к динамическому расчету проводов необходимо исследовать характер ветровой нагрузки на высоте 8—15 м от подстилающей поверхности как пространственно-временного процесса. Этому были посвящены эксперименты на полигоне контактной сети в районе г. Новороссийска. Место проведения экспериментов было определено тем, что в данном районе часто дуют сильные ветры северо-восточного направления.

В полете длиной 80 м на высоте 10 м от земли через каждые 20 м были установлены пять датчиков анемографа М-27-С для регистрации горизонтальных пульсаций скорости ветра. Пролет был ориентирован перпендикулярно действию средней скорости ветра. Запись производилась непрерывно в течение 2 мин в вечерние часы. За время экспериментов зарегистрирован максимальный порыв ветра, равный 30 м/с. Полученные осциллограммы обрабатывались на графопреобразователе с дальнейшим обсчетом на ЭВМ БЭСМ-4.

Рассчитанные для каждой из пяти точек временные корреляционные функции пульсаций скорости ветра имеют аналогичный характер (рис. 1). Осредненные по нескольким реализациям они имеют вид плавно затухающей кривой. Значение нормированного на σ^2 коэффициента корреляции при $\tau=4,0$ с не превышает 0,1.

С достаточной точностью экспериментальные кривые аппроксимируются показательной функцией вида

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-a|\tau|}. \quad (1)$$

По данным экспериментов, значение показателя степени a для различных точек полета находится в пределах 0,6—0,7 при средней скорости ветра $\bar{v}=12,2$ м/с и высоте над уровнем земли $z=10$ м. Для технических приложений более удобна аппроксимация на основе теории изотропной турбулентности с переходом от структурных функций к корреляционным. В этом случае характер корреляционной функции может быть определен заданием физиче-

их параметров подстилающей поверхности и воздушного потока, с заданием таких величин, как шероховатость подстилающей поверхности z_0 , высота над землей z и средняя скорость ветра $\bar{v}$. Тогда

$$R(\tau) = \sigma^2 - 1/2 c_1 (\bar{\varepsilon} \bar{v})^{2/3} \tau^{2/3}, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}$ — средняя скорость диссипации энергии, равная при безразличной стратификации

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\kappa^2 \sigma^3}{z}, \quad (3)$$

где κ — постоянная Кармана, равная 0,4, σ — среднеквадратичное отклонение пульсаций скорости ветра, равное

$$\sigma = \frac{\bar{v}}{\ln \frac{z}{z_0}}. \quad (4)$$

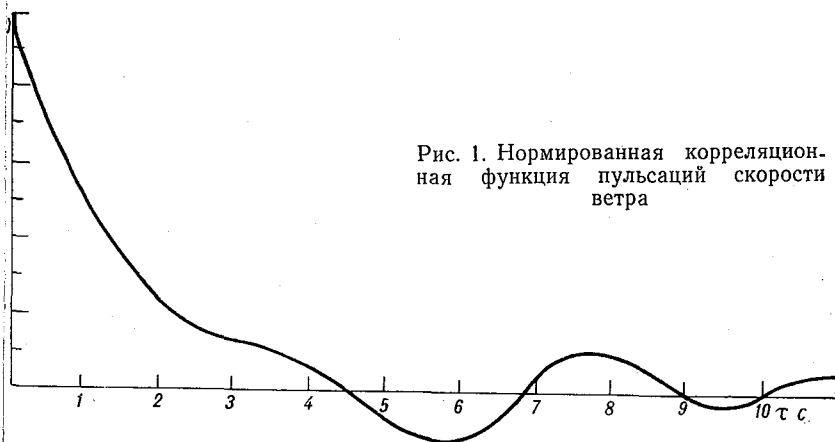


Рис. 1. Нормированная корреляционная функция пульсаций скорости ветра

С целью изучения пространственных характеристик статистического поля пульсаций скорости ветра были рассчитаны взаимные корреляционные функции пульсаций в двух точках, расположенных по горизонтали перпендикулярно к направлению среднего течения, для расстояний между точками Δr , равных 20, 40, 60, 80 м (рис. 2). Указанные функции можно рассматривать как пространственно-временные функции случайного процесса пульсаций скорости ветра. При $\tau=0$ будем иметь значения пространственного коэффициента корреляции для различных Δr . Затухание пространственной корреляционной функции происходит также по экспоненте. При расстоянии между точками Δr , равном 20 м, значение пространственной корреляции незначительно. В то же время для того же масштаба возмущений в продольном направлении

коэффициент корреляции равен 0,3. Эксперименты показывают, что масштабы пульсаций в продольном направлении больше, чем в поперечном, т. е. турбулентные вихри в приземном слое имеют вытянутую вдоль средней скорости форму.

По экспериментальным записям пульсаций продольной составляющей скорости ветра были рассчитаны функции спектральной

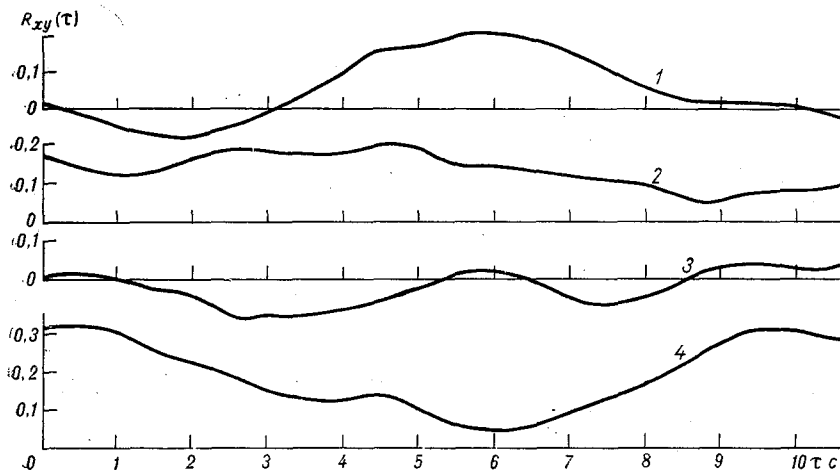


Рис. 2. Нормированные взаимные корреляционные функции для различных расстояний Δr

1 — для $\Delta r = 20$ м, 2 — для $\Delta r = 40$ м, 3 — для $\Delta r = 60$ м, 4 — для $\Delta r = 80$ м

плотности. Для всех точек пролета характер распределения энергии пульсаций по частотам одинаков (рис. 3).

Кривая спектра строилась в бидоарифмических координатах. При таком изображении на участках, где $S(\omega)$ пропорционален степени $\omega^{-5/3}$, спектр изображается прямой, наклон которой определяет показатель степени. Кривая имеет два характерных участка. На частотах $0 < \omega \leq 0,25$ спектр пропорционален нулевой степени частоты. Этот участок спектра образуют среднее течение и пульсации очень большого масштаба. При $\omega > 0,25$ 1/с спектр может быть аппроксимирован выражением, пропорциональным $\omega^{-5/3}$, что, согласно теории изотропной турбулентности, соответствует инерционному интервалу. Следовательно, можно считать, что при $\bar{v} = 12,2$ м/с и $z = 10$ м для круговых частот $0,25 < \omega < 15,7$ турбулентный поток воздуха изотропный и однородный.

При исследовании воздействия случайной ветровой нагрузки на контактную подвеску важен вопрос соотношения характерных масштабов турбулентного потока и длин пролетов контактной системы. Для указанных выше значений средней скорости $\bar{v}$ и частоты внешнего масштаб турбулентности L_0 (в м) равен

$$L_0 = \frac{2\pi \bar{v}}{\omega} = \frac{6,28 \cdot 12,2}{0,25} = 307 \text{ м.}$$

Масштаб L_0 значительно больше расстояния до земли. Для условий нашего эксперимента $L_0 \approx 30 z$, где z — расстояние до подстилающей поверхности. Точно такое же соотношение получено Л. Зубковским [1] для высоты 4 м. Если воспользоваться отношением продольного и поперечного масштабов турбулентности,

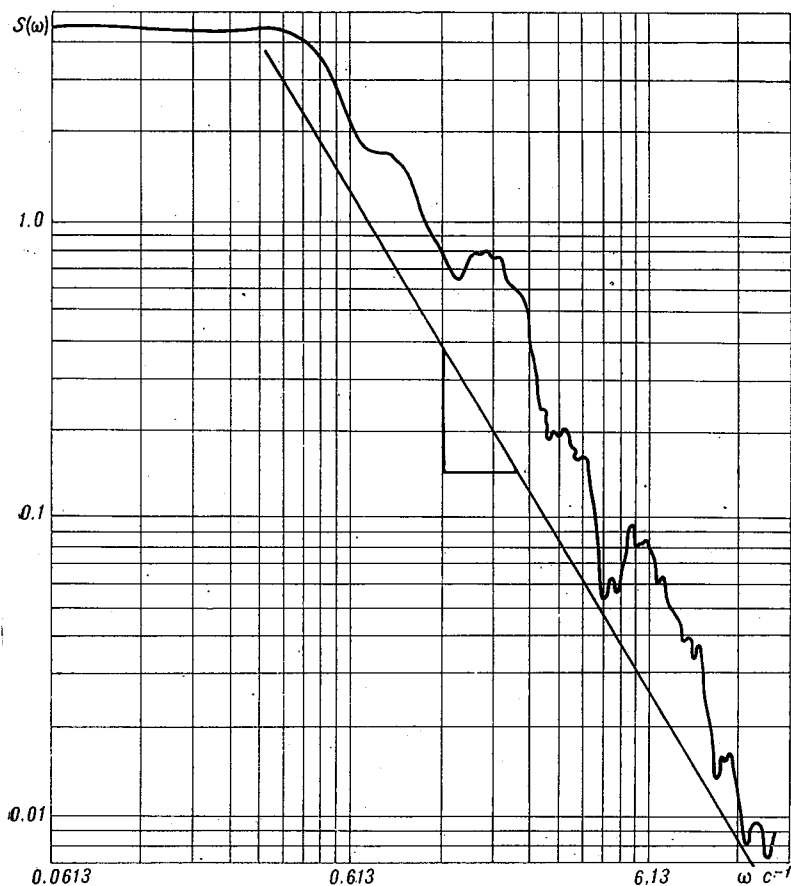


Рис. 3. Экспериментальная функция спектральной плотности пульсаций скорости ветра

авным 2π [4], то получим для внешнего масштаба турбулентности в поперечном направлении, т. е. вдоль пролета контактной сети, величину равную, примерно, 50 м. Из этого следует, что пролеты контактной сети находятся полностью в однородном и изотропном потоке воздуха.

Относительно границы инерционного интервала со стороны вязой подобласти можно лишь сказать, что она лежит на частотах,

больших чем 15,7 1/с, т. е. «закон —5/3» справедлив для масштабов пульсаций меньших, чем

$$L = \frac{6,28 \cdot 12,2}{15,7} = 5 \text{ м.}$$

Возмущения меньшего размера на провода контактной существенно влияния не оказывают, так как они «отфильтровываются» динамической системой.

Следовательно, при исследовании колебаний проводов в турбулентном воздушном потоке можно воспользоваться для аппроксимации спектральной функции пульсаций скорости ветра в соответствии с теорией изотропной турбулентности выражением

$$S(\omega) = c_1 \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{v}} \right)^{2/3} \omega^{-5/3},$$

где c_1 — универсальная постоянная, равная по Колмогорову

$$c_1 = 1/4 \left(-\frac{4}{5S} \right)^{2/3} \approx 0,215 (-S)^{-2/3},$$

$\bar{\epsilon}$ — средняя скорость диссипации энергии, $\text{см}^2/\text{с}^3$, S — асимметрия распределения разности скоростей в близких точках, $\bar{v}$ — средняя скорость потока, м/с.

Таблица 1

	Масштаб пульсаций, м				
	1,4	2,8	5,6	8,5	11,3
Коэффициент асимметрии	0,59	0,33	0,41	0,37	0,33
экссесса	26	21,3	2,56	1,31	0,98
корреляции (продольный)	0,93	0,88	0,76	0,66	0,58

По результатам экспериментов были рассчитаны все входящие в (6) величины.

В табл. 1 приведены значения асимметрии для разности скоростей ветра в двух точках, разнесенных по направлению среднего ветра на различные расстояния Δr . Результаты получены осреднением измерений в различных точках пролета, т. е. охватывают расстояние, равное 80 м по фронту турбулентного потока.

Подсчитанное по этим данным среднее значение асимметрии и его среднее квадратическое отклонение равно $S_{\text{ср}} = 0,401 \pm 0,0$. Подставив значение $S_{\text{ср}}$ в (2), можно найти универсальную постоянную

$$c_1 = 1/4 \left(-\frac{4}{5 \cdot 0,401} \right)^{2/3} = 0,4.$$

В настоящее время наилучшей оценкой c_1 является оценка $=0,45 \div 0,50$. Подобные значения c_1 получены по измерениям асимметрии в приземном слое атмосферы на высоте до 4 м [3]. На высоте 10 м над уровнем земли результаты измерения универсальной постоянной c_1 приводятся, по-видимому, впервые. Следовательно, на высоте контактной подвески можно также считать коэффициент c_1 равным $0,45 \div 0,50$. Некоторое отличие приведенного значения c_1 объясняется большими расстояниями Δr при распределении асимметрии.

Для определения спектра пульсаций скорости в инерционном интервале (6) при известном значении c_1 необходимо знать среднюю диссипацию энергии $\bar{\epsilon}$. Ее значение может быть получено из уравнения (6) для инерционного интервала осредненного спектра. Рассчитанное по данным эксперимента значение $\bar{\epsilon}$ равно $=0,389 \text{ м}^2/\text{с}^3 = 3890 \text{ см}^2/\text{с}^3$. Это значение хорошо совпадает с известными [4].

Зная c_1 и диссипацию $\bar{\epsilon}$, можно найти ошибку аппроксимации эмпирического спектра в соответствии с теорией изотропной турбулентности.

Известно, что площадь под кривой функции спектральной плотности $S(\omega)$ равна дисперсии. Рассчитанная по записи в одной из точек пролета дисперсия для нашего эксперимента равнялась $12 \text{ см}^2/\text{с}^3$. Подставив в (6) найденные значения средней скорости диссипации энергии $\bar{\epsilon}$ универсальной постоянной c_1 и проинтегрировав его в границах инерционного интервала, получим

$$0,25 \cdot 4,4 + \int_{0,25}^{15,7} c_1 (\bar{\epsilon} \bar{v})^{2/3} \omega^{-5/3} d\omega = 5,07. \quad (8)$$

Следовательно, аппроксимация эмпирического спектра законом, пропорциональным $\omega^{-5/3}$, дает ошибку в 0,98%, что приемлемо для технических приложений.

Для более наглядного представления процесса распределения энергии пульсаций по частотам часто кривую функцию спектральной плотности строят в осях $\omega S(\omega)$ и $\lg \omega$. В таком виде спектр дает возможность наглядно оценить вклад различных частот в общий поток количества движения. Максимум энергии пульсаций приходится на диапазон частот $0,25 < \omega < 4,0$ с пиком на частоте $=0,49 \text{ 1/с}$ ($l=157 \text{ м}$). Эти частоты соответствуют низкочастотной области инерционного интервала. Подтверждается положение о том, что низкочастотные пульсации несут основную часть энергии турбулентного потока. По измерениям С. Л. Зубковского [1], для высоты 4 м при безразличной стратификации размер вихрей, несущих основную часть энергии, равен $l=160 \text{ м}$.

Легко подсчитать долю энергии, приходящуюся на инерционный интервал спектра ($0,25 \leq \omega \leq 15,7$). Это можно сделать как по кривой спектра, построенной в осях $\omega S(\omega)$ и $\lg \omega$, так и интегрированием выражения (6) в пределах инерционного интервала. Оба

способа показывают, что на инерционный интервал приходится 78% энергии пульсаций скорости ветра.

Турбулентное движение характеризуется наличием беспорядочных пульсаций поля скорости. Для описания свойств случайного поля необходимо задание распределения вероятностей для значений скорости в различных точках пространства — времени. Однако определение распределения вероятностей по эмпирическим данным является задачей трудоемкой и обычно ограничивается исследованием простейших характеристик, из которых самыми важными являются моменты. Для случайного поля, подчиняющегося нормальному закону распределения, можно ограничиться только двумя первыми моментами. Поэтому эта модель атмосферной турбулентности особенно предпочтительна, и она принята большинством авторов. Имеется и экспериментальное подтверждение этой модели, выполненное в аэродинамической трубе Стюартом и Гурвичем на высоте 1,8 м в атмосфере. Из этих работ следует, что распределение вероятностей пульсаций скорости турбулентного потока, между которыми слаба корреляция, в фиксированной точке близко к нормальному.

Аналогично опытам Стюарта и Гурвича были рассчитаны коэффициенты асимметрии (S) и эксцесса (E) для разности скоростей ветра в двух точках, разнесенных вдоль среднего потока на расстояние Δr (см. табл. 1). С увеличением Δr и соответственно уменьшением коэффициента корреляции коэффициенты асимметрии и эксцесса эмпирического распределения уменьшаются.

Более подробный анализ был сделан для мгновенных значений пульсаций в одной из точек пролета. Эмпирическое распределение мгновенных значений пульсаций скорости ветра выравнивалось с помощью нормального, логарифмически нормального распределений и распределения Релея. Степень случайного расхождения оценивалась по критериям согласия Пирсона [$P(\chi^2)$] и Колмогорова [$1-K(\lambda)$]. Исследовались пульсации различного масштаба от 1 до 12 м. Эти масштабы относятся к крайней правой части инерционного интервала, прилегающего к интервалу диссипации.

Из спектра пульсаций следует, что на масштабы 1–12 м ($6,4 < \omega < 15,7$) приходится примерно 5% энергии. Основная часть энергии сосредоточена на частотах $0,25 < \omega < 4,0$ ($307 \text{ м} < l < 25 \text{ м}$). Поэтому было исследовано влияние на характер распределения масштаба пульсаций при его изменении от 1 до 12 м и экстраполирована эта зависимость на большие масштабы. Кроме того, была проанализирована зависимость критерия согласия от объема ряда.

Полученные статистические характеристики (табл. 2) свидетельствуют, что для нормального закона распределения с увеличением масштаба пульсаций расхождение между теоретическим и эмпирическим рядами уменьшается. Два других исследуемых теоретических распределения были отвергнуты, так как большие значения χ^2 при соответствующих степенях свободы означают, что наблюдаемые данные противоречат заданным моделям.

Интересна зависимость значения χ^2 от объема статистического ряда пульсаций скорости ветра. Мера расхождения χ^2 вычисляется по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (9)$$

m_i — число значений в i -том интервале, n — число элементов, p_i — вероятность попадания в i -тый интервал, k — число интервалов.

Таблица 2

Объем выбор- ки	Статистический показатель						Число степен- ней сво- боды	$1-K(\lambda)$
	$\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$	$\sigma \pm \sigma_{\sigma}$	$S \pm \sigma_S$	$E \pm \sigma_E$	$P(\chi^2)$			
1100	12,2±0,18	3,20±0,13	0,11±0,07	-0,37±0,15	0	16	0	
550	12,2±0,25	3,15±0,18	0,12±0,11	-0,36±0,21	0,01	13	0,002	
275	12,2±0,35	3,10±0,25	0,17±0,15	-0,38±0,30	0,20	13	0,14	
183	12,2±0,42	3,00±0,35	0,19±0,18	-0,33±0,36	0,35	11	0,11	
137	12,2±0,46	2,90±0,42	0,23±0,21	-0,33±0,42	0,60	11	0,864	
110	12,2±0,51	2,80±0,46	0,29±0,23	-0,32±0,47	0,62	10	0,985	

Значение χ^2 зависит только от числа степеней свободы k . Общее число элементов ряда n на распределение χ^2 не должно влиять. Видно, что с ростом числа наблюдений n пропорционально $\sqrt{n}$ увеличивается разность в числителе уравнения (9) и χ^2 остается неизменным. Это справедливо для наблюдаемых рядов распределения максимально приближающихся к нормальному при увеличении n . Статистический ряд микропульсаций скорости ветра противоречит этому условию. В самой его структуре заложено противоречие с центральной предельной теоремой о независимости и линейной связанности факторов, образующих ряд. Поэтому по достижении некоторого уровня дальнейшее сглаживание наблюдаемого ряда мелкомасштабных пульсаций с ростом n не происходит и значение $P(\chi^2)$ с увеличением объема выборки уменьшается. Для пульсаций масштаба $l=1,2$ м была рассчитана мера расхождения при объемах выборки, равных 1100 и 110 элементам. Значения $P(\chi^2)$ получились равными соответственно 0,0011 и 0,0076. В то же время для масштаба 12 м при $n=110$ и том же количестве интервалов значение $P(\chi^2)$ равно 0,62. Зависимость от n распределения пульсаций большого масштаба не существенна.

Следовательно, исследование распределения вероятностей пульсаций различного масштаба показало, что гипотеза выравнивания эмпирического ряда пульсаций нормальным законом может быть принята для масштабов более 10 м с большой вероятностью.

Итак, экспериментальное исследование характера ветровой нагрузки, действующей на провода контактной сети, позволяет сделать следующие выводы.

1. Ветровая нагрузка должна рассматриваться как пространственно-временной случайный процесс.

2. Значение универсальной постоянной c_1 на высоте 10 м может быть принято равным $0,45 \div 0,50$, т. е. величине, определенной для высоты до 4 м.

3. Для аппроксимации корреляционной функции и спектральной плотности пульсаций скорости ветра могут быть использованы уравнения теории изотропной турбулентности, т. е. указанная теория подтверждается и на высоте 10 м над подстилающей поверхностью.

4. Пульсации скорости ветра масштабом более 10 м подчиняются нормальному закону распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубковский С. Л. Частотные спектры пульсаций горизонтальной компоненты скорости ветра в приземном слое воздуха.—«Изв. АН СССР. Геофиз.», 1962, № 10, с. 1425—1433.
2. Иванов В. И. Диссипация турбулентной энергии в атмосфере.—«Изв. АН СССР, сер. геофиз.», 1962, № 9, с. 1261—1268.
3. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 2. М., «Наука», 1967.
4. Шурыгин В. П. Статистический метод расчета конструкций контактной сети на действие случайных ветровых нагрузок.—«Труды ЦНИИС», 1967, вып. 38, с. 4—16.

КЛИМАТОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА

В течение многих лет на метеорологических станциях (ГМС) Советского Союза скорость ветра определялась по флюгеру Вильда.

Этот прибор технически прост, удобен в эксплуатации и позволяет определять скорость ветра с точностью, удовлетворяющей многих потребителей. Результаты наблюдений, проведенных с помощью этого прибора, использованы для многочисленных метеорологических исследований и климатологических обобщений. Однако за последние годы требования к точности наблюдений над скоростью ветра значительно повысились и при решении ряда практических вопросов точность определения скорости ветра помощью флюгера Вильда оказывается уже недостаточной. Одним из таких вопросов, чрезвычайно важных для строителей, является расчет ветровых нагрузок на сооружения. Действительно, ветровая нагрузка пропорциональна квадрату скорости ветра, для ее определения используются большие, редко наблюдаемые (исчетные) скорости и максимальные порывы ветра. Следовательно, для этой цели требуется возможно более точное определение скоростей сильных ветров, осредненных по определенному интервалу времени, а также порывов при больших скоростях ветра. Именно для определения больших скоростей ветра, в дополнение к флюгеру с легкой доской, на ГМС СССР в 30-х годах были установлены флюгеры с тяжелой доской. С этой же целью и в связи с автоматизацией наблюдений на ГМС за последние 10—15 лет введен ряд дистанционных и автоматических ветроизмерительных приборов (М-12, М-27, М-48, М-63, АРМЭ и др.).

Несмотря на то, что некоторые типы этих приборов изготовлены большими опытными партиями, они работали на ГМС, а отобранные сохранившиеся экземпляры их используются и в настоящее время.

Прибор М-63 был подвергнут модернизации и в настоящее время наряду с М-12 является основным сетевым прибором. Он устанавливается на ГМС взамен флюгеров. Поэтому оценка точности этих приборов, как и флюгера, представляет практический интерес.

В период внедрения приборов М-63 и М-12 выполнен ряд специальных исследований с целью определения их точности. Многи-

ми ГМС проводились одновременные измерения ветра по этим приборам и по флюгеру. Полученные материалы были обработаны С. А. Смирновым [8, 9], который пришел к выводу, что средние сезонные характеристики ветра, полученные в результате обработки наблюдений, проведенных указанными приборами и по флюгеру, не отличаются друг от друга.

Однако в работах [8, 9] рассматривались средние климатические характеристики ветрового режима, величина которых в основном, определяется часто наблюдаемыми, но сравнительно небольшими скоростями ветра. В [1—3, 5] показано, что все приборы скорости ветра до 12—13 м/с измеряются, примерно с одинаковой точностью и поэтому полученные по ним климатические средние не должны существенно отличаться друг от друга.

В этих же работах [1—3, 5] обращалось внимание на то, при сильных ветрах скорости ветра, измеренные по флюгеру, правило, больше скоростей, измеренных другими приборами. Подтверждается, правда, весьма ограниченными данными, приведенными и в работе [8]. Например, за весь период сравнительных наблюдений, проведенных на островной ст. Вильсанди (Эстония) скорости более 15 м/с анемометром М-12 отмечены 30 раз, а флюгеру — 46, на ст. Ристна 0 и 14 раз соответственно.

Следовательно, климатические характеристики сильных ветров, полученные по наблюдениям разными приборами, отличаются друг от друга довольно существенно.

Если в рассматриваемом пункте скорости ветра более 15 м/с наблюдаются часто, то и средние скорости ветра, полученные различными способами за месяцы преобладания сильных ветров, также будут отличаться друг от друга. С учетом этих обстоятельств в данной статье более тщательно проанализированы данные сравнительных наблюдений при сильных ветрах.

По материалам наблюдений, проводившихся параллельно разными приборами в нескольких ГМО УГМС, авторами были числены повторяемости различных отклонений между скоростями ветра, измеренными по флюгеру и другими приборами для случаев, когда скорости ветра по флюгеру были более 14 и 16 м/с. В качестве примера на рис. 1 приводятся кривые распределения этих повторяемостей, рассчитанные по наблюдениям эстонских станций: Ристна, Тарту, Хельтермая, Вяйке-Маарья, Тийрик. На этих станциях при скорости ветра от 14 до 28 м/с было проведено 375 наблюдений, при скорости от 16 до 28 м/с — 131 наблюдение.

Если в первом интервале скоростей максимальная повторяемость оказалась при отклонениях $\Delta v = 1$ м/с, то при втором $\Delta v = 2$ м/с и ее среднее значение несколько больше 2 м/с.

По наблюдениям в Кихну максимум повторяемости при и других скоростях пришелся так же на $\Delta v = 2$ м/с, в Вильсанди на $\Delta v = 1$ м/с. Во всех пунктах Эстонии отмечены случаи, когда при сильном ветре скорость ветра по флюгеру превосходила скорость ветра по М-12 на 8—9 м/с, в Вильсанди даже на 10 м/с.

По материалам Алма-Атинской ГМО, обработанным ст. техником Н. П. Пустоваловой, представленным директором Е. Г. Палаюк, среднее отклонение скоростей ветра по флюгеру от скоростей ветра по М-12 (рассчитанных по 464 случаям при $v > 15$ м/с) составляет 2,2 м/с, а при скоростях ветра по флюгеру, равных м/с, на ст. Жангиз-Тобе прибор М-12 отмечал скорости на 10—м/с меньше, чем по флюгеру.

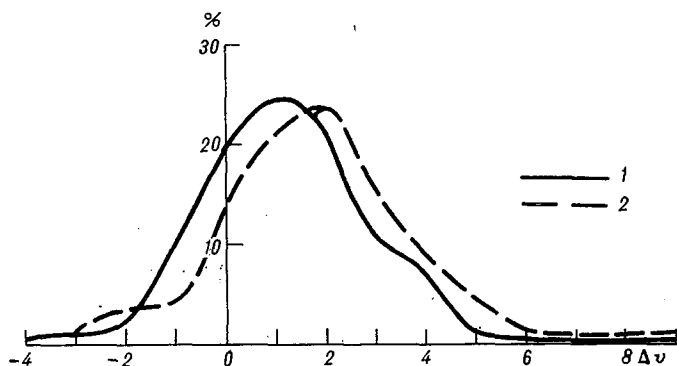


Рис. 1. Повторяемость различных отклонений между скоростями ветра, измеренными М-12 и по флюгеру.
1 — при скоростях более 14 м/с, 2 — при скоростях более 16 м/с.

Большой интерес представляют данные сравнительных наблюдений по М-12 и по флюгеру, представленные начальником отдела климата Ростовской ГМС Т. Е. Иванченко. По ее данным, максимальная скорость ветра за сутки по флюгеру, например в Ростове-на-Дону, в 1,5 раза больше, чем по М-12, на горе Ачишхо среднее отношение этих скоростей составляет 2,2. Повторяемость превышений скорости ветра по флюгеру по сравнению со скоростями ветра по М-12 в Ростове составляет 96%. Эти повторяемости меньше только на станциях, где выбранные скорости ветра незначительно превышали 15 м/с.

Белорусским территориальным гидрометеорологическим центром (БТГМЦ) сравнительные наблюдения проводились по флюгеру, М-12, М-63 и УАТГМС. Обобщение данных, произведенное В. Волобуевой, выполнено для скоростей ветра $v \geq 10$ м/с. Выод оказался такой же, как и по материалам других наблюдений. Если при скоростях, не превосходящих 12—13 м/с, результаты наблюдений всех приборов совпадают, то при скорости более 13 м/с, скорости полученные по флюгеру, как правило, превосходят скорости ветра по другим приборам.

Представляют интерес данные БТГМЦ о числе сильных ветров более 15 м/с, рассчитанные по пятилетним периодам (табл. 1).

На других станциях Белоруссии, где наблюдения над ветром велись одним и тем же прибором, такого различия в числе силь-

ных ветров по пятилетиям не обнаружено. Следовательно, различия в характеристике сильных ветров (табл. I) объясняются различиями в методах наблюдений. Почти во всех случаях скорости, измеряемые УАТГМС и М-12, при сильных ветрах также оказались меньше, чем по флюгеру.

На основании вышеприведенных данных, а также опубликованных другими авторами [1—3, 5, 10], можно заключить, что при сильных ветрах по флюгеру отмечались скорости ветра больше, чем приборами М-12, М-63, УАТГМС, контактными анемометрами НИИГМП и анемометром Фусса. Поскольку каждый из этих при-

Таблица

Среднее за год число дней со скоростью ветра более 15 м/с

Период	Прибор	Витебск	Лида	Гродно	Могилев	Пинск
1961—1965	Флюгер	7	4	5	4	5
1966—1970	М-63	1	0	2	1	2

боров имеет свои погрешности, то неясно, какой прибор дает скорости, наиболее близкие к истинным. Обычно утверждает [1—3, 5], что по флюгеру скорости ветра при сильных ветрах завышены в силу того, что наблюдатель отмечает средние из максимальных порывов ветра, а не среднюю скорость за 2 мин. Приведем результаты сравнения наблюдений по флюгеру с наблюдениями по М-12 и М-27, который принято считать [10—12] безынерционным. Такие наблюдения проводились через каждые три часа зимой 1968 г. на Мархотском перевале (представлены климатологом Ростовской ГМО Ф. П. Царевой). По наблюдениям с помощью М-12 были получены скорости, осредненные за 10-минутные интервалы времени. По прибору М-27 фиксировались минимальные и максимальные значения скорости за 6 и 10 мин. Средняя скорость ветра определена как полусумма экстремумов.

При сравнении данных наблюдений по флюгеру с данными наблюдений по М-12 здесь в 70% случаев первые скорости были выше вторых. В отдельных случаях превышение достигало 12 м/с.

Сравнение со скоростями, определенными по М-27, дало следующие результаты.

В 16 случаях из 35 скорость по М-27 была выше, чем по флюгеру, в 9 случаях они были одинаковыми и в 9—меньше, чем по флюгеру.

Максимальная скорость ветра за сутки, определяемая в течение 20 суток по тому и другому прибору, оказалась по флюгеру в 10 случаях меньше, чем по М-27 и в двух других случаях максимумы совпали.

На основании этих данных легко прийти к прямо противоположному выводу, что флюгер не завышает большие скорости ветра.

сравнению с действительными скоростями, а возможно, даже их снижает.

Занижение больших скоростей ветра при измерении их приборами с вращающимися приемниками подтверждается тщательным анализом принципов действия этих приборов, который выполнен теми работами [7, 10—12].

В обычных анемометрах всегда присутствует сила трения, величина которой зависит от режима работы анемометра. При изменении скорости ламинарного потока сила трения не влияет на результат, так как она учитывается при градуировке прибора.

При измерении скорости возмущенного потока, каким является реальный ветер, происходит занижение действительной скорости вследствие того, что возрастает интенсивность торможения.

Таким образом, всем приборам с вращающимися ветроприемниками свойственно занижение больших скоростей порывистого ветра.

В работах [10, 12] приведен экспериментальный материал, подтверждающий этот вывод. Поэтому на основании сравнения данных наблюдений по флюгеру с данными наблюдений по приборам М-12, М-63, УАТГМС нельзя утверждать, что флюгер завышает большие скорости ветра.

Величина случайных ошибок, связанных с особенностями конструкции флюгера, достаточно хорошо известна. Штифты, на которые ориентируется наблюдатель при определении скорости ветра, расположены на флюгере так, что с увеличением скорости точность отсчета уменьшается. Если при малых скоростях ошибка при определении скорости составляет менее 1 м/с, то при больших может превосходить ± 3 м/с. Возможно, на некоторых ГМС вносится систематическая ошибка, приводящая к завышению больших скоростей ветра, если наблюдатель определял их по отдельным выростам доски флюгера, происходящим под действием порывов ветра.

Однако даже при строгом выполнении правил наставления [6] при визуальных наблюдениях по флюгеру вносится некоторая систематическая погрешность, приводящая к завышению скоростей ветра по сравнению с действительной осредненной скоростью возмущенного потока. Эта погрешность обусловлена тем, что при определении скоростей ветра по флюгеру делается допущение, что шкала скоростей флюгера линейна. На самом же деле, как видно из рис. 2, она отличается от линейной.

Нелинейность шкалы флюгера была учтена при обработке данных электрического датчика, передающего отклонения доски флюгера [11], но этим пренебрегают при визуальных отсчетах по флюгеру.

На рис. 2, согласно [4, 13], показаны кривые отклонения легкой и тяжелой досок флюгера при различных скоростях ветра. На одной из осей ординат указаны номера штифтов, на другой — углы отклонения доски флюгера. По кривым рис. 2 видно, что шкалу флюгера можно считать прямолинейной только между

штифтами 1—5, где справедлива линейная интерполяция скорости ветра. На остальном же участке кривых при определении скорости ветра путем линейной интерполяции допускаются ошибки.

Величина этих ошибок при различных скоростях ветра может быть определена по табл. 2, в которой указаны градации скорости для каждого штифта, для положения доски флюгера между штифтами и соответствующие скорости, снятые с графиков рис. 2 (криволинейной шкале).

В графе «отсчет» приводятся скорости, которые записывает наблюдатель.

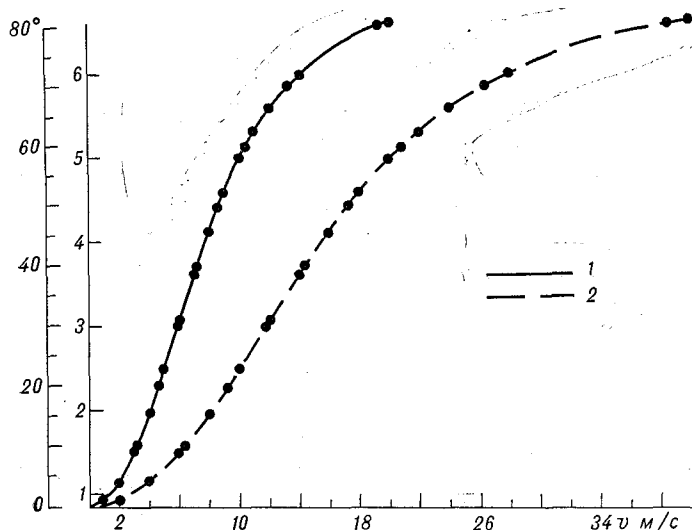


Рис. 2. Зависимость угла наклона доски флюгера от скорости ветра:

1 — флюгер с легкой доской, 2 — флюгер с тяжелой доской.

Из таблицы видно, что при принятом способе отсчета по флюгеру с легкой доской ошибка за счет нелинейности шкалы при скорости 17 м/с достигает 1 м/с. При наблюдениях по флюгеру с тяжелой доской при скоростях более 28 м/с скорость ветра завышается на 2—3 м/с.

По сравнительным наблюдениям, выполненным в ряде УГМС авторами рассчитаны средние скорости ветра, определяемые с помощью М-12 и М-63 при заданных скоростях ветра, отсчитанных по флюгеру.

В табл. 3 приводятся эти данные, а также средние скорости ветра, полученные с помощью разных приборов другими авторами, при сравнении их с теми же скоростями ветра по флюгеру. В этой таблице через v обозначены скорости ветра по флюгеру, $v_{\text{и}}$ — те же скорости, но исправленные на нелинейность шкалы, $A_{\text{к}}$ означает

Таблица 2

Скорости ветра, регистрируемые флюгером и отсчитываемые наблюдателем

Штифт	Флюгер с легкой доской			Флюгер с тяжелой доской		
	градация	$\overline{v}$	отсчет	градация	$\overline{v}$	отсчет
0	0—1	0,5	0	0—2	1,0	0
0—1	1—1,8	1,4	1	2—3,5	2,7	2
1	1,8—2,6	2,2	2	3,5—5,3	4,4	4
1—2	2,6—3,6	3,1	3	5,3—7,2	6,2	6
2	3,6—4,6	4,1	4	7,2—9,0	8,1	8
2—3	4,6—5,5	5,0	5	9,0—11,1	10,0	10
3	5,5—6,5	6,0	6	11,1—13,1	12,1	12
3—4	6,5—7,5	7,0	7	13,1—15,0	14,0	14
4	7,5—8,4	8,0	8	15,0—16,8	15,9	16
4—5	8,4—9,4	8,9	9	16,8—18,8	17,8	18
5	9,4—10,8	10,0	10	18,8—21,6	20,0	20
5—6	10,8—12,7	11,7	12	21,6—25,4	23,5	24
6	12,7—14,9	13,6	14	25,4—29,7	27,2	28
6—7	14,9—17,5	15,9	17	29,7—34,6	31,4	34

еометр контрактной конструкции НИИГМП, А_ф — анемометр усса (ручной). Индексы «2» и «10» означают соответствующие периоды (2 и 10 мин.), за которые осреднялись скорости ветра. При наблюдениях по АРМЭ₂ и М-63₂ осреднение за 2 мин. произведено датчику мгновенной скорости.

Скорости по М-27, приведенные в последнем столбце табл. 3, получены по материалам сравнительных наблюдений на Мархотом перевале. При этих наблюдениях не были зафиксированы скорости, осредненные по интервалу времени, а отмечались лишь максимумы и минимумы за 6 и 10 мин. Поэтому средние скорости в последнем столбце определены как полусумма экстремумов за указанные интервалы времени.

Для того чтобы исключить влияние гололеда на показания приборов, табл. 3 в основном составлена по материалам наблюдений в теплое время года. При каждой скорости ветра по флюгеру (столбец 1) было использовано число сравнительных наблюдений по прибору М-12: при скоростях до 24 м/с — не менее 100, при скоростях более 24 м/с — не менее 30; по прибору М-63 каждая средняя скорость до 12 м/с определялась из 50 измерений, при 14—16 м/с — из 25 и при 18—20 м/с — из 10 измерений.

В результате анализа данных, приведенных в табл. 3, можно делать следующие выводы.

1. Средние скорости ветра, полученные по числу оборотов ветроприемника, т. е. приборами М-12, М-63₁₀, А_к, А_ф, близки меж-

Средние скорости ветра, определенные по параллельным наблюдениям с помощью флюгера и других приборов

Флюгер		По Гарцману		По Иконниковой	По Керимову и Исраимову		По Торочкову и Суражскому		У Г М С		
v	$v_{\text{и}}$	М-12	АРМЭ	$A_{\text{к}}$	$A_{\text{к}}$	$A_{\text{ф}}$	М-27	М-12	М-12	М-63 ₁₀	М-63 ₂
0	0,5	—	—	—	—	—				0,8	0,6
1	1,4	1,12	1,0	1,0	—	—				1,4	1,6
2	2,2	—	1,9	2,0	—	—				2,2	2,5
3	3,1	—	2,8	3,0	—	—				2,9	3,4
4	4,1	—	3,8	3,9	—	—				3,7	4,4
5	5,0	5,0	4,8	4,9	—	—	4,2	5,2		4,5	5,0
6	6,0	—	5,7	5,8	6,0	5,5				5,9	6,2
7	7,0	6,9	6,7	6,8	—	—				6,4	7,0
8	8,0	—	7,6	7,7	7,5	7,0				7,7	7,9
9	8,9	—	8,6	8,7	—	—				8,4	9,1
10	10,0	—	9,5	9,7	9,0	8,5	10,5	10,0		9,5	9,6
12	12,1	—	11,4	11,2	11,6	10,2	12,7	11,6		10,7	11,3
14	14,0	12,2	13,3	12,6	12,0	12,0	14,7	13,4	12,9	13,0	13,4
16	15,9	13,5	15,2	14,2	13,8	14,0	16,8	14,9	14,3	14,3	15,7
18	17,8	15,0		15,8	15,0	15,8	18,7	16,4	16,3	16,1	17,7
20	20,0	16,3		17,5	16,0	17,0	20,4	17,6	17,9	16,7	19,9
24	23,5	18,9		20,0	18,5	—	23,5	19,9	20,1		23,5
28	27,2	21,1		22,7	21,0	—	27,4	22,9	23,3		26,7
34	31,4	24,1		26,0	22,5	—	32,1	26,7	26,0		31,4

ду собой и при скоростях, не превосходящих 12 м/с, практически совпадают со скоростями, определенными с помощью флюгера.

При больших скоростях расхождения в показаниях этих приборов незначительны, однако средние скорости, вычисленные по показаниям этих приборов, меньше средних скоростей, полученных по флюгеру. С увеличением скорости это расхождение возрастает.

2. Средние скорости, вычисленные из показаний приборов АРМЭ, М-63₂ и М-27, также близки друг к другу. Вместе с тем они меньше отличаются от показаний флюгера. Исправленные на нелинейность шкалы средние скорости по флюгеру хорошо согласуются со средними скоростями по показаниям этих приборов.

3. Скорости ветра, полученные по флюгеру, М-27, АРМЭ и М-63₂, существенно выше скоростей, полученных по М-12, М-63₁₀, $A_{\text{к}}$ и $A_{\text{ф}}$. Разница между ними возрастает с увеличением скорости ветра. При скоростях 30—35 м/с она достигает 5—6 м/с.

Проведенные исследования приводят к заключению, что при определении редко наблюдаемых больших скоростей ветра (называемых расчетными), по которым рассчитываются ветровые нагрузки, необходимо принимать во внимание методы измерения больших скоростей. Если в рассматриваемый период наблюдения проводились разными приборами, то следует выполнить приведение результатов измерений к одному и тому же прибору путем введения соответствующих поправок. Поправки на результаты измерений по приборам с вращающимися приемниками положительны по величине больше, чем отрицательные поправки к данным, полученным по флюгеру.

При наличии дифференциальных повторяемостей скоростей ветра, измеренных по флюгеру, эти поправки могут быть введены при построении интегральных кривых путем уточнения градаций скоростей, для которых рассчитаны повторяемости.

В районах с очень сильными ветрами расчетные скорости ветра, возможные раз в 5 лет, снятые с исправленных интегральных кривых, несколько понизятся по сравнению с расчетными скоростями, указанными в справочнике по климату СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарцман Л. Б. Исследование ветровых нагрузок на линии электропередач. Ташкент, Изд-во «ФАН», 1967. 158 с.
2. Гоптарев Н. П. Некоторые результаты градиентных исследований в районе нефтяных камней.—«Труды ГОИН», 1957, вып. 36, с. 128—202.
3. Иконникова Л. Н. К вопросам об измерении скорости ветра флюгером.—«Метеорология и гидрология», 1960, № 4, с. 48—50.
4. Кедров В. Н., Стернзат М. С. Метеорологические приборы. Л., Гидрометеиздат, 1953. 544 с.
5. Керимов А. А., Исраимов А. А. Сравнение результатов измерений скорости ветра, осуществленных различными приборами.—«Метеорология и гидрология», 1970, № 11, с. 102—104.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л., Гидрометеиздат, 1969. 306 с.
7. Протопопов Н. Г. Некоторые вопросы теории и расчета винтовых ветрочувствительных элементов.—«Труды ГГО», 1966, вып. 199, с. 3—31.
8. Смирнов С. А. Сравнительные характеристики скорости ветра, определенные приборами с различными интервалами осреднения.—«Труды ГГО», 1965, вып. 174, с. 135—148.
9. Смирнов С. А. Некоторые результаты сравнительных наблюдений по анеморомбметру М-63 и флюгеру.—«Труды ГГО», 1965, вып. 214, с. 31—33.
10. Торочков В. Ю., Суражский Д. Я., Сырко А. А. Частотный анализ работы приемников ветроизмерительных приборов. М., Гидрометеиздат, 1964. 62 с.
11. Торочков В. Ю., Суражский Д. Я. Об измерении средней скорости ветра.—«Труды НИИГМП», 1967, вып. 17, с. 15—32.
12. Торочков В. Д., Суражский Д. Я. Ветроизмерительные приборы. Л., Гидрометеиздат, 1970. 103 с.
13. Kleinschmidt E. Handbuch der meteorologischen Instrumente und ihrer Auswertung. Verlag von Julius Springer. 1935, 733 S.

СОДЕРЖАНИЕ

М. В. Заварина. Оценка методов расчета гололедных и гололедно-ветровых нагрузок и перспективы их совершенствования	1
Е. П. Никифоров. Влияние конструкции воздушных линий электропередачи на интенсивность гололедных отложений	1
Ф. Я. Клинов, В. П. Бойков. О гололедно-изморозевых отложениях в нижнем 500-метровом слое атмосферы по наблюдениям с телевизионной башни в Останкино	2
В. Г. Глухов. К расчету гололедных нагрузок на высотные сооружения по аэроклиматическим характеристикам низкой облачности	3
Л. Г. Гончар, Н. М. Ланда, Д. В. Холмский. К расчету нормативной скорости ветра при гололеде	3
О. А. Подрезов, С. А. Федорова. Опыт использования системы кривых Пирсона для оценки вероятных величин гололедных отложений	4
Л. Е. Ломилина. Учет влияния рельефа местности при районировании территории по гололедным нагрузкам	5
Л. Г. Гончар, Н. М. Ланда, Д. В. Холмский. Об учете рельефа при определении гололедно-ветровых нагрузок на воздушные линии электропередачи	6
М. В. Заварина, В. Г. Глухов. О приведении данных гололедного станка к рабочим уровням линий электропередачи	6
В. В. Холодов, И. М. Гуляев, Ф. С. Ромазан. Первый год работы высокогорной испытательной станции ЛЭП на перевале Орто-Ашу	7
А. Н. Раевский, В. П. Капралова. Распределение особо опасных отложений атмосферного льда и гололедные нагрузки в Украинских Карпатах	8
В. Г. Глухов, М. А. Войтик. Некоторые результаты экспериментальных исследований обледенения проводов на Новопятигорской гололедной станции	9
Л. А. Савченко. Некоторые закономерности формирования гололедных нагрузок на провода ЛЭП и ЛС в горных районах	9
Н. А. Олейникова. Плотность гололедно-изморозевых отложений на территории Украины	10
А. П. Чучев. Экспериментальное исследование пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра в приземном слое воздуха	11
Р. П. Бернгардт, М. В. Заварина. Климатологическая оценка точности измерения больших скоростей ветра	12

ТРУДЫ ГГО, вып. 333

Метеорологические нагрузки на сооружения

Редактор *Л. В. Ковель*
 Технический редактор *М. С. Костакова*
 Корректоры: *Г. Н. Римапт, А. В. Хюркес.*

Сдано в набор 26/X 1973 г. Подписано к печати 12/VIII 1974 г. М-06411. Формат 60×90^{1/16}, бумага тип. № 1. Печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 9,19. Тираж 1000 экз. Индекс МЛ-94. Заказ № 77. Цена 64 коп.
 Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР. Сортавала, Карельская, 42.